



CATALOGUE DES COURS DE 2^{ème} ANNÉE

Année académique 2025-2026

Édition du 12 septembre 2025

TABLE DES MATIERES

COURS COMMUNS	9
2CC1000 – Commande des systèmes dynamiques.....	10
2CC1005 – Commande des systèmes dynamiques - DUAL.....	14
2CC3000 – Optimisation	18
2CC3005 – Optimisation - DUAL	20
COURS HORS SEQUENCE	22
2SL1000 – Economie	23
2SL1100 – Climat et controverses.....	25
2SL3000 – Philosophie	27
2SL4000 – Sociologie et droit du travail	29
2SL5007 – Ateliers Pratiques Ingénieur - API - 2A	31
2SL7007 – Ateliers Pratique Professionnelle - APP - 2A	33
2SL8000 – Projet S7	34
2SL8100 – Projet S8	36
Grands enjeux de société.....	38
2SL9000 – Sport	40
COURS ÉLECTIFS 2A.....	42
2EL0010 – Teaching assistant	43
2EL1110 – Systèmes dynamiques en neurosciences.....	45
2EL1120 – Systèmes Robotiques Interactifs	48
2EL1130 – Systèmes dynamiques multi-agents. Application au vol en formation de drones.....	51
2EL1210 – Exposition des personnes à l'électromagnétisme et compatibilité électromagnétique	54
2EL1230 – Systèmes spatiaux embarqués	56
2EL1240 – Systèmes de navigation et optronique pour véhicules autonomes et satellites - Technologies temps réel	58
2EL1310 – Energies renouvelables	60
2EL1315 – Conversion d'énergie électrique pour les sources d'énergie renouvelables et l'électromobilité.....	62
2EL1320 – Conversion d'énergie.....	64
2EL1410 – Transferts Thermiques	67
2EL1420 – Mécanique des fluides.....	71

2EL1430 – Ingénierie Nucléaire	75
2EL1440 – Modélisation et simulation numérique des milieux réactifs.....	77
2EL1450 – Cours d'analyse structurelle	80
2EL1520 – Génie logiciel orienté objet	83
2EL1540 – Informatique théorique.....	85
2EL1550 – Calcul haute performance	87
2EL1560 – Modèles et systèmes pour la gestion des données massives	90
2EL1580 – Intelligence Artificielle.....	92
2EL1590 – Cloud computing et informatique distribuée.....	95
2EL1710 – Probabilités avancés.....	98
2EL1720 – Distributions et opérateurs	100
2EL1730 – Machine Learning	102
2EL1740 – Algèbre et cryptologie	104
2EL1750 – Statistiques avancées	106
2EL1760 – Calcul scientifique.....	108
2EL1810 – Dynamique des Structures et Acoustique	110
2EL1830 – Comportement non-linéaire des matériaux.....	112
2EL1840 – Construire Demain – La Mécanique Appliquée au Génie Civil.....	114
2EL1850 – Simulation des couplages multiphysiques avec la MEF	116
2EL1860 – La rénovation, enjeux architecturaux, techniques et urbains.....	118
2EL1910 – Lois fondamentales de l'Univers : physique des particules et de la gravitation	120
2EL1920 – Physique quantique et Statistique Avancée.....	122
2EL2010 – Compréhension, optimisation et simulation des procédés biotechnologiques.....	124
2EL2020 – Hydrodynamique et interfaces.....	126
2EL2030 – Génomique et biologie synthétique en biotechnologie sanitaire et industrielle	129
2EL2040 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrications.....	132
2EL2050 – Biomécanique et matériaux du vivant	135
2EL2115 – Gestion de l'innovation technologique	137
2EL2140 – Stratégie, Marketing et Organisation	141
2EL2150 – Finance et Droit de l'entreprise.....	143
2EL2160 – Economie de l'environnement, énergie et développement durable	146
2EL2170 – Economie de la croissance et de l'innovation	148
2EL2210 – Introduction to Operations Management.....	151
2EL2220 – Théories des organisations et des marchés	154
2EL2230 – Maintenance et industrie 4.0	156
2EL2240 – Économie des systèmes de transport décarbonés.....	158

2EL2410 – Compression et débruitage des signaux	161
2EL2420 – Traitement d'images numériques	164
2EL2510 – Architecture et conception des systèmes numériques.....	167
2EL2520 – Électronique pour les applications biomédicales.....	169
2EL2530 – Capteurs intégrés MEMS	171
2EL2610 – Théorie des communications	173
2EL2620 – Réseaux de communication mobiles et services.....	176
2EL2630 – Applications de la physique statistique et quantique aux sciences de l'information ..	178
2EL2720 – Engagement handicap - Tutorat auprès de jeunes en situation de handicap.....	181
2EL2730 – Electif associatif.....	184
2EL2740 – Enjeux, actualités et opportunités du secteur public.....	186
2EL6020 – Architecture des ordinateurs	189
2EL6030 – Systèmes d'exploitation	192
2EL6040 – Programmation système sous linux et windows.....	194
2EL6110 – Réseaux informatiques avancés	196
2EL6130 – Systèmes embarqués et internet des objets.....	197
2EL6210 – Géopolitique des ressources et des objets	199
COURS SEQUENCE THEMATIQUE 5	202
ST5 – 51 – PILOTAGE ET CONTROLE DE VOL DANS LE TRANSPORT AERONAUTIQUE ET SPATIAL	203
2SC5110 – Performances et trajectoires de vol.....	205
2SC5191 – Stratégie de contrôle d'un nanosatellite.....	208
2SC5192 – Définition et conception de mission d'un lanceur	210
2SC5193 – Conception et pilotage d'un avion d'affaire.....	212
ST5- COMMANDE DE BIOPROCEDES POUR L'ENVIRONNEMENT ET LES BIOFABRICATIONS	214
2SC5210 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrifications	217
2SC5291 – Traitement biologique optimisé des eaux résiduaires urbaines.....	220
2SC5292 – Système de support de vie pour le spatial.....	223
2SC5293 – Supervision avancée d'un procédé pour la production de bio-plastique à partir d'effluents industriels	225
ST5- VEHICULE AUTONOME ET CONNECTE	228
2SC5310 – Architecture et technologie du véhicule autonome	230
2SC5390 – Conception d'un système de livraison urbaine "dernier kilomètre" par véhicules autonomes et connectés	232
ST5- L'ECO-QUARTIER, UN SYSTEME COMPLEXE. AMENAGEMENT DURABLE & MANAGEMENT DE PROJET COMPLEXE.....	234
2SC5410 – Aménagement et urbanisme durable.....	236
2SC5490 – Projet de conception d'un éco-quartier.....	238

ST5- LUMIERE ET MATIERE: DEVELOPPEMENT D'INSTRUMENTS DE HAUTE TECHNOLOGIE.....	240
2SC5510 – Physique de la matière.....	242
2SC5591 – Conception d'un faisceau Synchrotron	244
ST5- SYSTEMES MULTI-ENERGIES	246
2SC5610 – Conversion et régulation d'énergie	248
2SC5691 – Régulation et commande de systèmes de production et de conversion d'énergie	250
2SC5692 – Groupe motopropulseur hybride.....	252
2SC5693 – Propulsion aéronautique hybride	254
ST5- CONTROLE DE LA POLLUTION ACOUSTIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE	256
2SC5710 – Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes	259
2SC5791 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique extérieure.....	262
2SC5792 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique intérieure	264
2SC5793 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution électromagnétique	266
ST5- SYSTEMES COMPLEXES INDUSTRIELS ET CRITIQUES A LOGICIELS PREPONDERANTS	268
2SC5810 – Conception et vérification de systèmes critiques	270
2SC5891 – Conception d'un système de commande sûr pour un ascenseur.....	272
2SC5893 – Système intelligent pour le contrôle automatisé du trafic aérien.....	274
2SC5894 – Automatisation de la conception de la signalisation : de la spécification au code embarqué.....	276
ST5- DATA DRIVEN CONTROL.....	278
2SC5910 – Approches de modélisation, identification et commande des systèmes fondées sur l'apprentissage.....	280
2SC5990 – Identification et commande de véhicules autonomes par approche data-driven	283
ST5- MOBILITÉ AUTOMATISÉE CONNECTÉE ET COOPÉRATIVE.....	286
2SC6010 – Perception, connectivité, et fusion-décision pour la mobilité automatisée.....	291
2SC6090 – Mini-défi sur la CCAM	295
2SC6410 – Modèles de données et schémas de conception.....	298
2SC6490 – Développement d'un système de supervision de capteurs	300
ST5 - 65 - INGENIERIE SYSTEME POUR LE CONTROLE-COMMANDE DES CENTRALES NUCLEAIRES FACE AUX GRANDS ENJEUX DE SURETE ET DE FLEXIBILITE DES SYSTEMES ENERGETIQUES DECARBONES	302
2SC6510 – Contrôle-commande des réacteurs nucléaires.....	305
2SC6590 – Conception du contrôle-commande d'un sous-système d'une centrale nucléaire pour le fonctionnement normal.....	307

2SC6591 – Conception du contrôle-commande d’une fonction de sûreté d’une centrale nucléaire pour des scénarios d’accidents.....	309
COURS SEQUENCE THEMATIQUE N°7	311
ST7 – FINANCE STOCHASTIQUE ET MODÉLISATION DES RISQUES	312
2SC7110 – Modélisation des risques financiers.....	314
2SC7190 – Gestion des risques financiers	316
ST7 - VILLES INTELLIGENTES.....	318
2SC7210 – Théorie des jeux pour les villes intelligentes	320
2SC7290 – Smart cities : les cités connectées.....	322
ST7 - ECONOMIE CIRCULAIRE DES SYSTEMES INDUSTRIELS.....	324
2SC7310 – Méthodes et outils de l'Economie Circulaire	327
2SC7390 – Projet industriel d'économie circulaire	329
ST7 – OPTIMIZATION OF PASSENGER TRANSPORT SYSTEMS.....	333
2SC7410 – Aide à la Décision : Modèles, algorithmes et implémentation	335
2SC7490 – Optimisation des systèmes de transport de passagers	337
ST7 - SIMULATION DE FLUX INDUSTRIELS	338
2SC7510 – Optimisation et gestion de flux.....	339
2SC7591 – Gestion des flux dans la livraison de gaz industriels.....	341
2SC7592 – Gestion des flux de patients et des services de santé	343
ST7 - Simulation à Haute Performance pour la Réduction d’Empreintes.....	345
2SC7610 – Méthodes et algorithmes de calcul parallèle, et méthodes d’optimisation.....	348
2SC7691 – Optimisation d’une campagne d’exploration sismique pour la protection des ouvrages	351
2SC7692 – Optimisation de formes et réduction de la trainée en aéronautique	354
2SC7693 – Optimisation de détection d’ondes infrasonores pour la vérification du traité d’interdiction complète d’essais nucléaires	357
2SC7694 – Optimisation énergétique et accélération d’un graphe de calculs financiers sur cloud	360
2SC7695 – Optimisation à faible coût des performances d’un code de propagation d’ondes acoustiques	364
ST7 - EFFICACITE DES SYSTEMES D’ENERGIE EMBARQUES.....	368
2SC7710 – Méthodes numériques et résolution des problèmes d’optimisation des systèmes d’énergies embarqués	370
2SC7790 – Efficacité des systèmes d’énergie embarqués	372
ST7 - CONCEPTION EN FABRICATION ADDITIVE	373
2SC8110 – Couplages multiphysiques	375
2SC8190 – Optimisation de structure en fabrication additive	377

ST7 – OPTIMISATION DANS LE CONTEXTE DE LA PROGRAMMATION QUANTIQUE	379
2SC8310 – Programmation, Algorithmes et Optimisation Quantique	384
2SC8391 – Optimisation des circuits quantiques pour les qubits de chat résistants aux erreurs.	386
2SC8392 – Chaîne de conversion d'un circuit quantique classique vers un circuit photonique optimisé (transpilation)	388
2SC8393 – Regroupement de données basé sur des circuits quantiques et des algorithmes d'optimisation hybrides	390
2SC8394 – Recherche optimale de signaux faibles dans des traces réseau à l'aide de l'apprentissage automatique quantique.....	392
ST7 – SOUTENABILITE ABSOLUE DES TERRITOIRES.....	394
2SC8410 – Planification pour des territoires soutenables.....	397
2SC8494 – Planification soutenable du territoire de Paris Saclay	400
PARCOURS COMPILATION / INFOSEC.....	402
2SC3000 – Compilation - Infosec	402
2SC3090 – Projet Compilation - Infosec.....	404
COURS en SEMAINE INTERCALAIRE 2A	405
2IN1510 – Comprendre la blockchain.....	406
2IN1520 – Analyse de risques - INFOSEC.....	408
2IN1570 – Développement d'applications web et mobile	410
2IN1600 – Design your way	412
2IN1610 – Enjeux contemporains du monde rural à l'heure de la transformation écologique et énergétique.....	414
2IN2120 – Accès aux services essentiels dans les pays en développement.....	416
2IN2310 – Individus, Travail, Organisations.....	418
2IN2320 – Enjeux de Société	419
2IN2330 – Science, Technologie, Société	420
2IN2340 – Innovation, Arts et créativité.....	422
2IN4000 – Jeux d'entreprise	423
2IN5010 – Bridge Building challenge	425
2IN5020 – Innovation des semi-conducteurs	427
2IN5025 – Introduction à la fatigue des matériaux	429
2IN5030 – Travail expérimental de physique	431
2IN5050 – Radio logicielle : décodage RF, brouillage et contremesure	433
2IN5060 – Traitement du signal audio.....	435
2IN5070 – Semaine d'immersion dans les matériaux biosourcés	437
2IN5080 – Physique des décharges électriques (plasmas froids).....	439
2IN5110 – Ethique et Responsabilité.....	441

COURS de LANGUES et CULTURES	443
LC0100 – Anglais	444
LC0200 – Français Langue Etrangère	445
LC0300 – Allemand	446
LC0400 – Espagnol	448
LC0500 – Italien.....	450
LC0600 – Portugais.....	451
LC0700 – Chinois	452
LC0800 – Japonais	453
LC0900 – Russe	454
LC1000 – Arabe	456
LC1200 – Hébreu.....	457
LC1500 – Suédois	459

COURS COMMUNS

2CC1000 – Commande des systèmes dynamiques

Responsables : **Hugo Lhachemi, Maria Makarova**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **31,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

La majorité des systèmes physiques fait apparaître le concept fondamental de boucle de rétroaction, permettant de les piloter et de leur conférer un comportement le plus insensible possible aux perturbations de l'environnement. L'objectif général de ce cours est de fournir aux étudiants les concepts et compétences leur permettant de comprendre la structure et les interactions au sein de systèmes dynamiques existants ou en phase de conception, de traiter l'information, de déterminer une loi de commande en vue de satisfaire un cahier des charges et d'analyser son niveau de performance et de robustesse. Pour y parvenir, les étudiants devront être à même de définir un modèle (ou un ensemble de modèles), de façon à mettre en évidence les grandeurs influant sur l'état de ce système (entrées), les mesures permettant d'accéder à cet état et les grandeurs sur lesquelles portent des exigences (sorties), ainsi que les relations liant ces variables. A partir de l'analyse des entrées pilotables (commandes) ou subies (perturbations), l'étudiant devra déterminer une loi de commande en vue d'assurer les performances attendues. La dernière étape abordée dans ce cours consistera en l'analyse de la robustesse de la loi de commande déterminée.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours en promotion complète "Modélisation" en ST2, Cours en promotion complète hors séquence "Convergence, intégration, probabilités" et "équations aux dérivées partielles", Cours en promotion complète « Traitement du signal » en ST4

Plan détaillé du cours (contenu)

Découpage du cours en chapitres :

1. Introduction
 - a) Intérêt de la boucle fermée, notions clés du contrôle, rejet de perturbation
 - b) Approche fréquentielle classique vs approche temporelle plus actuelle et générique
 - c) Exemples d'applications
 - d) Théorèmes généraux : limitations intrinsèques à la boucle idéale (nécessité de formaliser, de compromis à faire)
2. Représentation d'état
 - a) Rappels
 - b) Propriétés (commandabilité, observabilité)
 - c) Rapport entre modèle linéarisé et non linéaire - implémentation de la loi de commande sur le modèle non linéaire.
3. Commande des systèmes par approche d'état
 - a) Commande par placement de pôles dans le cas monovarié, précision et suivi de trajectoire de référence
 - b) Commande Linéaire Quadratique (LQ)
 - c) Cas des perturbations mesurables et leurs rejets
 - d) Commande LQ avec action intégrale

4. Commande par retour d'état avec observateur
 - a) Observateur par placement de pôles
 - b) Filtre de Kalman (dualité avec la commande LQ)
 - c) Commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) – Théorème de séparation
5. Analyse des performances et de robustesse d'une loi de commande
 - a) Rappels : liens avec la fonction de transfert
 - b) Correcteur équivalent pour les commandes LQ et LQG
 - c) Théorème du petit gain
 - d) Définition des marges de stabilité dans le cas multivariable.
 - e) Cas particulier des marges de stabilité dans le cas monovariable
 - f) Cas particulier des lois LQ et LQG - Loop Transfer Recovery (effet LTR)
 - g) Cas particulier des marges de stabilité pour des lois de commande fréquentielles classiques (par exemple correction par avance de phase, régulateur PI et PID)
6. Cours invité : les enjeux et les problématiques ouvertes et actuelles de la commande des systèmes dans l'industrie et la recherche

Déroulement, organisation du cours

12h de cours et 1,5h de cours invité, 9h de travaux dirigés, 6h de travaux de laboratoire (2 séances de 3h)

Sur le campus de Saclay : le cours est dispensé en 8 voies d'environ 100 élèves, 7 voies en Français et une voie en Anglais.

Organisation de l'évaluation

Evaluation des connaissances :

- Présence contrôlée en TD et TP. Pénalité : une absence non justifiée à une séance de TP donne lieu à une réduction de 50% de la note de TP.
- Contrôle intermédiaire sous forme de compte-rendu de travaux pratiques écrit. Note TP : 25% de la note du module.
- Contrôle final sous forme d'examen écrit (3h) avec calculatrice, photocopiés et notes de cours de l'élève autorisés. Note contrôle final : 75% de la note du module.
- Evaluation des compétences :
- Les compétences C1 et C2 seront évaluées dans le cadre des travaux pratiques et de l'examen final. Les textes de ces deux activités feront ressortir les paragraphes et questions clairement identifiés en lien avec chacune de ces compétences.
- La sous compétence C2.4 de la compétence C2 sera plus spécifiquement évaluée dans le cadre des travaux pratiques.
- Les modalités de validation de ces deux compétences seront indiquées au début du premier cours par l'équipe enseignante.

Support de cours, bibliographie

Photocopiés :

- Photocopie « Commande des systèmes dynamiques » en Français
- Glossaire « Commande des systèmes dynamiques » Français-Anglais et Anglais-Français
- Recueil des transparents utilisés en cours

Bibliographie :

- J.J. D'Azzo & C.H. Houpis - "Linear Control System. Analysis and Design" - 3e éd., Mc Graw-Hill, 1988.
- P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis - "Analyse et régulation des processus industriels. Tome 1. Régulation continue, Tome 2. Régulation numérique" - Éditions Technip, 1993.
- J.B. Deluche - "Automatique. De la théorie aux applications industrielles. Tome 2 : Systèmes continus" - Edipol, 2000.
- J.M. Flaus - "La régulation industrielle" - Hermès, 1994.
- G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini - "Feedback Control of Dynamic Systems" - 7° éd., Ed. Pearson Publishing Company, 2014.
- B. Friedland - "Control system design" – Mc Graw-Hill, 1986.
- Ph. de Larminat - "Automatique. Commande des systèmes linéaires" - Hermès, 1996.
- L. Marec - "Régulation automatique" - Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- K. Ogata - "Modern Control Engineering" - 5e éd., Ed. Pearson Education International, 2009.
- A. Rachid - "Systèmes de régulation" - Masson 1996.
- M. Zelazny, F. Giri et T. Bannani - "Systèmes asservis : commande et régulation" - Eyrolles, 1993.

Moyens

- Équipe enseignante :
 - Chargés et chargées de cours sur le campus de Saclay : Antoine Chaillet, Didier Dumur, Hugo Lhachemi, Maria Makarova, Pedro Rodriguez-Ayerbe, Cristina Stoica, Sihem Tebbani, Cristina Vlad
 - Chargés et chargées de TD sur le campus de Saclay : Antoine Chaillet, Didier Dumur, Maria Makarova, Cristina Stoica, Cristina Vlad, Sorin Olaru, Pedro Rodriguez-Ayerbe, Guillaume Sandou, Hugo Lhachemi, Stéphane Font, Jacques Antoine, Jing Dai, Maxime Pouilly-Cathelain, Antoine Girard
- Taille des TD sur le campus de Saclay : 35 élèves
- Travaux pratiques (TP) sur le campus de Saclay : 100 élèves par demi-journée, études réalisées sur des maquettes expérimentales
- Outils logiciels : Matlab (utilisé pendant les TD et les TP)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Comprendre et analyser l'intérêt d'une structure de commande en boucle fermée.
- Modéliser le comportement d'un système dynamique par une représentation temporelle (représentation d'état) ou éventuellement fréquentielle :
 - Faire le choix d'un modèle (ou d'un ensemble de modèles) de comportement adapté au regard de l'objectif de commande et/ou d'analyse (linéarisation, réduction de modèle, ...).
 - Valider la pertinence du modèle (ou de l'ensemble de modèles proposé)
- Synthétiser des lois de commande sous forme de représentation d'état complétée si besoin par la synthèse d'un observateur.
 - Analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges.
 - Choisir et synthétiser le correcteur adapté.
 - Déterminer un observateur permettant d'estimer les grandeurs d'état non mesurées.
 - Valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus
 - Analyser la performance et la robustesse de la loi de commande
- 4. Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental)
- 5. Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu de Travaux Pratiques).

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences validées :

Compétence C1 "Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques", évaluée dans ce cours :

- "Modéliser le comportement d'un système dynamique " s'inscrit dans C1.2 "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème"
- "Analyser le comportement temporel et/ou fréquentiel d'un système et les effets du bouclage" s'inscrit dans C1.1 "Etudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines"
- "Déterminer une loi de commande par retour d'état (complétée si besoin par la synthèse d'un observateur), afin de satisfaire un cahier des charges temporel et/ou fréquentiel" s'inscrit dans C1.4 "Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe"
- "Valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus" s'inscrit dans C1.3 "Résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation"

Compétence C2 "Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers", évaluée dans ce cours :

- "Modéliser le comportement d'un système dynamique" et "Analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges" nécessitent une appropriation du domaine d'application considéré et de ses contraintes, et s'inscrit donc dans C2.2 "Importer des connaissances d'autres domaines ou

disciplines" et C2.3 "Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires"

- "Analyser la performance et la robustesse de loi de commande" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"
- "Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental)" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"
- Enfin "Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu d'Études de Laboratoire)" s'inscrit dans C7.1 "Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée". Cette compétence ne sera pas évaluée dans ce cours.

Évaluation des acquis d'apprentissage :

Les acquis d'apprentissage concernant C1 et C2 seront évalués dans les situations suivantes :

- 2 séances de travaux pratiques permettront d'évaluer l'ensemble de ces acquis d'apprentissage en étant confronté à un procédé réel à modéliser, analyser et piloter. Ce mode pédagogique permet en particulier de confronter les élèves à l'expérimentation et à la validation de la démarche de modélisation et de synthèse.
- Un examen final confrontera également les élèves à une problématique réelle d'un procédé qu'il conviendra de modéliser, analyser et piloter. L'accent y sera mis moins sur les aspects expérimentaux que sur la capacité à satisfaire une problématique industrielle.

La compétence C2.4 sera plus spécifiquement travaillée lors des séances de travaux pratiques, ainsi que lors du travail personnel (nécessitant la mise en œuvre du procédé via un logiciel de simulation) effectué entre les deux séances de travaux pratiques.

La compétence C7 ne sera pas évaluée, mais néanmoins travaillée par l'intermédiaire du compte-rendu remis à l'issue des séances de travaux pratiques.

2CC1005 – Commande des systèmes dynamiques - DUAL

Responsables : **Cristina Vlad**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **31,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

La majorité des systèmes physiques fait apparaître le concept fondamental de boucle de rétroaction, permettant de les piloter et de leur conférer un comportement le plus insensible possible aux perturbations de l'environnement. L'objectif général de ce cours est de fournir aux étudiants les concepts et compétences leur permettant de comprendre la structure et les interactions au sein de systèmes dynamiques existants ou en phase de conception, de traiter l'information, de déterminer une loi de commande en vue de satisfaire un cahier des charges et d'analyser son niveau de performance et de robustesse. Pour y parvenir, les étudiants devront être à même de définir un modèle (ou un ensemble de modèles), de façon à mettre en évidence les grandeurs influant sur l'état de ce système (entrées), les mesures permettant d'accéder à cet état et les grandeurs sur lesquelles portent des exigences (sorties), ainsi que les relations liant ces variables. A partir de l'analyse des entrées pilotables (commandes) ou subies (perturbations), l'étudiant devra déterminer une loi de commande en vue d'assurer les performances attendues. La dernière étape abordée dans ce cours consistera en l'analyse de la robustesse de la loi de commande déterminée.

Prérequis

Cours en promotion complète "Modélisation" en ST2, Cours en promotion complète hors séquence "Convergence, intégration, probabilités" et "équations aux dérivées partielles"

Plan détaillé du cours (contenu)

Découpage du cours en chapitres :

1. Introduction
 - a) Intérêt de la boucle fermée, notions clés du contrôle, rejet de perturbation
 - b) Approche fréquentielle classique vs approche temporelle plus actuelle et générique
 - c) Exemples d'application
 - d) Théorèmes généraux : limitations intrinsèques à la boucle idéale (nécessité de formaliser, de compromis à faire)
2. Représentation d'état
 - a) Rappels
 - b) Propriétés (commandabilité, observabilité)
 - c) Rapport entre modèle linéarisé et non linéaire - implémentation de la loi de commande sur le modèle non linéaire.
3. Commande des systèmes par approche d'état
 - a) Commande par placement de pôles dans le cas monovariable, précision et suivi de trajectoire de référence
 - b) Commande Linéaire Quadratique (LQ)
 - c) Cas des perturbations mesurables et leurs rejets
 - d) Commande LQ avec action intégrale
4. Commande par retour d'état avec observateur
 - a) Observateur par placement de pôles
 - b) Filtre de Kalman (dualité avec la commande LQ)
 - c) Commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) – Théorème de séparation

5. Analyse des performances et de robustesse d'une loi de commande

- a) Rappels : liens avec la fonction de transfert
- b) Correcteur équivalent pour les commandes LQ et LQG
- c) Théorème du petit gain
- d) Définition des marges de stabilité dans le cas multivariable
- e) Cas particulier des marges de stabilité dans le cas monovariable
- f) Cas particulier des lois LQ et LQG - Loop Transfer Recovery (effet LTR)
- g) Cas particulier des marges de stabilité pour des lois de commande fréquentielles classiques (par exemple correction par avance de phase, régulateur PI et PID)

Déroulement, organisation du cours

13,5h de cours, 9h de travaux dirigés, 6h de travaux de laboratoire (2 séances de 3h)

Tous les cours sont dispensés en français.

Organisation de l'évaluation

Evaluation des connaissances :

- Présence contrôlée en TD et TP. Pénalité : une absence non justifiée à une séance de TP donne lieu à une réduction de 50% de la note de TP.
- Contrôle intermédiaire sous forme de compte-rendu de travaux pratiques écrit. Note TP : 25% de la note du module.
- Contrôle final sous forme d'examen écrit (3h) avec calculatrice, photocopiés et notes de cours de l'élève autorisés. Note contrôle final : 75% de la note du module.

Evaluation des compétences :

- Les compétences C1 et C2 seront évaluées dans le cadre des travaux pratiques et de l'examen final. Les textes de ces deux activités feront ressortir les paragraphes et questions clairement identifiés en lien avec chacune de ces compétences.
- La sous compétence C2.4 de la compétence C2 sera plus spécifiquement évaluée dans le cadre des travaux pratiques.
- Les modalités de validation de ces deux compétences seront indiquées au début du premier cours par l'enseignant.

Support de cours, bibliographie

Polycopiés :

- Polycopié « Commande des systèmes dynamiques » en Français
- Glossaire "Commande des systèmes dynamiques" Français-Anglais et Anglais-Français
- Recueil des transparents utilisés en cours

Bibliographie :

- J.J. D'Azzo & C.H. Houpis - "Linear Control System. Analysis and Design" - 3e éd., Mc Graw-Hill, 1988.
- P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis - "Analyse et régulation des processus industriels. Tome 1. Régulation continue, Tome 2. Régulation numérique" - Éditions Technip, 1993.
- J.B. Deluche - "Automatique. De la théorie aux applications industrielles. Tome 2 : Systèmes continus" - Edipol, 2000.
- J.M. Flaus - "La régulation industrielle" - Hermès, 1994.
- G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini - "Feedback Control of Dynamic Systems" - 7° éd., Ed. Pearson Publishing Company, 2014.
- B. Friedland - "Control system design" - Mc Graw-Hill, 1986.
- Ph. de Larminat - "Automatique. Commande des systèmes linéaires" - Hermès, 1996.
- L. Maret - "Régulation automatique" - Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- K. Ogata - "Modern Control Engineering" - 5e éd., Ed. Pearson Education International, 2009.
- A. Rachid - "Systèmes de régulation" - Masson 1996.
- M. Zelazny, F. Giri et T. Bennani - "Systèmes asservis : commande et régulation" - Eyrolles, 1993.

Moyens

Équipe enseignante : Cristina Vlad

- Travaux pratiques (TP) : études réalisées sur maquettes expérimentales
- Outils logiciels : Matlab (utilisé pendant les TD et les TP)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

1. Comprendre et analyser l'intérêt d'une structure de commande en boucle fermée.
2. Modéliser le comportement d'un système dynamique par une représentation temporelle (représentation d'état) ou éventuellement fréquentielle :
 - Faire le choix d'un modèle (ou d'un ensemble de modèles) de comportement adapté au regard de l'objectif de commande et/ou d'analyse (linéarisation, réduction de modèle, ...).
 - Valider la pertinence du modèle (ou de l'ensemble de modèles proposé)
3. Synthétiser des lois de commande sous forme de représentation d'état complétée si besoin par la synthèse d'un observateur.
 - Analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges.
 - Choisir et synthétiser le correcteur adapté.
 - Déterminer un observateur permettant d'estimer les grandeurs d'état non mesurées.
 - Valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus.
 - Analyser la performance et la robustesse de la loi de commande
4. Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental).
5. Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu de Travaux Pratiques).

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences validées :

Compétence C1 "Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques", évaluée dans ce cours :

- "Modéliser le comportement d'un système dynamique " s'inscrit dans C1.2 "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème"
- "Analyser le comportement temporel et/ou fréquentiel d'un système et les effets du bouclage" s'inscrit dans C1.1 "Etudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines"
- Déterminer une loi de commande par retour d'état (complétée si besoin par la synthèse d'un observateur), afin de satisfaire un cahier des charges temporel et/ou fréquentiel" s'inscrit dans C1.4 "Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe"
- "Valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus" s'inscrit dans C1.3 "Résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation"

Compétence C2 "Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers", évaluée dans ce cours :

- "Modéliser le comportement d'un système dynamique" et "Analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges" nécessitent une appropriation du domaine d'application considéré et de ses contraintes, et s'inscrit donc dans C2.2 "Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines" et C2.3 "Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires"
- "Analyser la performance et la robustesse de loi de commande" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"
- "Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental)" s'inscrit dans C2.4 "Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique"
- Enfin "Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu d'Études de Laboratoire)" s'inscrit dans C7.1 "Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée". Cette compétence ne sera pas évaluée dans ce cours.

Évaluation des acquis d'apprentissage

Les acquis d'apprentissage concernant C1 et C2 seront évalués dans les situations suivantes :

- 2 séances de travaux pratiques permettront d'évaluer l'ensemble de ces acquis d'apprentissage en étant confronté à un procédé réel à modéliser, analyser et piloter. Ce mode pédagogique permet en particulier de confronter les élèves à l'expérimentation et à la validation de la démarche de modélisation et de synthèse.
- Un examen final confrontera également les élèves à une problématique réelle d'un procédé qu'il conviendra de modéliser, analyser et piloter. L'accent y sera mis moins sur les aspects expérimentaux que sur la capacité à satisfaire une problématique industrielle.

La compétence C2.4 sera plus spécifiquement travaillée lors des séances de travaux pratiques, ainsi que lors du travail personnel (nécessitant la mise en œuvre du procédé via un logiciel de simulation) effectué entre les deux séances de travaux pratiques.

La compétence C7 ne sera pas évaluée, mais néanmoins travaillée par l'intermédiaire du compte-rendu remis à l'issue des séances de travaux pratiques.

2CC3000 – Optimisation

Responsables : **Jean-Christophe Pesquet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **31,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours explorera divers aspects fondamentaux de l'optimisation, aussi bien continue que discrète.

Les notions suivantes seront abordées et mises en œuvre pratiquement : formulation des problèmes d'optimisation, conditions d'existence de minimiseurs globaux et locaux, convexité, dualité, multiplicateurs de Lagrange, méthodes du premier ordre, programmation linéaire, programmation linéaire entière, approche « branch and bound » (séparation-évaluation), introduction à l'optimisation stochastique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Notions de base en analyse, calcul différentiel et probabilités (cours convergence, intégration et probabilité), bonne maîtrise d'un environnement de programmation.

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Bases de l'optimisation
 - 1.1 Introduction
 - 1.2 Existence de minimiseurs
 - 1.3 Convexité
 - 1.4 Quelques algorithmes itératifs
 - 1.5 Dualité
2. Programmation linéaire
3. Programmation linéaire entière
4. Méthode des multiplicateurs de Lagrange
5. Optimisation stochastique

Déroulement, organisation du cours

L'enseignement combine cours magistraux et TD/TP.

Il se répartit en 21 heures de cours, 7.5 heures de TD et 3 heures d'examen final.

Les parties 3 et 5 du cours feront l'objet d'un auto-apprentissage avec un processus d'évaluation adéquat.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation des acquis se fera à la fois par contrôle continu (40%) et par l'examen écrit final (60%). En cas d'absence justifiée aux contrôles intermédiaires, les notes de ces derniers sont remplacées par celle du contrôle final.

Support de cours, bibliographie

D. P. Bertsekas, Nonlinear Programming, 3rd Edition. Athena Scientific, 2016. ISBN:978-1-886529-05-2
H.H. Bauschke and P. L. Combettes, Convex Analysis and Monotone Operator Theory in Hilbert Spaces, 2nd Edition. Springer, 2017. ISBN: 978-3-319-48311-5

Moyens

Outils logiciels nécessaires : MATLAB, Python,

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves seront capables de :

- Traiter une large gamme de problèmes concrets d'optimisation se posant dans un contexte scientifique ou industriel.
- Formuler de façon adéquate un tel problème et de proposer une solution numérique à l'aide des méthodes existantes
- Valider et l'interpréter la solution du point de vue du problème initial.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétence de niveau intermédiaire en optimisation à la fois en mathématiques (C1) et en algorithmique (C6)

2CC3005 – Optimisation - DUAL

Responsables : **Charles Soussen**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **36,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'optimisation numérique est utile dans beaucoup de domaines, comme en mathématiques, en ingénierie, en économie, en finance, etc. Par exemple, les problèmes de gestion de stock, d'allocation de ressources, des contrôles de structures mécaniques et d'analyse de données peuvent tous être abordés comme des problèmes d'optimisation. Bien que ces problèmes soient de nature variée, ils peuvent être formulés comme l'optimisation d'une fonction coût sur un certain domaine et sous un certain nombre de contraintes. De façon notable, il existe beaucoup de méthodes d'optimisation en fonction de la structure du problème à traiter.

Ce cours présente un tour d'horizon des approches et algorithmes classiques d'optimisation. Il fournit les connaissances de base qui permettront aux élèves de traiter les divers problèmes d'optimisation qu'ils seront susceptibles de rencontrer, et de les aider à choisir l'algorithme adéquat. Le cours couvre essentiellement les algorithmes d'optimisation locale, avec une brève introduction à l'optimisation globale. Les méthodes couvrent l'optimisation locale sans contrainte (algorithmes de type gradient, gradient conjugué), l'optimisation locale sous contraintes, les méthodes des moindres carrés et l'optimisation discrète.

Prérequis

Pas de prérequis spécifique. Les élèves doivent avoir des connaissances de base en algèbre linéaire et en calcul matriciel.

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Optimisation locale sans contrainte : algorithmes du gradient, du gradient conjugué, de Newton et quasi-Newton
2. Moindres carrés
3. Optimisation sous contrainte
4. Introduction à l'optimisation globale et discrète

Déroulement, organisation du cours

Alternance régulière entre cours et TD. Les TD couvrent les aspects calculatoires (résolution de systèmes KKT notamment) et l'optimisation avec le logiciel Matlab

Organisation de l'évaluation

Examen final écrit (2 heures, 100 % de la note)

L'examen couvre tous les sujets abordés en cours et en TD, avec un focus sur les algorithmes d'optimisation locale : connaissance des algorithmes, calculs simples, connaissance pratique de l'appel aux routines d'optimisation (dans ce cas, l'aide de la routine matlab sera donnée) avec du pseudo-code matlab, interprétation des résultats de simulation numérique. Une connaissance approfondie des méthodes d'optimisation globale et discrète n'est pas demandée. L'évaluation couvre également le contenu des TD.

Aucun document n'est autorisé. L'utilisation d'ordinateurs et de calculatrice est interdite. Les téléphones mobiles doivent être éteints.

Support de cours, bibliographie

- J. Nocedal and J. S. Wright, Numerical optimization, 2nd edition, Springer Verlag, New York, Jul. 2006.
- R. Fletcher, Practical Methods of Optimization, 2nd edition, Wiley, 2000
- A. Björck, Numerical Methods for Least Squares Problems, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Apr. 1996.
- R. Horst, P. M. Pardalos, and V. T. Nguyen, Introduction to Global Optimization, 2nd edition, Springer, Dec. 2000.

Moyens

- Transparents complets du cours
- Documentation Matlab (optimtool)
- Bibliographie

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Ce cours introduit les principaux concepts et les principales méthodes d'optimisation numérique. Il est centré sur les méthodes d'optimisation locale, avec une esquisse des principes généraux sur lesquels reposent les méthodes d'optimisation globale.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

L'examen permet de valider les compétences C1 et C6.

A l'issue du cours, les étudiants doivent posséder une bonne connaissance des principaux algorithmes et doivent être capables de mener à bien des calculs simples : calculs de gradients, de hessiens, résolution de problèmes d'optimisation simples en exprimant les conditions KKT et en résolvant le système associé. De plus, les élèves doivent posséder une bonne connaissance pratique (appel aux solvers d'optimisation sous Matlab) et doivent savoir interpréter les résultats numériques.

COURS HORS SEQUENCE

2SL1000 – Economie

Responsables : **Pascal DA COSTA**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Sans doute avez-vous déjà lu la presse économique et entendu parler de variables et de concepts économiques (moteurs de la croissance, relation inflation - chômage, types de concurrences, Banque centrale européenne et autres institutions économiques, etc.) : il est maintenant temps de définir clairement tout cela et de saisir enfin les débats économiques dans toute leur complexité. Ce faisant, vous rencontrerez tous, au moins une fois dans votre scolarité, l'avis des économistes sur les grands problèmes et les débats qui traversent notre société.

L'objectif premier de ce cours d'introduction à l'analyse économique est donc de fournir les concepts de base nécessaires à la compréhension et l'analyse du monde économique. Chaque sujet ou enjeu économique (cf. le plan du cours) sera d'abord présenté à l'aide de faits empiriques, de statistiques historiques et récentes, et sera ensuite expliqué à l'aide de théories économiques, pouvant parfois s'opposer (vous verrez que ces controverses théoriques sont assez courantes en économie).

Ce cours a également pour objectif de vous former aux enjeux de la transition écologique à travers ses aspects économiques et les concepts du domaine (coûts externes, coût de l'inaction, politiques incitatives, croissance et développement, etc.) : aussi, les objectifs de développement durable de l'ONU abordés dans ce cours sont les : 7 Energie, 8 Croissance et emploi, 9 Industrie et Innovation, 10 Inégalités, 12 Consommation et production durable, 13 Climat.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

1- Histoire de la pensée économique : Modélisation mathématique des faits économiques. Validation par l'économétrie.

2- Microéconomie : Structures et réglementations des marchés. Externalités positives et négatives : l'innovation et la pollution. Discrimination par les prix. Théorie des jeux.

3- Économie monétaire : De l'économie de l'endettement à l'économie des marchés financiers. Le rôle de la monnaie. Le rôle de la Banque centrale et des banques commerciales dans le financement de l'économie.

4- Fluctuations et politiques économiques : Politique monétaire, politique fiscale. Le chômage (les déséquilibres).

5- Économie internationale et mondialisation : Commerce international : réglementation du commerce mondial, théories du commerce international. Finance internationale : taux de change, balance des paiements, systèmes monétaires et financiers internationaux (le modèle IS-sans LM en économie ouverte).

6- Économie de la croissance, innovations, inégalités. Economie du développement durable, du climat.

Déroulement, organisation du cours

10,5 heures de conférences (CM)
9 heures de TD
2 contrôles intermédiaires obligatoires (en TD)
2 heures d'examen final

ou Classes intégrées (cours + TD) (places limitées)

Cours en français ou en anglais (au choix).

Organisation de l'évaluation

- 1 à 2 contrôles intermédiaires (CIA et CI2) : 10 à 20% de la note finale
- 1 Contrôle final (CF) : sans document, 2h00 : 80% or 90% (si un seul contrôle intermédiaire) de la note finale

Support de cours, bibliographie

Bibliographie / supports :

- Polycopié de cours
- Begg, Fischer, Dornbusch (2002) Macroéconomie, Dunod.
- Begg, Fischer, Dornbusch (2002) Microéconomie, Dunod.
- Blanchard, Cohen (2020) Macroéconomie, Pearson Education.
- Burda, Wyplosz (2014) Macroéconomie : une perspective européenne, Boeck Université.
- da Costa (2013) Etats-Unis, Europe, Chine : des Etats au coeur des crises économiques et financières mondiales, l'Harmattan.
- Mucchielli, Mayer (2010) Economie internationale, Dalloz.
- Picard (2011) Eléments de microéconomie, Montchrestien.
- Stiglitz (2014) Principes d'économie moderne, De Boeck Université.

Moyens

Equipe enseignante dirigée par **Pascal da Costa**.

Cours en français ou en anglais.

Classes intégrées ouvertes également (cours et TD en français dans une même classe pour une centaine d'élèves).

NB : les cours en français ou en anglais sont organisés de la façon suivante : cours d'1h30 en amphi., suivi d'un TD en présentiel d'1h30.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Connaître les théories économiques récentes, leurs objectifs et leurs limites principales ;
- Connaître les processus pour générer des connaissances en analyse économique, dans les domaines de la concurrence, du financement de l'économie, de la monnaie, des politiques économiques et du commerce international, du développement durable, etc. ;
- Développer et mettre en œuvre des modèles mathématiques simples en micro et macroéconomie.
- Rédiger une rédaction en économie

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C3.1 Observer et s'autoriser à critiquer le monde tel qu'il est, douter, dépasser les injonctions, remettre en cause ses hypothèses de départ, s'autoriser à apprendre dans ses échecs, diagnostiquer
- C4.1 Identifier et (re)formuler le besoin de création de valeur du client ainsi que les enjeux et contraintes associés. Identifier et intégrer les autres parties prenantes, internes et externes ainsi que les autres dimensions non évoquées initialement (techniques, économiques, humaines, etc.)
- C5.3 Analyser les enjeux globaux et/ou locaux à l'international et adapter des projets ou solutions à ceux-ci
- C9.2 Analyser et anticiper les conséquences possibles des organisations et modèles économiques des structures auxquelles on contribue

2SL1100 – Climat et controverses

Responsables : **Didier Paillard, Didier Clouteau, Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **37,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours "Climat et controverses " fait suite au cours d'année 1 " Limites planétaires et biodiversité" ayant donné les fondamentaux sur le climat et les limites planétaires. L'objet de cette seconde activité pédagogique est d'aborder des controverses associées à différents aspects de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique. Il s'agit donc d'initier les élèves-ingénieur à des problématiques sociétales et de débat public liés au changement climatique d'origine anthropique sous la forme d'ateliers de controverse.

Après des compléments scientifiques sur les modèles de prédiction climatique et l'interaction entre le climat et la biosphère, les élèves travailleront sur la semaine sur une controverse qui se terminera par une simulation d'un débat public regroupant différentes parties prenantes.

Ce cours se conclura par l'intervention de deux experts internationaux sur chacune des deux controverses abordées par les élèves.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Pas de prérequis.

Plan détaillé du cours (contenu)

Au cours de chaque semaine, les séances se répartissent comme suit :

Séances 1 et 3 en amphi, conférences thématiques. Les autres séances sont des Ateliers en petites classes de 30 étudiants, 2 encadrants par classe : 1 sciences du climat, 1 sciences humaines et sociales

Dans chaque classe, 30 élèves répartis en 6 groupes de 5 étudiants, chaque groupe prend le rôle d'une partie prenante de la controverse.

- Séance 1- Amphi : Modèles de climat et outils de de prévision (Climate Q&A) : Massa Kageyama
- Séance 2- 1h30 Atelier : Présentation, mise en place, introduction
- Séance 3 – 1h30 Amphi : Interaction Climat biosphère (Nathalie de Noblet)
- Séance 4 – 1h30 Atelier, Qu'est-ce qu'une controverse ?
Exploration approfondie du corpus sur les controverses, répartition des ressources entre les 6 groupes et analyse suivant la technique de l'arpentage. Travail en autonomie des étudiant·es, visionnage de vidéo, podcast,
- Séance 5 – 1h30 Atelier : Analyse de la controverse
 - Identifier la dynamique de la controverse : sujets/problématiques, nœuds, points de discussion/opposition/frictions, corpus scientifiques (pour/contre)
 - Analyse systémique : scientifique et analyse des enjeux présents/jeux de pouvoir des différents acteurs/groupes d'acteurs identifiés, en fonction de la situation étudiée (spécificités du lieu, territoire, économie, politiques, collectivités locales et territoriales, activités, données sociales)
 - Rendu : fiche synthétique : dynamiques/nœuds de la controverse, aspects scientifiques et techniques,
 - Analyse des enjeux au regard des spécificités de la situation/incertitudes
 - Identifier connaissances disponibles, en cas d'incertitudes, hypothèses à expliciter.

- Séance 6 - 1h30 Atelier : Suite et fin de l'analyse de la controverse, finalisation du rendu.
- Séance 7- Atelier : préparation au débat public
 - Une fiche synthétique, anticipation des arguments et positions des autres groupes
 - QCM (individuel en fin de séance) sur les différents aspects de la controverse traiter.
- Séance 8- Atelier : débat réunion public, retour d'expérience analytique
 - Débat : simulation d'une réunion publique réunissant tous les acteurs
 - Retour d'expérience réflexif individuel, à partir du débat et de tous les travaux élaborés collectivement au cours des séances d'atelier, et en s'appuyant sur les données des deux conférences de la semaine
- Séance 9 : Conférences de clôture.

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux : 3h

Ateliers : 9h

Conférence : 2h00

Examen : 1h00

Organisation de l'évaluation

QCMs intermédiaire et final

Evaluation des groupes par les animateurs en prenant en compte en particulier la participation.

Support de cours, bibliographie

- Diaporama du cours
- Support de cours écrit
- Sur le changement climatique : les rapports du GIEC (notamment les « résumés pour décideurs ») des groupes 1 ("climat": <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>), 2 ("impacts": <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>) et 3 ("mitigation/adaptation": <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>). Le rapport de synthèse 2023 (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>)
- Sur le climat et les recherches associés : voir les liens de l'IPSL : <https://www.ipsl.fr/Pour-tous>

Moyens

Responsable du cours : Cynthia Colmellere, Didier Paillard et Didier Clouteau

Equipe pédagogique (LSCE) : Masa Kageyama, Nathalie de Noblet et une équipe d'animatrices et animateurs ayant un bagage en sciences du climat ou en sciences humaines et sociales.

Cours en français (ressources en anglais disponibles)

Travaux dirigés en français (éventuellement en anglais pour certains groupes).

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cette unité d'enseignement, les élèves auront :

- Été exposé à un corpus porteur de la complexité de controverses pratiques lien des enjeux scientifiques, économiques et sociaux.
- Été amenés à changer de point de vue en prenant la place de parties prenantes à une controverse
- Expérimenté une forme de débat public avec comme objectif d'aboutir à un consensus.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.

C9.4 Analyser et anticiper les conséquences possibles de ses choix et de ses actes dans le respect de soi-même, d'autrui et de l'environnement

2SL3000 – Philosophie

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **16,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction à la philosophie. Il s'articule autour de différentes branches de la philosophie, notamment la philosophie morale et politique et la philosophie des sciences. Cet enseignement poursuit quatre objectifs.

1. Introduire la discipline à travers son histoire, les grandes questions qu'elle aborde et les types de réponses qu'elle propose,
2. Comprendre et questionner la démarche scientifique à partir de connaissances en philosophie des sciences et épistémologie,
3. Initier et approfondir une réflexion sur le progrès scientifique et technique en lien avec le progrès social.
4. A partir de fondamentaux en philosophie morale et politique, proposer des ressources pour une réflexion sur l'éthique professionnelle (éthique des ingénieurs) et personnelle.

Les exemples et les situations traitées sont pris dans différents domaines en lien avec les enjeux de société traités dans le cursus dès la première année. Ces exemples pourront être en lien avec l'actualité scientifique, technologique, politique et sociale. Cette variété de situations et de contextes a pour but de faciliter la compréhension et l'utilisation des concepts étudiés.

Chaque partie comprend une base théorique et des développements à partir d'exemples issus de l'histoire des sciences et des techniques et de l'histoire politique et sociale.

Principales notions abordées

- Connaissance, ignorance
- Vérité, preuve scientifique
- Progrès technologique/progrès social
- Pouvoir, démocratie, responsabilité
- Ethique

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Chaque séance de cours dure 1h30, les séances sont regroupées en séquences de 3h

Déroulement, organisation du cours

Ce cours se déroule sous forme de conférences.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation est un travail individuel (dissertation), durée : 3H

Support de cours, bibliographie

Chaque intervenant transmettra une bibliographie relative à sa partie de cours.

Moyens

Les cours sont donnés sous forme de conférences par des spécialistes :

Gif : M. Girel et M. Klein

Rennes : M. Calori, Mme Gueguen

Metz Mme Aubert

Attention, les contenus et du déroulement du cours et les sujets d'examen diffèrent d'un campus à l'autre.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Comprendre des situations d'innovation, d'incertitude, de controverses, de crise, de mutations économiques, technologiques à l'aide d'une analyse critique des savoirs scientifiques.
- Identifier, dans ces situations, les cadres normatifs, les visions du monde, les enjeux économiques, éthiques et sociétaux des différents acteurs concernés (collaborateurs, citoyens, scientifiques ou institutionnels), et par conséquent leurs positions respective
- Savoir concilier, articuler et intégrer dans ses analyses, ses décisions et ses actions, les savoirs techniques et scientifiques (« durs ») et les savoirs traitant les dimensions humaines, sociales et culturelles.

2SL4000 – Sociologie et droit du travail

Responsables : **Cynthia Colmellere, Natacha Chetcuti, Éléonore MOUNOUD**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours se compose de deux parties : droit du travail et sociologie du travail

1. La première partie du cours est une introduction au **droit du travail**, axée sur la question **des contrats de travail**. Cette partie du cours donne les bases nécessaires pour comprendre la logique juridique des contrats de travail, leur finalité, leur subtilité, en appréhender les risques judiciaires.

2. La deuxième partie du cours est une introduction à la **sociologie du travail**. Ce cours aborde le travail comme un enjeu structurant de la société. Il a pour objectif de permettre aux élèves de développer une **perspective critique sur le travail actuel et son futur**, en tant que futurs ingénieurs et citoyens. Il se concentre sur les **transformations actuelles du travail** : l'entrée dans une société de services, le creusement des inégalités, les développements technologiques dont les outils numériques et les intelligences artificielles génératives.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Cours de gestion d'entreprise, jeux d'entreprises

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours de droit du travail traite des contrats de travail à travers des vidéos et études de cas : fondamentaux des contrats de travail, types de contrats de travail (CDI, CDD, apprentissage), gestion quotidienne des contrats (temps de travail, faute et sanction des employés, procédures disciplinaires), fin des contrats (démission, licenciement).

Le cours de sociologie du travail s'appuie sur des parties de cours magistrales, des situations réelles. Il traite des points suivants :

- Définitions du travail,
- Frontières du travail et du temps
- Inégalités sociales
- Identités professionnelles
- Automatisation du travail et travail de plate-forme.

Déroulement, organisation du cours

Le MOOC est disponible pour une durée limitée, et la participation dans les classes d'échange avec l'enseignant est obligatoire. Il y aura des questions à choix multiples (MCQ) à la fin des sessions.

Le sujet est la sociologie du travail, qui comprend des conférences et des études de cas (TDS). Le cours sera dispensé en français, mais des documents tels que des cours, des documents et des textes seront disponibles en français et en anglais.

Les interactions pendant les séances en cours et les TD avec les enseignants peuvent être menées en anglais, et il y aura un groupe TD offert en anglais.

Organisation de l'évaluation

Les modalités d'évaluation proposées sont les suivantes : QCM individuels (40% de la note). Évaluation individuelle finale : examen sur table de 2h, sans documents, questions de cours et étude de cas, 60 % de la note finale.

Support de cours, bibliographie

Avril, Christelle, Cartier, Marie., Serres, Delphine. 2010. Enquêter sur le travail. Concepts, méthodes, récits, Paris, La Découverte ; Benanav, Aaron. 2022. L'automatisation et le futur du travail. Éditions Divergences.; Bernard, Sophie. 2020. Le nouvel esprit du salariat : rémunérations, autonomie, inégalités. Paris, Presses universitaires de France ; Carbonell, Juan Sebastián. 2022. Le futur du travail. Paris, Éditions Amsterdam.; Durkheim, Émile. 1893. *De la Division du travail social*. Paris, Presses universitaires de France ; Ferreras, Isabelle, Julie Battilana, Méda, Dominique. 2020. Le manifeste travail : démocratiser, démarchandiser, dépolluer. Paris, Éditions du Seuil ; Graeber, David. 2018. Bullshit jobs. Paris, Les Liens qui libèrent ; Lallement, M., Le travail. Une sociologie contemporaine. Paris, Gallimard, 2007 ; Méda Dominique, Vendramin Patricia. 2013. Réinventer le travail. Paris, Presses universitaires de France ; Monchatre, Sylvie. 2021. Sociologie du travail salarié. Armand Colin.; Mouhoud, El Mouhoub. 2017. Mondialisation et délocalisation des entreprises. Paris, La Découverte, « Repères » ; Simonet, Maud. 2018. Travail gratuit : la nouvelle exploitation ? Paris, Textuel ; Stroobants, Marcelle. 2010. Sociologie du travail. 3e édition. Paris, Armand Colin ; Ughetto, Pascal. 2018. Les nouvelles sociologies du travail : introduction à la sociologie de l'activité. Louvain-la-Neuve, De Boeck supérieur.

Moyens

Droit du travail : MOOC avec équipe enseignante et pédagogique, supports disponibles, classes en ligne avec l'enseignante.

Sociologie du travail : équipe enseignante pour les cours et les Tds, supports (slides, textes, vidéos) mis à disposition, en français et en anglais.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Elaborer et mettre en œuvre des grilles d'analyses pour décrire et comprendre les situations de travail qui se produisent au sein des organisations.
- Analyser et interpréter des situations de travail pour agir de manière adaptée, tout en considérant les dimensions juridiques, sociales et axiologiques associées à ces situations.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C9

2SL5007 – Ateliers Pratiques Ingénieur - API - 2A

Responsables : **Christophe Laux**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **18,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours s'inscrit dans la suite du cours 1SL5000. Il vise à ancrer les compétences abordées dans les ateliers de première année et à en aborder de nouvelles, de façon à couvrir les bases des compétences attendues d'un ingénieur CentraleSupélec : travail en équipe, gestion de projet, communication, approche de problèmes complexes, créativité, leadership, éthique, aisance dans un environnement interculturel.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5, SG6, ST7 et SG8

Prérequis

Semestre 7 : suivre un projet de S7

Semestre 8 : suivre un projet de S8

Plan détaillé du cours (contenu)

Compétences-clés de l'ingénieur :

- Travail en équipe : s'organiser, décider, animer en équipe ; différents rôles des membres de l'équipe ; influence de la personnalité sur la performance de l'équipe
- Communication orale : augmenter son impact en communication orale, prendre la parole en public, structurer une synthèse, construire une présentation
- Approche de la résolution de problèmes complexes : savoir bien les poser, gérer l'incertitude, robustesse des hypothèses, ordres de grandeur
- Créativité : méthodes de créativité de groupe
- Leadership et connaissance de soi
- Éthique : agir avec éthique, comprendre les conséquences de ses choix

API 8 : Coaching projet

API 9 : Journée Transition Ecologique

API 10 : Leadership

API 11 : Ethique

API 12 : Coaching projet à la carte

API 13 : Effective communication

Déroulement, organisation du cours

- Études de cas en équipe
- Mises en situation
- Forte participation des élèves demandée
- Mise en œuvre des apports sur un projet réel
- Travail inter ateliers et notes de bilan

Organisation de l'évaluation

La présence aux ateliers est obligatoire car toute absence pénalise l'apprentissage de l'élève et handicape le groupe.

La participation de chaque élève durant les ateliers est évaluée car c'est une condition nécessaire à l'apprentissage des compétences.

Les travaux, individuels ou en équipe, demandés pendant les ateliers ou entre les ateliers sont évalués. Le respect des délais intervient dans l'évaluation.

Les travaux en équipe donnent lieu à une évaluation collective pour l'équipe (sauf cas flagrant de retrait de l'équipe).

Les notes de bilan semestrielles sont évaluées sur la base de leur remise dans le délai prévu et de leur qualité de réflexion personnelle, sans jugement sur les avis exprimés dès lors qu'ils sont argumentés.

Les éventuels mini-quiz en début d'atelier, portant sur les apports des ateliers précédents, seront évalués.

La note de chaque semestre sera basée sur :

- Productions lors des cas pratiques en équipe
- Travaux inter-ateliers (TIA) : travail effectué, qualité du travail, sérieux des bilans de synthèse
- Qualité de participation en atelier
- Résultat de l'éventuel mini-quiz

Une absence injustifiée (ABI) conduit à une pénalité de 2 points par demi-journée d'absence. La pénalité est ramenée à 1 point si l'étudiant participe à la session de rattrapage.

La consolidation semestrielle de ces travaux se traduit en validation de jalon des compétences concernées.

Moyens

Ateliers de 30 à 40 élèves, animés par deux enseignants

Travail sur cas pratiques d'ingénieur

Mises en situation

Échanges en groupes et avec des intervenants extérieurs

Conférences

Analyses de films et vidéos

Un lien étroit avec le projet de deuxième année permet d'appuyer les apports théoriques sur les expériences concrètes des élèves en projet

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève aura assimilé les bases de :

- Travail en équipe
- Communication orale, pour convaincre
- Résolution de problèmes complexes
- Techniques de créativité
- Leadership
- Action éthique

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin du cours, l'élève aura poursuivi sa progression dans les compétences suivantes :

- Être proactif, prendre des initiatives, proposer des solutions nouvelles (C3)
- Penser client et savoir identifier la valeur apportée (C4)
- Savoir convaincre (C7)
- Mener un projet et travailler en équipe (C8)
- Agir de façon éthique (C9)

2SL7007 – Ateliers Pratique Professionnelle - APP - 2A

Responsables : **Christophe Laux**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **20**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **0,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours vise à poursuivre l'accompagnement des étudiants dans la découverte du métier d'ingénieur et dans la construction de leur projet professionnel

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5, SG6, ST7, et SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours comprend :

- Un atelier de 3h pour construire son CV, une lettre de motivation ou un pitch
- Un atelier de 1h30 pour s'entraîner aux entretiens de recrutement (stage, césure, ...)
- Deux entretiens individuels avec un des enseignants-accompagnateurs
- Deux table -rondes métier

Déroulement, organisation du cours

- Travail en groupe
- Entretiens individuels
- Notes de synthèses ou de prise de recul individuelles
- Échange avec des représentants d'entreprises

Organisation de l'évaluation

La présence active aux ateliers et aux entretiens individuels est obligatoire.

Au global, le cours est évalué en "pass or fail".

Pour valider les APP de chaque semestre, les conditions suivantes devront être toutes respectées :

- Être présent aux ateliers en collectif (projet professionnel)
- Avoir préparé et effectué l'entretien individuel de chaque semestre
- Avoir suivi 2 tables rondes métiers (TRM).

Un rapport final sur le projet professionnel pourra être demandé.

Support de cours, bibliographie

Documents fournis sur Edunao

Moyens

Ateliers de 30 à 40 élèves, guidés par deux enseignants-accompagnateurs

2SL8000 – Projet S7

Responsables : **Laurent Bourgois**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **90**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **48,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Un projet est une modalité de travail collective utilisée pour appréhender des problèmes complexes ouverts. Son efficacité dépend des compétences individuelles de chacun et des pratiques de fonctionnement de l'équipe ; l'objectif étant d'aboutir à un produit final pour un commanditaire, en un temps donné. Les projets proposés dans la formation ingénieur permettent l'apprentissage de cette modalité par des mises en situation de plus en plus complexes. L'objectif de cette activité est de mettre en oeuvre collectivement les différentes étapes d'un projet, depuis la définition du besoin jusqu'à la restitution du produit, pour aboutir à un livrable à destination d'un client. Les projets doivent conduire à une réalisation ambitieuse, que l'on ne pourrait pas atteindre en refaisant ce que l'on sait déjà faire.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5 et SG6

Prérequis

Gestion de projets, Ateliers API.

Plan détaillé du cours (contenu)

Les projets s'étendent sur deux séquences (ST5 et SG6). Ils suivent les phases habituelles d'un projet :

- Définir et cadrer le projet.
- Structurer les actions.
- Définir les rôles et les responsabilités.
- Mesurer les avancements et reboucler les actions.
- Monter en compétences techniques et organisationnelles.
- Communiquer ses réalisations.
- Capitaliser sur l'expérience acquise.

Déroulement, organisation du cours

L'avancement du projet s'accompagne d'interactions nombreuses et variées avec l'environnement du projet. Il repose sur des actions individuelles et collectives. On retrouvera :

- Des temps collectifs à l'échelle du pôle pour la transmission de bonnes pratiques et de connaissances ;
- Un travail personnel à définir au sein du groupe ;
- Un travail collectif d'alignement et de pilotage du groupe projet.

Les encadrants suivront le projet régulièrement pour s'assurer qu'aucun blocage n'apparaisse et pour valider les démarches entreprises.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation porte sur la participation continue en cours d'année, la qualité du rapport écrit et les présentations orales réalisées au cours du projet. Ces contributions seront regardées sous quatre angles différents : l'implication, le contenu et les livrables, la communication, et le fonctionnement de l'équipe en mode projet. Un projet validé implique que l'étudiant ait validé au moins 3 compétences sur 4 parmi l'ensemble {C3, C4, C7, C8}.

Moyens

Les projets sont menés par groupes de 5 étudiants. Chaque projet est rattaché à un pôle où sont rassemblés les projets de même nature. Les pôles mettent à disposition des ressources d'encadrement et des moyens logiciels et matériels. Sauf exceptions, les élèves restent affectés dans le pôle projets dans lequel ils étaient au semestre S6. Ils pourront continuer de travailler sur le même sujet ou démarrer un nouveau projet en accord avec les responsables du pôle. Il n'y a donc pas de campagne d'affectation en ligne. Les étudiants qui n'étaient pas rattachés à un pôle projets au semestre S6 peuvent demander à rejoindre un pôle. Ils pourront compléter des équipes déjà existantes ou initier un nouveau projet.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable :

- D'interagir avec un client à distance et en présentiel (discussion téléphonique, échange de messages électroniques, présentation orale, conduite de réunion d'avancement, etc.) ;
- D'identifier la valeur de son travail dans la résolution d'un problème complexe ;
- D'organiser une équipe pour produire une solution originale et de valeur ;
- De prévoir les conséquences humaines, sociales et environnementales de ses actions, et de déterminer le champ de ses responsabilités ;
- De présenter un travail scientifique à l'écrit et à l'oral (en particulier, la bonne gestion des ressources bibliographiques et une communication claire et rigoureuse des réalisations) ;
- De produire un livrable à grande valeur ajoutée en lien avec des parties prenantes variées.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

De manière générale, un projet abouti est un projet où les élèves ont :

- Bien posé le problème et apporté des solutions qui créent de la valeur (il y a un avant et un après projet pour le client) ;
- Apporté un minimum d'innovation ou de créativité pour répondre au problème de façon novatrice ;
- Su fonctionner en équipe et manager le projet avec des ressources ;
- Su convaincre dans leur communication orale ou écrite ;
- Été capables de prendre du recul sur les aspects éthiques.

Nous retrouvons donc tout au long du projet les compétences :

- C3 : Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique.
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients.
- C7 : Savoir convaincre.
- C8 : Mener un projet, une équipe.
- C9 : Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.

Selon la nature du projet, les compétences C1, C2, C5 et/ou C6 pourront également être ciblées.

2SL8100 – Projet S8

Responsables : **Laurent Bourgois**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **200**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **108,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Un projet est une modalité de travail collective utilisée pour appréhender des problèmes complexes ouverts. Son efficacité dépend des compétences individuelles de chacun et des pratiques de fonctionnement de l'équipe ; l'objectif étant d'aboutir à un produit final pour un commanditaire, en un temps donné. Les projets proposés dans la formation ingénieur permettent l'apprentissage de cette modalité par des mises en situation de plus en plus complexes. L'objectif de cette activité est de mettre en œuvre collectivement les différentes étapes d'un projet, depuis la définition du besoin jusqu'à la restitution du produit, pour aboutir à un livrable à destination d'un client. Les projets doivent conduire à une réalisation ambitieuse, que l'on ne pourrait pas atteindre en refaisant ce que l'on sait déjà faire.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7 et SG8

Prérequis

Gestion de projets, Ateliers API.

Plan détaillé du cours (contenu)

Les projets s'étendent sur deux séquences (ST7 et SG8). Ils suivent les phases habituelles d'un projet :

- Définir et cadrer le projet.
- Structurer les actions.
- Définir les rôles et les responsabilités.
- Mesurer les avancements et reboucler les actions.
- Monter en compétences techniques et organisationnelles.
- Communiquer ses réalisations.
- Capitaliser sur l'expérience acquise.

Déroulement, organisation du cours

L'avancement du projet s'accompagne d'interactions nombreuses et variées avec l'environnement du projet. Il repose sur des actions individuelles et collectives. On retrouvera :

- Des temps collectifs à l'échelle du pôle pour la transmission de bonnes pratiques et de connaissances ;
- Un travail personnel à définir au sein du groupe ;
- Un travail collectif d'alignement et de pilotage du groupe projet.

Les encadrants suivront le projet régulièrement pour s'assurer qu'aucun blocage n'apparaisse et pour valider les démarches entreprises.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation porte sur la participation continue en cours d'année, la qualité du rapport écrit et les présentations orales réalisées au cours du projet. Ces contributions seront regardées sous quatre angles différents : l'implication, le contenu et les livrables, la communication, et le fonctionnement de l'équipe en mode projet. Un projet validé implique que l'étudiant ait validé au moins 3 compétences sur 4 parmi l'ensemble {C3, C4, C7, C8}.

Moyens

Les projets sont menés par groupes de 5 étudiants. Chaque projet est rattaché à un pôle où sont rassemblés les projets de même nature. Les pôles mettent à disposition des ressources d'encadrement et des moyens logiciels et matériels. En début d'année, les pôles sont présentés lors d'un forum. Les étudiants peuvent demander à rejoindre un pôle. Ils peuvent également proposer de mener un projet personnel avec une équipe constituée qui sera hébergée dans un pôle. Tous les étudiants participent à une campagne d'affectation en ligne. Les responsables de pôle aident à choisir les étudiants les plus motivés. Les élèves qui désirent rester dans le pôle dans lequel ils étaient au semestre S7 sont prioritaires mais devront tout de même passer par la campagne d'affectation.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable :

- D'interagir avec un client à distance et en présentiel (discussion téléphonique, échange de messages électroniques, présentation orale, conduite de réunion d'avancement, etc.) ;
- D'identifier la valeur de son travail dans la résolution d'un problème complexe ;
- D'organiser une équipe pour produire une solution originale et de valeur ;
- De prévoir les conséquences humaines, sociales et environnementales de ses actions, et de déterminer le champ de ses responsabilités ;
- De présenter un travail scientifique à l'écrit et à l'oral (en particulier, la bonne gestion des ressources bibliographiques et une communication claire et rigoureuse des réalisations) ;
- De produire un livrable à grande valeur ajoutée en lien avec des parties prenantes variées.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

De manière générale, un projet abouti est un projet où les élèves ont :

- Bien posé le problème et apporté des solutions qui créent de la valeur (il y a un avant et un après projet pour le client) ;
- Apporté un minimum d'innovation ou de créativité pour répondre au problème de façon novatrice ;
- Su fonctionner en équipe et manager le projet avec des ressources ;
- Su convaincre dans leur communication orale ou écrite ;
- Été capables de prendre du recul sur les aspects éthiques.

Nous retrouvons donc tout au long du projet les compétences :

C3 : Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique.

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients.

C7 : Savoir convaincre.

C8 : Mener un projet, une équipe.

C9 : Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.

Selon la nature du projet, les compétences C1, C2, C5 et/ou C6 pourront également être ciblées.

Grands enjeux de société

Responsables : Didier Clouteau, Cynthia Colmellere, Pascal da Costa, Christophe Laux

Départements de rattachement : SHS, MEP

Langues d'enseignement : ANGLAIS, FRANCAIS

Type de cours : Cours hors séquence

Campus : Paris-Saclay

Année : 2A

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 67.50

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 40,50

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours de deuxième année, par nature interdisciplinaire, croise des approches issues de l'ingénierie, des sciences humaines et sociales, et des sciences du climat. Il propose une lecture systémique des grands enjeux du XXI^{ème} siècle, à moyen et long terme : changement climatique, limites planétaires, érosion de la biodiversité, transitions écologique et énergétique, responsabilité sociale des organisations.

L'ambition du cours est de donner aux élèves les clés pour comprendre et affronter la complexité de ces enjeux d'ordre technique, économique, social et environnemental, en les articulant à différentes échelles (locales, globales), tout en analysant les tensions qu'ils soulèvent.

Il s'agit également de questionner la responsabilité de l'ingénieur, en tant que professionnel et citoyen, et de l'encourager à formuler des questions pertinentes, à mobiliser des savoirs critiques, à déconstruire des idées reçues et à situer son rôle dans ces transitions.

L'enseignement s'appuie sur les interventions d'enseignants-chercheurs et de spécialistes issus de disciplines variées (sciences économiques, sciences du climat, écologie, énergétique et ingénierie) provenant de CentraleSupélec, des centres de recherche de l'Université Paris-Saclay et d'autres institutions de référence. Ces interventions sont conçues pour nourrir le débat et développer l'esprit critique des élèves face aux controverses scientifiques, techniques et politiques contemporaines.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5, SG6

Prérequis

Grands enjeux de société – Première année

Plan détaillé du cours par période

ST5 / SG6 (septembre-janvier)

Introduction aux grands enjeux contemporains, responsabilité sociétale et environnementale des organisations

- Économie (19.50 heures)
 - Avantages et limites de l'indicateur de Produit intérieur brut ;
 - Micro-économie de l'environnement, externalités et régulation des pollutions ;
 - Économie internationale et mondialisation ;

- Économie de la croissance, innovations, inégalités ;
- Économie du développement durable ;
- Macro-économie et politique économique de la transition écologique.

Science du climat, enjeux du changement climatique et de la biodiversité, approche système : Avancé (15 heures)

- Climat & controverses.

Ateliers – Rôle de l'ingénieur dans la transition écologique et sociale (6 heures)

- Journée transition écologique : actions individuelles et collectives ;
- Ateliers sur le vivant et la disponibilité des ressources métalliques.

Déroulement et organisation du cours

- 40.5 heures présentielles réparties pour moitié environ entre cours d'amphithéâtre et travaux dirigés (ou Ateliers).
- Possibilité de classes intégrées selon séances et disponibilités (places limitées).
- Pédagogies interactives/immersives : type Hackaton, bootcamp.

Evaluation : QCM en ligne et contrôles des connaissances à chaque étape du cours (ST5, SG6, ST7, SG8).

Supports et ressources

- Équipe pédagogique : Didier Clouteau (CS), Cynthia Colmellere (CS), Pascal da Costa (CS), Christophe Laux (CS) et vacataires (dont CS et LSCE).
- Polycopiés intégrant les chapitres, supports de cours et les énoncés des travaux dirigés.
- Cours et travaux dirigés en français ou en anglais.
- Bibliographie fournie.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

La démarche générale du cours consiste à examiner les grands enjeux du développement durable au regard d'études scientifiques rigoureuses et récentes, pour :

- Donner et discuter des chiffres clés (de l'état des lieux aux futurs possibles) ;
- Comprendre leur construction (hypothèses et limites des modèles scientifiques sur lesquels ils reposent) ;
- Et aborder les enjeux dans leurs dimensions multiples (locale à mondiale).

Compétences visées et description

C1. Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.

C2. Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.

C3. Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique.

C4. Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients.

C9. Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.

2SL9000 – Sport

Responsables : **Stéphane Blondel**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE**

Langues d'enseignement :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **48,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Contribuer, par la pratique des activités physiques sportives et d'expression (APSA), à la formation du futur **cadre citoyen**.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S7 et S8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Spécifique à chaque APSA

Déroulement, organisation du cours

Situation à résolution de problèmes,

Organisation de l'évaluation

Contrôle en cours de formation Auto-évaluation

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Gérer le couple risque/sécurité
- Intégrer une démarche « éco citoyenne »
- Utiliser une méthodologie de projet collectif.
- Prendre des responsabilités au sein d'un groupe, d'une équipe, d'une association.
- Etre capable de communiquer, être à l'écoute.
- Faire preuve d'innovation et de créativité
- Entrer dans une logique de développement personnel
- Se former tout au long de sa vie

Description des compétences acquises à l'issue du cours

1-

Distinguer les situations à risque perçu (subjectif) des situations à risque réel (objectif) pour soi et autrui (C3-4, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Maîtriser des attitudes permettant d'assurer la sécurité individuelle et collective (C3-4, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Gérer ses émotions en situation d'opposition, de compétition, de représentation ou d'incertitude (C3-4, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

2-

Agir dans le respect de soi et des autres – prendre en compte les différences (handicap, cultures...) (C3-4, C3-7, C5-2, C7-2, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Agir dans le respect de l'environnement, des lieux de pratique et du matériel (C3-4, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

Faire preuve d'empathie, d'altruisme (C3-4, C7-3, C9-1, C9-2, C9-3, C9-4)

3-

Définir des objectifs communs atteignables (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Définir et répartir les rôles au sein du groupe (C3-2, C7-2, C7-3, C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Prendre et accepter des décisions (C3-2, C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Réguler et assurer le suivi d'un projet collectif (C3-2, C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

4-

Accepter les rôles et assumer les responsabilités liées aux missions (y compris financières) (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Utiliser des leviers de motivation d'une équipe, d'un individu (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Former ses pairs (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

5-

Adapter sa communication au groupe, à l'individu, aux non spécialistes... (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Utiliser la communication verbale et non verbale (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Gérer les conflits (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

Faire un usage approprié des TIC (technologie de l'information et de la communication) (C8-1, C8-2, C8-3, C8-4)

6-

Imaginer des solutions originales (C3-1, C3-4, C3-7, C8-2)

Oser sortir de sa zone de confort (C3-1, C3-4, C3-7, C8-2)

S'engager dans un processus de création (C3-1, C3-4, C3-7, C8-2, C8-3)

7-

Adapter son échauffement et son entraînement à son profil (C2-2, C2-3, C9-1)

Connaître ses points forts et ses points faibles (C2-2, C2-3, C9-1)

8-

Se remettre en question pour évoluer dans ses pratiques (C2-2, C2-3, C9-1)

Planifier sa pratique en vue d'un objectif (C2-2, C2-3, C9-1)

COURS ÉLECTIFS 2A

2EL0010 – Teaching assistant

Responsables : **Philippe Bouafia**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Teaching Assistant Physique : ce cours consiste à donner des cours de renforcement et de soutien aux élèves de 1ère année dans le cadre de leur cours de Physique Quantique et Statistique de première année. Il représente donc une formidable opportunité de s'initier à la pédagogie en vue d'une potentielle carrière d'enseignant ou bien pour postuler à d'éventuelles positions de Teaching Assistant dans de fameuses universités nord-américaines. L'objectif est donc que vous appreniez à (i) transmettre vos connaissances et compréhension à un public encore non-expert, et (ii) accompagner un élève dans sa progression vers un objectif de validation de connaissance et compréhension du cours de Physique Quantique et Statistique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

Prérequis

Bon niveau en physique quantique et statistique ainsi qu'en mathématiques (CIP et EDP)

Plan détaillé du cours (contenu)

Teaching Assistant de Physique : un cours introductif donnera les éléments nécessaires à la construction des objectifs pédagogiques, à la construction de qcms et aux notions de scénarisation et d'alignement pédagogique. Cependant, la majorité de ce cours est du type do-it yourself. Vous serez réparti en binôme en charge d'un groupe d'une quinzaine d'étudiants de première année présentant de potentielles difficultés car provenant de parcours non-classiques. Il y aura neuf séances de 1h30, chaque séance se focalisant sur un chapitre du cours de Mécanique Quantique et Statistique. Pour chaque séance, un binôme dispensera le TD de renforcement élaboré à cet effet. Le binôme participera la remise à niveau du TD à partir des retours d'expériences des années précédentes en définissant des objectifs d'apprentissage pédagogique. Il réalisera également un qcm testant les objectifs pédagogiques fixés. La séance de 1h30 sera, pour chaque binôme, consacrée à la correction des TD de renforcement avec leur groupe attiré. Il leur sera demandé de se focaliser sur les points de difficultés rencontrés pour aider à la progression des élèves de 1ère année.

Déroulement, organisation du cours

Teaching assistant de Physique : Cours introductif et mise en situation (binôme assurant 9 classes de 1h30 avec un effectif de 15 élèves de première année, remise à niveau des TD existants, conception de qcm).

Teaching Assistant en Mathématiques : Des binômes ou trinômes de Teaching Assistant encadreront tout au long de l'année une dizaine d'étudiants de première année et auront un professeur référent pour les guider dans cette activité. Chaque séance de Modalité Renforcée sera précédée d'un briefing avec le professeur référent, les TA proposeront leur plan pour la séance dans une fiche synthétique, et un debriefing aura lieu après la séance.

Attention : il n'est pas possible d'être Teaching Assistant en Physique ET en Maths, mais seulement dans l'un ou dans l'autre.

Organisation de l'évaluation

Teaching assistant de Physique : vous serez évalué en binôme sur votre contribution au TD, qcm construit et sur l'animation d'une séance de cours.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Teaching Assistant Physique: à la fin de ce cours, les élèves sauront (1) mettre en place une grille d'objectifs pédagogiques, (2) créer une évaluation de type qcm adaptée aux objectifs d'apprentissage pédagogiques, (3) scénariser et animer une séance en face d'une classe d'une quinzaine d'élèves, et (4) utiliser des outils numériques (notamment la plateforme d'enseignement : <http://prd-mecaqu.centralesupelec.fr/>) permettant à l'élève-utilisateur de réaliser ses proposer expérimentations numériques afin de mieux se représenter les concepts de la mécanique quantique. Des compétences de pédagogie et d'encadrement et de savoir convaincre sont aussi des acquis visés par cet enseignement (C5.1, C7.2, C7.3 et C7.4).

Teaching Assistant en Mathématiques : Compétences de pédagogie, d'encadrement et de savoir convaincre (C5.1, C7.2, C7.3 et C7.4)

2EL1110 – Systèmes dynamiques en neuroscience

Responsables : **Antoine Chaillet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif constitue une introduction aux outils permettant d'analyser les processus dynamiques impliqués dans le fonctionnement du cerveau. Malgré leur immense complexité, les fonctions cérébrales se basent en effet sur des processus dynamiques élémentaires dont certains peuvent être appréhendés par des outils mathématiques. La maîtrise de ces processus est indispensable pour avancer dans notre compréhension du fonctionnement du cerveau, pour optimiser les instruments de mesure de l'activité cérébrale (imagerie médicale, signaux électrophysiologiques, ...), pour développer des interfaces cerveau-machine, pour mettre au point des architectures de calcul neuro-inspirées, et pour comprendre les mécanismes impliqués dans certaines maladies neurologiques et ainsi progresser dans leur traitement.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

- SG1 : Systèmes d'information et programmation
- SG1-ST2-SG3 : Convergence, Intégration, Probabilités, Equations aux dérivées partielles
- ST2 : Modélisation
- ST4 : Traitement du signal
- ST5 : Commande des systèmes dynamiques

Plan détaillé du cours (contenu)

Chapitre 1 : Bases physiologiques et fonctions cérébrales (CM : 4.5h)

Ce premier chapitre présente les bases physiologiques de l'activité neuronale. Il décrit les principes élémentaires impliqués dans la génération d'un potentiel d'action et la communication entre neurones (soma, axone, dendrite, synapse, canaux ioniques, potentiel de repos), ainsi que la plasticité cérébrale et les mécanismes de régulation homéostatique. Il décrit les principes physiques et biologiques qui sous-tendent ces comportements. Il aborde enfin les principales fonctions cérébrales (mémoire, systèmes moteurs, olfactifs et visuels) et leur altération en conditions pathologiques, notamment au travers de l'étude des oscillations cérébrales.

Chapitre 2 : Mesure et actionnement de l'activité cérébrale (CM : 3h)

Ce deuxième chapitre traite des différentes techniques de mesure de l'activité cérébrale, notamment les techniques électrophysiologiques (patch-clamp, enregistrement multi-unités, LFP, EEG, MEG) et l'imagerie (IRM, 2-photons). Il explique la nature des signaux mesurés et en compare les résolutions spatiales et temporelles. Il décrit également les différentes techniques utilisées pour influencer l'activité cérébrale, notamment au travers de la stimulation électrique et de l'optogénétique.

Chapitre 3 : Interfaces cerveau-machine (CM : 4.5h)

Ce sixième chapitre aborde le développement d'interfaces cerveau-machine, aussi appelées neuroprothèses. Ces dispositifs sont conçus pour restaurer l'autonomie de patients amputés ou tétraplégiques. Leur mise en place chez l'animal et l'humain nous renseigne en parallèle sur le fonctionnement et l'apprentissage dans les boucles sensorimotrices naturelles. Le chapitre détaille les différentes composantes de ces interfaces : enregistrement de l'activité neuronale invasive (ECoG, électrophysiologie corticale) ou non (EEG), traitement des signaux et algorithmes de commande motrice, retour sensoriel de la neuroprothèse vers le cerveau. Il évoque également la mise en jeu de mécanismes de plasticité cérébrale, notamment au niveau cortical, sur lesquels le développement d'interfaces peut s'appuyer pour optimiser l'apprentissage.

Chapitre 4 : Modèles mathématiques de neurones (CM : 3h)

Ce chapitre présente les modèles de neurones les plus utilisés. Il introduit les modèles à conductances au travers du célèbre modèle de Hodgkin-Huxley, et souligne son analogie électronique. Il aborde ensuite des modèles simplifiés tels que les modèles integrate & fire ou FitzHug-Nagumo, ainsi qu'une modélisation simple de la synapse et des mécanismes de plasticité neuronale. La simulation numérique de ces modèles est également abordée.

Chapitre 5 : Analyse des modèles neuronaux (CM : 4.5h, TP : 3h)

Ce chapitre présente des outils mathématiques utilisés dans l'analyse du comportement neuronal. Il présente pour cela la notion de diagramme de phase et de bifurcations. Ces notions sont d'abord présentées pour des modèles unidimensionnels, puis sur des modèles bidimensionnels. Le chapitre établit un lien entre ces bifurcations et le comportement qualitatif du neurone. Un TP sur Matlab-Simulink vise à implanter un modèle de neurones à conductance et à prédire son comportement par les outils théoriques présentés.

Chapitre 6 : Populations neuronales (CM : 1.5h, TP : 3h)

Ce cinquième chapitre s'intéresse à la dynamique d'un ensemble de neurones ou d'une structure cérébrale. Il présente des modèles simplifiés de l'activité d'une population neuronale tels que le modèle de Wilson-Cowan ou les champs neuronaux. Il montre comment prédire le comportement de tels modèles par une analyse de stabilité ou de bifurcations. Lors d'un TP sur Matlab-Simulink, les élèves étudieront le phénomène de rivalité binoculaire au travers d'un modèle simple de populations neuronales.

Conférence : Conférence industrielle (1.5h)

Une conférence donnée par un industriel dans un domaine des neurosciences présente les innovations industrielles récentes ainsi que les opportunités que représentent les neurosciences pour l'industrie et l'entrepreneuriat.

Déroulement, organisation du cours

CM, TD, TP, travail hors présentiel.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation est faite sur la base d'un examen écrit sans documents (2h) en fin de cours et sur les rapports des deux TP. La pondération envisagée est : 60% sur l'examen écrit et 20% sur chaque TP. Toute absence non justifiée en TP conduira à un zéro à la note de TP. Les compétences seront évaluées au travers des rapports de TP et de l'examen écrit. Les compétences C1.2 et C1.3 seront approfondies lors des séances de TP.

Support de cours, bibliographie

- Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting, Eugene M. Izhikevich, The MIT Press, 2007
- Nonlinear dynamics and Chaos, by Steven Strogatz, Westview Press, 2001
- Mathematical Foundations of Neuroscience, by G. Bard Ermentrout & D. Terman, Springer, 2010
- Theoretical neuroscience, by P. Dayan & L.F. Abbott, The MIT Press, 2005

Moyens

Une équipe enseignante pluridisciplinaire incluant des chercheurs en neurosciences computationnelles, un neurochirurgien, un enseignant-chercheur en Automatique et un créateur d'entreprise.

Les TP seront effectués sur des postes disposant de Matlab-Simulink.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves auront acquis les bases de neurosciences nécessaires à une interaction avec des professionnels du domaine (neurochirurgiens, experts en neurosciences computationnelles, expérimentateurs). Ils maîtriseront de plus des outils mathématiques permettant de modéliser l'activité d'un neurone ou d'une population neuronale, et de prédire leur comportement dynamique à la fois analytiquement et numériquement. Ils auront en outre été sensibilisés aux opportunités que constituent les neurosciences en termes de recherche, de développement médical ou industriel, et d'entrepreneuriat.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Maîtriser les bases de neurosciences nécessaires à une interaction avec des professionnels du domaine (neurochirurgiens, experts en neurosciences computationnelles, expérimentateurs)
- Modéliser l'activité d'un neurone ou d'une population neuronale
- Prédire leur comportement dynamique à la fois analytiquement et numériquement.

Ce cours est donc l'occasion pour les étudiants d'approfondir leurs compétences C1, C2 et C6.

2EL1120 – Systèmes Robotiques Interactifs

Responsables : **Maria Makarova**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le paysage de la robotique industrielle et de service évolue aujourd'hui rapidement avec le développement de **robots collaboratifs conçus pour interagir physiquement avec l'homme**, et à partager un même espace de travail voire une même tâche. Les robots collaboratifs ouvrent de nombreuses perspectives tant dans le contexte de **l'usine du futur** que dans le domaine de **l'assistance à la personne**. L'interaction homme-robot se situe aujourd'hui au cœur des préoccupations de la robotique et nécessite une approche **pluridisciplinaire** pour concevoir des systèmes sûrs et performants à la pointe de la technologie.

Les thématiques abordées dans ce cours permettent de comprendre les enjeux de la robotique interactive et les aspects scientifiques et techniques associés à ces **systèmes complexes en interaction avec l'homme ou leur environnement**. Ce cours a pour objectif de présenter le contexte, d'approfondir les outils méthodologiques fondamentaux ainsi que les thématiques actuelles liés aux manipulateurs robotiques et leur interaction avec l'humain.

A travers une série de cours, exercices illustratifs, TD et TP à fort contenu analytique, ce cours a pour objectif de fournir une base méthodologique solide qui pourra servir aux futurs ingénieurs souhaitant s'investir dans cette discipline de pointe.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

- Commande des systèmes dynamiques (ST5)
- Connaissances de base de mécanique des corps rigides à acquérir si besoin en autoformation

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction, bref historique, contexte industriel et scientifique
- Bases de la modélisation en robotique (géométrie, cinématique)
- Modélisation dynamique et commande
- Téléopération à retour d'effort
- Robotique collaborative
- Introduction à ROS (Robot Operating Software)

Déroulement, organisation du cours

Les cours magistraux illustrés par des exemples seront alternés avec des séances de TD/TP sur ordinateur (en binôme/trinôme) pour mettre en pratique les notions présentées sur un cas d'étude représentatif. Les séances de TD/TP en présentiel pourront nécessiter un travail personnel préparatoire hors classe.

- **TD/TP#1 et TD/TP#2** : illustration des concepts de modélisation robotique sous Matlab/Simulink ou python
- **TD/TP#3 (travail personnel)** : introduction à ROS (Robot Operating Software) et application aux manipulateurs robotiques

Répartition horaire :

- Cours : 22,5h
- TD/TP sur ordinateurs : 6h
- Évaluation finale (quizz) : 2h

Organisation de l'évaluation

- TD/TP #1 & #2 : Compte-rendu écrit de TD/TP et code fonctionnel commenté [50% de la note finale; compétences C1 et C6];
- Évaluation finale : Quizz écrit avec documents (2h) [50% de la note finale; compétence C2].
- Présence contrôlée en TD/TP, pouvant donner lieu à pénalité sur la note de compte-rendu. Une absence non justifiée en séance de TD/TP entraîne la note zéro à la séance concernée.

Support de cours, bibliographie

Supports de cours : Recueil des transparents utilisés en cours

Bibliographie : W. Khalil, E. Dombre, "Modeling, Identification and Control of Robots", Butterworth-Heinemann, 2004.

Moyens

- **Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux)** : Mathieu Grossard (CEA LIST Laboratoire de Robotique Interactive), Franck Geffard (CEA LIST Laboratoire de Robotique Interactive), Xavier Lamy (CEA LIST Laboratoire de Robotique Interactive), Alex Caldas (ESME Sudria)
- **Taille des TD** : groupes de 18 élèves maximum
- **Outils logiciels** et nombre de licence nécessaire :
 - Matlab/Simulink, licence campus (illimitée)
 - Python (gratuit)
 - ROS (gratuit ; fourniture d'une machine virtuelle sous Ubuntu avec ROS installé)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

1. Décrire le contexte actuel (à travers les principaux enjeux techniques, applicatifs et économiques associés) de la robotique interactive vue comme un domaine pluridisciplinaire autour de l'interaction homme-robot et robot-environnement. Décrire les éléments matériels et logiciels principaux constituant un tel système robotique.
2. Établir les modèles géométrique, cinématique et dynamique d'un robot manipulateur.
3. Choisir une structure de commande appropriée selon le type d'application robotique envisagée et en régler les paramètres de manière à répondre au compromis performance/robustesse.
4. Modéliser un robot manipulateur en contact avec un humain ou avec un environnement passif ; déterminer les conditions de stabilité du système global asservi en conditions de téléopération ou de collaboration.
5. Utiliser des outils logiciels (Matlab/Simulink ou python, ROS) pour construire et simuler des modèles de robots manipulateurs vus comme des systèmes dynamiques.
6. Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu de TD)

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences évaluées : C1, C2, C6

- « Etablir les modèles géométrique, cinématique et dynamique d'un robot manipulateur » et « Modéliser un robot manipulateur en contact avec un humain ou avec un environnement passif » s'inscrivent dans **C1.2 "Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème" – jalon 2**
- « Choisir une structure de commande appropriée selon le type d'application robotique envisagée et en régler les paramètres de manière à répondre au compromis performance/robustesse » et « déterminer les conditions de stabilité du système global asservi en conditions de téléopération ou de collaboration » s'inscrivent dans **C1.4 "Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe" – jalon 2**
- « Utiliser des outils logiciels pour construire et simuler des modèles de robots manipulateurs vus comme des systèmes dynamiques » s'inscrit dans **C6.1 "Résoudre numériquement un problème"** ; et **C1.3 "Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation" – jalon 2**
- **C2.1** Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

2EL1130 – Systèmes dynamiques multi-agents. Application au vol en formation de drones

Responsables : **Cristina-Nicoleta Maniu**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Nombreuses sont les applications qui font intervenir une formation de plusieurs systèmes autonomes, capables de coopérer dans un environnement précis et de se reconfigurer pour la réussite de la mission. Notamment, le vol en formation (drones, satellites, etc.), la fluidité de la circulation automobile ou le comportement des piétons dans une foule permettent de mettre en avant la notion de système dynamique multi-agents.

Dans le cadre de missions de sauvetage (extinction de feux à large échelle, recherche de victimes suite à des avalanches ou de boîtes noires dans un vaste environnement, etc.), la coordination et la commande d'une flotte de véhicules autonomes deviennent un élément clé de la réussite. Ces missions multi-agents posent des questions de répartition des tâches entre les agents, de planification de trajectoire, et induisent des problématiques de commande en temps réel sous contraintes etc. Les thématiques abordées dans ce cours permettront aux étudiants de comprendre les concepts et les défis liés aux systèmes dynamiques multi-agents à partir d'une application sur une formation de drones.

Des expérimentations dans la volière de CentraleSupélec sur des nano-drones Crazyflie, des mini-drones DJI RoboMaster TT, sur des robots terrestres TurtleBot et DJI RobotMaster S1, ainsi qu'à distance sur la plateforme Robotarium sont prévues dans le cadre de ce cours.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Commande des systèmes dynamiques (ST5)

Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours s'appuie sur une **collaboration avec ONERA et le laboratoire Heudiasyc**.

Le plan proposé est le suivant :

- Introduction : bref historique, contexte industriel et académique ;
- Modélisation dynamique des systèmes multi-agents (MAS) ;
- Outils spécifiques MAS : notions de flotte / essaim et de formation, graphe de communication, consensus ;
- Modélisation et prise en main de drones et robots terrestres ;
- Structures de commande de systèmes multi-agents ;
- Prise en compte des contraintes dans la loi de commande coopérative ;
- Raffinement des lois de commande et analyse des résultats ;
- Ouverture vers les systèmes multi-agents dans les missions spatiales.

Une étude de cas tutoré est prévue en fil conducteur tout au long de ce module, permettant de tester à la fois en simulation et sur une flotte de drones et/ou de robots terrestres les concepts étudiés.

Des expérimentations sont prévues dans la volière de CentraleSupélec.

Déroulement, organisation du cours

Ce module est composé de séances type **cours interactif** alternées avec des **TD** et une **étude de cas** (*réalisée en équipe*) qui servira de fil conducteur pendant toute la durée du module électif pour concrétiser l'implantation sur des drones et robots mobiles. L'étude de cas suivra la progression du cours, comme un complément permettant l'acquisition des compétences d'ordre pratique. Des méthodes de pédagogie active du type *Apprentissage par Problèmes (APP)* en petits groupes tutorés sont envisagées pendant les études de cas sur l'application à une formation de drones.

Les élèves découvriront les systèmes dynamiques multi-agents par une succession d'exemples, d'exercices de réflexion, de discussions et d'orientation théorique et pratique. Une estimation du volume horaire (30,5h en présentiel) est la suivante : 13,5h type cours interactif, 6h pour les TD, 9h pour l'étude de cas et 2h pour l'évaluation des posters interactifs, avec des expérimentations dans la volière.

Organisation de l'évaluation

Les modalités d'évaluation ont été conçues afin de respecter l'alignement objectifs – activités – évaluations. Un rapport (contenant une étude bibliographique et une analyse des résultats obtenus pendant l'étude de cas) sera réalisé et noté. Les résultats obtenus seront présentés à l'aide d'un poster interactif devant un jury et avec un regard croisé des autres groupes (évaluation par les pairs). La note finale est calculée à partir de l'évaluation du **rapport (50%)** et l'évaluation du **poster interactif**, tant sur sa réalisation que sur sa présentation orale (**50%**). Une évaluation par compétences est également envisagée. Les **compétences C1, C2, C5, C7 et C8** seront évaluées.

Support de cours, bibliographie

Bibliographie

- MOOC « Drones et Robotique Aérienne » (DroMOOC), www.onera.fr/dromooc, Université Paris-Saclay, 2018.
- K.K. Oh, M.C. Park, H.S. Ahn, "A survey of multi-agent formation control", *Automatica*, vol. 53, pp. 424-440, 2015.
- J.A. Guerrero, P. Castillo, S. Salazar, R. Lozano, "Mini Rotorcraft Flight Formation Control Using Bounded Inputs", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 65, pp. 175-186, 2012.
- J. Guerrero, R. Lozano, "Flight Formation Control", John Wiley & Sons, 2012.
- I. Prodan, "Commande des systèmes dynamiques Multi-Agents en présence de contraintes", thèse de doctorat, Supélec, 2012.
- M.T. Nguyen, "Commande prédictive sous contraintes de sécurité pour des systèmes dynamiques Multi-Agents", thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2016.
- G. Rousseau, C. Stoica Maniu, S. Tebbani, M. Babel, N. Martin, "Quadcopter-performed cinematographic flight plans using minimum jerk trajectories and predictive camera control", *European Control Conference*, Limassol, Cyprus, 12-15 June 2018.
- Y. Rochefort, H. Piet-Lahanier, S. Bertrand, D. Beauvois, D. Dumur, "Model predictive control of cooperative vehicles using systematic search approach", *Control Engineering Practice*, vol. 32, pp. 204-217, 2014.
- N. Michel, S. Bertrand, G. Valmorbida, S. Olaru, D. Dumur. "Design and parameter tuning of a robust model predictive controller for UAVs", *IFAC World Congress*, Toulouse, France, 2017.
- Wilson, S., Glotfelter, P., Wang, L., Mayya, S., Notomista, G., Mote, M., & Egerstedt, M. The Robotarium: Globally Impactful Opportunities, Challenges, and Lessons Learned in Remote-Access, Distributed Control of Multirobot Systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 40(1), 26-44, 2020.
- C. Stoica Maniu, C. Vlad, T. Chevet, S. Bertrand, A. Venturino, G. Rousseau, S. Olaru, "Control systems engineering made easy: motivating students through experimentation on UAVs", 21th IFAC World Congress, Demonstrator Late Breaking Results, Berlin, Germany, 12-17 July, 2020.

Exemples de réalisations pratiques

- <https://www.youtube.com/watch?v=hyGJBV1xnJI>
- <https://www.youtube.com/watch?v=YQIMGV5vtd4>
- <https://www.youtube.com/watch?v=fdrmahUPwal>
- <http://www.asctec.de/en/uav-uas-drones-rpas-roav/asctec-hummingbird/>

Moyens

Equipe pédagogique : Cristina Stoica, Cristina Vlad, Sorin Olaru

Equipe enseignante (liste provisoire) : Sylvain Bertrand (ONERA), Pedro Castillo (UTC Heudiasyc), Cristina Stoica, Cristina Vlad, Sorin Olaru, Aarsh Thakker.

Un **financement via le projet MEECOD – Moderniser l'Enseignement par l'Expérimentation sur la Coordination de Drones**, avec le soutien de l'UPSaclay, projet « *Initiatives Pédagogiques – Oser !* » 2018, N°FOR-2018-070, a été obtenu pour l'achat du matériel nécessaire pour ce cours (équipements volière CentraleSupélec, plusieurs drones Crazyflie et robots terrestres TurtleBot, etc.) et la contribution à la création de la volière de CentraleSupélec.

Un **financement via le projet DARETeach – Drone Arenas-based Remote International Teaching** de la *Fondation FACE – French-American Cultural Exchange in Education and the Arts* a permis de compléter la flotte de drones Crazyflie.

Un **financement via le projet (Re)CreativeRobot – (Re)Creative Mobile Robotics for Kids** de la *Fondation International Federation of Automatic Control* a permis de compléter la flotte de drones et de robots terrestres DJI.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce module, les élèves seront capables de :

- Décrire et reconnaître le comportement d'un système multi-agents en effectuant une étude bibliographique de travaux précédemment effectués sur le sujet ;
- Modéliser un système multi-agents en proposant une représentation d'état du système qui donnera lieu à la mise en place d'un simulateur ;
- Analyser et traduire un cahier des charges, ainsi que proposer une structure de loi de commande pour un système multi-agents, en suivant une démarche d'analyse à base d'un modèle de synthèse/simulation ;
- Synthétiser une loi de commande pour le système multi-agents et la valider en simulation, en complétant le simulateur ;
- Appliquer une loi de commande à un système multi-agents réel (une formation de drones, de véhicules terrestres) en suivant une démarche de prise en main des drones/véhicules autonomes, d'ajustement des algorithmes de commande développés et de validation expérimentale.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 – Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes

C1.4 – Concevoir : spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.3 – Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires

C5.3 – Analyser les enjeux globaux et/ou locaux à l'international et adapter des projets ou solutions à ceux-ci

C7.1 – Savoir convaincre sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

C7.3 – Savoir convaincre sur soi : Être à l'aise et se montrer convaincu, manifester de l'empathie et gérer ses émotions

C8.1 – Construire le collectif pour travailler en équipe

C8.2 – Mobiliser et entraîner un collectif en faisant preuve de leadership

2EL1210 – Exposition des personnes à l'électromagnétisme et compatibilité électromagnétique

Responsables : **Dominique Lecointe**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

La théorie de Maxwell est depuis plus d'un siècle source d'innovations et de progrès technologiques et il est remarquable de constater l'étendue des secteurs industriels impactés par les applications de cette théorie :

- Le secteur des télécommunications au cœur de la société de l'information,
- Le secteur aéronautique, automobile et des transports,
- Le secteur de l'énergie électrique
- Le secteur de la défense et de la sécurité,
- Le secteur de la santé et de l'environnement,
- Le secteur du bâtiment et des travaux publics,
- Le secteur de l'internet et des objets connectés.

Malheureusement, ces succès et progrès technologiques ne se font pas sans contrepartie. La pollution électromagnétique engendrée par tous ces systèmes électriques et électroniques est devenue un des enjeux sociétaux du 21^{ème} siècle. Les victimes potentielles de cette pollution sont les systèmes électroniques (compatibilité électromagnétique) et les personnes (exposition). La maîtrise de cette pollution est l'objectif de la compatibilité électromagnétique et de l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques. L'ingénieur doit faire face à un enjeu scientifique mais aussi économique et sociétal pour répondre à ce défi.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Présentation des enjeux
2. CEM : sources de perturbations et ordre de grandeurs
3. EXPO : sources de champs
4. CEM : couplage et protection
5. CEM : moyens d'essais, normes
6. EXPO : effets biologiques
7. EXPO : limites, indice
8. TD CEM : quantification des phénomènes de couplage
9. EXPO : conférence ANFR
10. TP (3h00)
11. TP (3h00)

Déroulement, organisation du cours

- 15 Cours et exercices
- 2 TP (6h00)

Organisation de l'évaluation

1examen final sans document de 2h00.

Support de cours, bibliographie

Planches présentées durant les cours

Textes des TD

Compatibilité électromagnétique de P. Degauque et J. Hamelin, édition Dunod

Exposition humaine aux champs électromagnétique de P. Staebler, ISTE editions

Moyens

Équipe enseignante (cours magistraux) : Dominique Lecointe (Travaux pratiques) : Saber Dakhli

Taille des TP : 2 groupes de 20 élèves (au maximum)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Poser le problème CEM lors de la conception d'un système complexe.
- Identifier, en fonction des bandes de fréquences, les phénomènes physiques mis en jeu.
- Utiliser et mettre en œuvre les modèles adaptés (maîtrise des ordres de grandeur, prise en compte des contraintes économiques).
- Faire preuve de rigueur et d'esprit critique pour analyser et résoudre les problèmes d'exposition des personnes.
- Argumenter en se basant sur les réglementations nationale et internationale.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1, les jalons 1 et 2 de la compétence C2,

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.

2EL1230 – Systèmes spatiaux embarqués

Responsables : **Laurent Bourgois**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Avoir une vision globale du monde spatial d'aujourd'hui et de ses enjeux stratégiques, et découvrir les principes et technologies mis en œuvre dans la conception de systèmes spatiaux embarqués, un domaine où les défis se jouent tout autant à l'échelle du nanomètre qu'à l'échelle de l'année-lumière.

Vous apprendrez par exemple comment sont conçus les systèmes spatiaux embarqués pour :

- **Survivre** aux contraintes de l'environnement spatial auxquelles un smartphone de résisterait pas.
- **Prendre** des décisions en autonomie et parfois à plusieurs millions de km de la Terre.
- **Assurer** le succès de la mission même en cas de panne.
- **Contrôler** avec précision l'attitude et l'orbite d'un satellite.
- **Exploiter** au mieux les nouvelles technologies.

Si vous avez trouvé le mot caché dans les cinq points listés précédemment, cet électif est fait pour vous. Sinon, cet électif vous apportera la réponse ainsi qu'à de nombreuses autres questions.

Pour conclure la série de cours, une visite d'Airbus permettra de découvrir concrètement la conception et la fabrication d'équipements spatiaux chez Space Electronics.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Ce cours peut être abordé sans prérequis particulier pour un domaine. Tous les concepts techniques nécessaires seront expliqués pendant le module.

Plan détaillé du cours (contenu)

Prêt pour un voyage dans l'espace ?

Introduction aux systèmes spatiaux

Enjeux stratégiques de l'accès à l'espace, marché du spatial. Le New Space (Space X & Starlink, OneWeb...).

Types de missions spatiales, choix de l'orbite, billard cosmique.

Défis et contraintes de l'environnement spatial.

Architecture d'un satellite

Comment ça marche ? Comment garantir la tenue de la mission ?

Description détaillée d'un satellite. Contrôle d'attitude et d'orbite.

Fiabilité et robustesse aux pannes. Types de redondances.

Énergie & Propulsion

Contrôle et distribution de puissance. Panneaux solaires. Gestion des éclipses.

La révolution de la propulsion plasmique.

Communications

Liaisons sol-bord et traitement de signal pour les communications spatiales.
Protocoles et bus de communications internes au satellite.

Logiciel embarqué

Les différents traitements embarqués. Processeurs, mémoires et architectures utilisés.
Robustesse, fiabilité, temps réel et validation d'un logiciel embarqué.

Électronique embarquée

Équipements numériques, exploiter au mieux les nouvelles technologies de composants (introduction aux ASIC/FPGA).

Zoom sur le traitement d'images (techniques de compression, stockage).

Comment être robuste aux radiations ? La magie des codes correcteurs d'erreur.

Failure is not an option

Exemples marquants d'échecs dans le spatial. Lessons learned.

Visite d'un site industriel

Visite d'Airbus Defence and Space (1 journée) : conception, bureaux d'études, fabrication (salles blanches).

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux réalisés par des intervenants de l'industrie, experts dans leur domaine et différents pour chaque module.

Visite du site Airbus Defence and Space (Elancourt) sur une journée complète.

Organisation de l'évaluation

Évaluation sous forme d'exposé oral sur un sujet autour du domaine spatial.

La pondération exposé oral et QCM sera la suivante : 24% pour les QCM et 76% pour l'exposé oral.

- Un contrôle final (CF) sous forme d'exposé oral sur un sujet autour du domaine spatial : $\alpha_f = 0,76$.
- 4 quiz répartis sur les 8 séances qui constituent le contrôle continu (CC1, CC2, ... , CC4) : $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_4 = 0,06$.

Moyens

Equipe enseignante composée d'un référent CentraleSupélec (Laurent Bourgois) et de plusieurs intervenants de l'industrie, experts dans leur domaine chez Airbus Defence and Space.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce module, les élèves auront une connaissance globale des systèmes spatiaux et seront capables d'intervenir dans la conception de systèmes embarqués fonctionnant en environnement hostile. Ils comprendront pourquoi et comment faire face à des contraintes mécaniques, thermiques, radiatives et électromagnétiques. L'accent sera également mis sur la variété des activités relatives aux systèmes embarqués et sur les interfaces avec les métiers connexes : du silicium au système complet, du hardware au software, de la conception à la validation.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes.

C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier.

Les compétence C1 et C2 sont validées si la note globale de l'électif est supérieure ou égale à 10/20.

2EL1240 – Systèmes de navigation et optroniques pour véhicules autonomes et satellites - Technologies temps réel

Responsables : **Dominique Lecointe**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est réalisé par une équipe d'ingénieurs de la société SAFRAN. Il s'adresse aux élèves qui s'intéressent à la navigation inertielle et optronique pour les véhicules autonomes, qu'ils soient terrestres, marins, aériens ou spatiaux. La navigation inertielle est une méthode de navigation qui utilise les mesures des accélérations et des rotations d'un véhicule pour déterminer sa position et son orientation dans l'espace. L'optronique, quant à elle, concerne l'utilisation de systèmes optiques pour la détection et la mesure de la lumière, qui peuvent être utilisés pour la reconnaissance d'objets, la détection de mouvement et la surveillance.

Le cours abordera les principes fondamentaux de la navigation inertielle et de l'optronique, ainsi que les technologies associées. Les élèves apprendront comment ces techniques sont utilisées dans les véhicules autonomes, tels que les voitures autonomes, les drones, les avions sans pilote, les sous-marins autonomes, etc., pour permettre la navigation et la surveillance autonome. Le cours couvrira également les défis liés à l'utilisation de la navigation inertielle et de l'optronique, tels que les perturbations atmosphériques, la gestion de l'énergie, les interférences électromagnétiques, etc.

Enfin, les élèves auront l'occasion de découvrir les dernières avancées dans ce domaine en matière de recherche et d'applications pratiques. En suivant ce cours, les élèves pourront acquérir une solide compréhension des principes de la navigation inertielle et de l'optronique pour les véhicules autonomes, qu'ils soient terrestres, aéronautiques ou spatiaux, et être prêts à relever les défis techniques liés à l'autonomie de ces véhicules.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Navigation inertielle : senseurs, équipements et systèmes de navigation
2. Optronique : observation et identification, caméra et viseurs
3. Spatial : satellites, communications et observations
4. Véhicule autonome : fusion des capteurs et autonomie

Déroulement, organisation du cours

Présentation sous forme de conférences

Organisation de l'évaluation

Les élèves travaillent par groupe et préparent un exposé sur un sujet complémentaire aux notions présentées durant le cours. Le sujet sera précisé en début de cours. L'ensemble des élèves assistent aux exposés.

Support de cours, bibliographie

Planches présentées durant les conférences

Moyens

Ce cours est réalisé par une équipe d'ingénieurs de la société SAFRAN
Une visite de certains sites de la société SAFRAN illustre les problèmes présentés durant le cours.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, voici quelques acquis d'apprentissage obtenus par les élèves :

- Une compréhension approfondie des principes fondamentaux de la navigation inertielle et optronique.
- Une connaissance des différentes technologies de capteurs utilisées dans les systèmes de navigation pour les véhicules autonomes.
- La capacité de comprendre les limites et les défis associés à l'utilisation de ces technologies de capteurs, tels que les perturbations atmosphériques, les interférences électromagnétiques, les erreurs de mesure et la dérive.
- Une maîtrise des techniques de fusion de données de capteurs pour améliorer la précision de la navigation.
- Une connaissance des dernières avancées en matière de recherche et d'applications pratiques dans le domaine de la navigation pour les véhicules autonomes.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1, les jalons 1 et 2 de la compétence C2.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider les jalons 1 et 2 de la compétence C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers.

2EL1310 – Energies renouvelables

Responsables : **Simon Meunier**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif comporte des cours, des TD et un projet.

L'objectif de ce cours est de présenter les potentialités des systèmes utilisant les sources d'énergie renouvelable. Une première partie est consacrée aux principaux dispositifs de production d'énergie à partir de sources renouvelables.

Une seconde partie concerne l'intégration des énergies renouvelables et la gestion de l'énergie au sein du réseau électrique. Les éléments de conversion et de stockage utilisés dans ce cadre seront abordés.

Projet :

Le titre du projet : Dimensionnement du système d'énergie renouvelable pour alimenter une ferme agricole

Les élèves sont divisés en plusieurs groupes. Des créneaux sont prévus pour répondre aux questions des élèves

Pour les élèves qui ne parlent pas français et qui souhaitent suivre ce cours, merci de contacter Simon Meunier (simon.meunier@centralesupelec.fr)

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Il est préférable (mais non obligatoire) d'avoir suivi l'électif "Energie Electrique" en 1ère année (en SG1 ou SG3) ou un équivalent

Plan détaillé du cours (contenu)

- Principaux moyens de production d'énergie à base de sources renouvelables : éolien, solaire photovoltaïque, solaire thermique, cycle organique de Rankine
- Intégration et gestion de l'énergie : énergie éolienne et photovoltaïque dans les réseaux électriques
- Cas des réseaux isolés autonomes : modélisation et dimensionnement des éléments, gestion des flux d'énergie

Déroulement, organisation du cours

Cours, TD, projet

Organisation de l'évaluation

La modalité de l'évaluation du cours : l'évaluation se fera par un examen écrit de 2h et le projet sera noté.

La note d'évaluation : 60% pour l'examen écrit et 40% pour le projet.

Moyens

Equipe enseignante : enseignants-chercheurs de CentraleSupélec et intervenants industriels

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Maîtriser les particularités des différents dispositifs intervenants dans la génération, la conversion et la gestion de l'énergie d'origine renouvelable
- Comprendre les difficultés liées à l'intégration de ces moyens de production dans les réseaux électriques
- Résoudre des problèmes simples de dimensionnement de systèmes d'alimentation énergétique de sites à partir de sources renouvelables.
- Evaluer les aspects économiques

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C3 Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

2EL1315 – Conversion d'énergie électrique pour les sources d'énergie renouvelables et l'électromobilité

Responsables : **Marc Petit**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'electif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Compte tenu des objectifs de décarbonation au niveau mondial, la Commission européenne a prévu un programme ambitieux pour atteindre un objectif d'émission nette nulle en 2050. Ainsi, plusieurs scénarios ont été construits, parmi lesquels une plus grande électrification du secteur énergétique, une meilleure efficacité énergétique, et le développement de l'hydrogène. Ces scénarios ont également été organisés en sept priorités stratégiques. Deux d'entre elles sont le développement des énergies renouvelables (avec un objectif de 80% d'électricité produite à partir de sources renouvelables en 2050) et une mobilité plus électrifiée. Ainsi les convertisseurs électriques (ou électromécaniques) seront au cœur de cette évolution, avec les applications suivantes : éoliennes, production photovoltaïque, stockage de batteries, groupe motopropulseur électrique pour véhicules électriques (VE), avions plus électriques, navires tout électriques, nouvelles lignes DC pour réseaux électriques, convertisseurs de puissance pour électrolyseurs et pour piles à combustible, récupération d'énergie pour systèmes autonomes, ...

Quelle que soit l'application, une étape importante sera la conception de la solution optimale et son exploitation dans un environnement complexe et entièrement interconnecté. Ainsi, une compréhension approfondie des dispositifs et des sous-systèmes est un point clé. Cela signifie : quelle est la structure ? Comment cela fonctionne ? comment connecter les appareils entre eux ? comment concevoir un système plus complexe avec plusieurs appareils ? Comment les modéliser pour l'optimisation et le dimensionnement ?

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Bases sur les circuits électriques, systèmes triphasés, puissances électriques

Plan détaillé du cours (contenu)

- Étude des bases des convertisseurs électromécaniques (machines électriques alternatives) pour la génération d'électricité (éolienne ou centrale hydroélectrique) et pour les applications de motorisation (pompage propulsion électrique). Modélisation pour le dimensionnement et la simulation
- Étude des bases sur les convertisseurs électroniques de puissance pour la recharge des véhicules électriques (à batterie ou hybride-rechargeable), et pour la propulsion électrique (VE, bateau, trains). Modélisation pour le dimensionnement et la simulation

Exercices

- Connexion d'une génératrice AC à un réseau électrique alternatif. Point de fonctionnement en puissance active et réactive
- Architecture d'une chaîne de conversion pour la connexion de panneaux solaires au réseau électrique
- Initiation à la simulation numérique

Déroulement, organisation du cours

Supports de présentation avec commentaires détaillés/rédigés

Les supports sont fournis en amont de la session de cours pour permettre un travail personnel en amont

Organisation de l'évaluation

75-80% de la note est donnée par un examen écrit de 2h (questions de cours+ exercice)

20-25 % de la note est donnée par les comptes-rendus des séances de laboratoire). Une absence à une séance de TP donne la note '0' pour cette séance

Support de cours, bibliographie

Seguier, Notelet, Electrotechnique industrielle, Ed Lavoisier

Seguier, Electronique de puissance, Dunod

Moyens

Cours (10h30) + sessions de laboratoire (6h) + exercices (12h)

Les cours vont se consacrer à présenter les structures et les principes de fonctionnement des dispositifs d'énergie électrique (machines électriques et convertisseurs électroniques), et la conception de leurs modèles.

La mise en application de ces systèmes et l'utilisation des modèles se fera lors des sessions de TP ou de TP.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

En sélectionnant des applications telles que (i) un système de charge d'une batterie de VE, (ii) un moteur à vitesse variable pour une utilisation industrielle (pompe) ou une propulsion électrique, et (iii) une génératrice d'une centrale hydroélectrique, l'objectif est de présenter les éléments fondamentaux pour l'étude des convertisseurs électromécaniques et à base d'électronique de puissance.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les étudiants connaîtront les composants de base pour définir une chaîne de conversion électrique. Ils seront capables de mener un premier dimensionnement du système, et pourront analyser l'intégration de ce système dans un environnement plus large.

Compétences : C1.1 ; C1.2 ; C1.4

2EL1320 – Conversion d'énergie

Responsables : **Marc Petit**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'electif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

La production et l'utilisation d'énergie ne se conçoivent désormais que dans le respect de l'environnement et de critères stricts de développement durable. Par ailleurs, la disponibilité de l'énergie sous une forme adéquate est la clé du développement de nouvelles applications dans tous les domaines, des transports à la conception d'appareils mobiles. Ainsi, l'ensemble des secteurs d'activité doivent aujourd'hui se donner les moyens de maîtriser l'énergie électrique, seul vecteur à même de répondre à ces besoins. Le cours de conversion d'énergie introduit les principaux objets, moteurs et générateurs, permettant les transformations entre énergie électrique et énergie mécanique. Il traite également des principes et dispositifs électroniques permettant d'optimiser le transfert d'énergie entre source et charge électriques. Les convertisseurs concernés sont omniprésents dans le transport d'énergie et les énergies renouvelables, mais aussi dans la plupart des objets modernes consommateurs d'électricité.

Le cours commence par le positionnement des principes et des systèmes qui vont être étudiés par rapport aux bases déjà acquises par les étudiants dans le domaine de l'énergie électrique. L'accent est mis sur les enjeux industriels et économiques de la maîtrise de l'énergie. La première partie du cours est consacrée à l'étude des machines électriques tournantes à courant alternatif, qui sont aujourd'hui des acteurs majeurs dans la production et la consommation d'énergie électrique. En s'appuyant sur les bases de l'électromagnétisme basse fréquence et de la mécanique, on introduit les principes de fonctionnement des machines synchrone et asynchrone afin d'obtenir une modélisation de type circuit utilisable en régime permanent. Il devient alors possible de dresser un bilan énergétique de la conversion et de présenter quelques modes de pilotage. Dans une seconde partie, on aborde les composants et les convertisseurs électroniques de puissance. On souligne l'intérêt du fonctionnement électronique en commutation et son lien avec les aspects topologique et thermique de la conception. Les différentes structures sont ensuite présentées en s'appuyant sur une méthodologie qui permet d'établir une classification des convertisseurs en fonction des sources et charges électriques concernées et de la réversibilité éventuelle du transfert d'énergie.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Prérequis souhaité : Cours de sciences pour l'ingénieur 1A « Energie électrique » ou équivalence

Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction

Conversion d'énergie et génie électrique

Concepts généraux sur les machines à courant alternatif

Distribution sinusoïdale de champ - Création de champ tournant - Réalisation pratique

Machine synchrone en régime permanent

Principe et réalisation pratique - Equations fondamentales - Schéma équivalent - Fonctionnement en alternateur - diagramme PQ - couplage au réseau - Utilisation en moteur

Moteur asynchrone en régime permanent

Principe et réalisation pratique - Equations fondamentales - Schéma équivalent - Mise en œuvre sur un réseau à fréquence fixe - Alimentation à fréquence variable

Bases de l'électronique de puissance

Principes des convertisseurs statiques : fonctions réalisées, structures classiques - Interrupteur idéal, interrupteurs réels : régime de commutation, pertes - Principaux composants : propriétés fondamentales, principes de commande, domaines d'utilisation, limites

Convertisseurs continu-continu

Objectifs - Hacheurs : structures fondamentales - Différents régimes de fonctionnement - Réversibilité – Applications

Convertisseurs continu-alternatif

Objectifs - Onduleurs monophasés : structures fondamentales - Modes de fonctionnement, différentes lois de commande (pleine onde et MLI) - Onduleurs triphasés

Convertisseurs alternatif-continu

Objectifs - Ponts redresseurs : montages de base en monophasé et en triphasé - Impact sur la source d'alimentation, facteur de puissance - Réversibilité, onduleur assisté

Déroulement, organisation du cours

CM(7x1H30) // TD(8x1H30) // TP(2x3H) // Examen (2H)

Les séances de TP donnent lieu à la rédaction d'un compte-rendu pour chaque groupe

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera par un examen écrit de 2 heures en deux parties :

Partie 1, questions de cours sans documents

Partie 2, exercices avec documents.

Les travaux pratiques seront pris en compte pour 20% dans la note finale du module. L'absence à une séance donnera la note 0 au TP concerné.

Support de cours, bibliographie

Seguier, Notelet, Electrotechnique industrielle, Ed Lavoisier

Seguier, Electronique de puissance, Dunod

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Marc Petit

Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 18 (pour un effectif de 72 étudiants)

Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Travaux Pratiques en binôme ou trinôme (selon effectif) en salles MF.010 (Eiffel)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables :

- D'analyser une chaîne de conversion d'énergie pour une éolienne ou pour du transport d'électricité à courant continu
- Construire une chaîne simplifiée de conversion d'énergie
- De maîtriser le fonctionnement de l'ensemble des composants de base du génie électrique
- De choisir et mettre en œuvre une machine à courant alternatif dans le cadre d'une application à vitesse stabilisée
- D'effectuer un choix de convertisseur de puissance et d'adapter structure et commande à une problématique de conversion d'énergie

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.3 Résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C1.4 Spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

2EL1410 – Transferts Thermiques

Responsables : **Gabi-Daniel Stancu**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'electif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les transferts thermiques couvrent un domaine scientifique et technique très vaste. Le champ d'application de cette discipline se caractérise entre autres par des spectres d'échelles spatiales et temporelles considérables : du nanomètre (thématique des transferts thermiques à la nanoéchelle) aux distances interstellaires (astrophysique), de la femtoseconde (réponse thermique d'un système à une impulsion laser ultracourte) aux temps caractéristiques de la genèse de l'univers (évolution thermique des étoiles). Les transferts thermiques sont également en prise directe avec des sujets de société et des enjeux majeurs tels que l'énergie (optimisation énergétique des procédés industriels, isolation thermique des bâtiments...), l'environnement (réchauffement climatique, effet de serre atmosphérique...) ou encore les transports (optimisation des moteurs thermiques, piles à combustible et filière hydrogène, ...). Ils sont par essence une discipline où les phénomènes physiques à l'œuvre sont de natures très différentes, coexistent et sont couplés.

Ce cours approfondit et étend les notions de transfert thermique introduites dans les cours « Sciences des transferts » et « Modélisation et simulation de transferts thermiques instationnaires ». Par ailleurs, l'accent est porté ici sur l'acquisition des notions de base (via des exercices d'application immédiate - EAI) et des techniques de modélisation physique des transferts (via des problèmes de synthèse - PbS).

Intérêts de la discipline :

Concevoir, maîtriser et contrôler tout système ou procédé de tout secteur d'activité où apparaissent des transferts thermiques comme l'habitat résidentiel et tertiaire, les transports, l'industrie, la production d'énergie, etc. Certaines sciences de l'univers (météorologie, géophysique, ...) ainsi que les sciences de l'environnement reposent également en partie sur la maîtrise de ces transferts.

Objectif de l'enseignement :

Aborder les principaux modes de transfert thermique dans des cas simples. Cette formation à caractère scientifique est destinée à de futurs ingénieurs généralistes, a priori non spécialistes de la discipline.

C'est un enseignement de base en : conduction stationnaire et instationnaire ; rayonnement entre corps opaques à travers un milieu transparent, convection forcée et naturelle, laminaire et turbulente (approche phénoménologique).

Le traitement d'exercices et de problèmes lors de séances de Travaux Dirigés (TD) est l'occasion d'appliquer les connaissances introduites en cours et de développer des modèles simples de bilans. Il s'agit de résoudre des problèmes industriels, environnementaux ou météorologiques concrets (démarche inductive). Certains exercices à caractère didactique introduisent, à partir d'exemples simples, des notions essentielles en transferts.

Inversement, des problèmes de synthèse sont proposés en fin d'enseignement. Dans ceux-ci, la difficulté principale est de construire le fil conducteur de la solution (confrontation au flou et à l'incertain).

Par ailleurs, de nombreux exercices d'application immédiate sont traités dans le livre de cours. Ils constituent un excellent entraînement.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

Prérequis

Idéalement, avoir suivi les cours « Sciences des transferts » (cours de sciences pour l'ingénieur 1A, SG1 ou SG3) et « » (cours spécifique : Étude et modélisation des systèmes de conversion électromagnétique et transfert thermique instationnaire énergie 1A, ST2). Cependant, les étudiants qui n'auront pas suivi les deux cours ci-dessus pourront suivre cet électif mais ils devront, en amont des séances, travailler les cours qui sont disponibles sur les plateformes E-learning « E-SELF-LEARNING »

Plan détaillé du cours (contenu)

- Cours LES BASES DES TRANSFERTS THERMIQUES : Conduction, convection rayonnement. Introduction du transfert conducto-convectif. Bilan d'énergie en régime stationnaire et sans mouvement. Analogie électrique.
o TD : (EAI) Mur entre deux fluides ; Allure du profil de température dans un système 1D; (PbS) Isolation d'un conteneur cryogénique
- Cours AILETTE ET APPROXIMATION DE L'AILETTE
o TD (EAI) : Plaque chauffée ; Refroidissement d'un circuit électronique ; (PbS) Efficacité d'un radiateur domestique ; Mesure de température d'un liquide par doigt de gant (devoir)
- Cours LES BASES DU RAYONNEMENT THERMIQUE : Notions de : corps opaque, milieu transparent, flux émis, absorbé, réfléchi, partant, incident et radiatif.
Conditions aux limites en présence d'échanges radiatifs. Notion de luminance monochromatique directionnelle. Première expression du flux radiatif. Notion et propriétés du rayonnement d'équilibre.
o TD (EAI) Calculs d'angles solides et de flux surfaciques incidents ; Calculs d'intégrales spectrales de la loi de Planck (PbS) Principe de télédétection infrarouge
- Cours LES PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET TRANSFERT RADIATIF : Caractérisation de la surface d'un corps opaque : notions d'émissivité, d'absorptivité et de réflectivité. Notions de : corps gris, corps noir et corps à propriétés radiatives isotropes. Modèles simples de transfert radiatif : (i) corps opaque convexe isotherme entouré par un corps noir isotherme ; (ii) corps opaque convexe isotherme de petites dimensions entouré par une enceinte opaque isotherme.
o TD (EAI) Rayonnement entre deux sphères ; (PbS) Température d'une surface exposée au rayonnement solaire
- Cours METHODE GENERALE DE TRANSFERTS RADIATIFS ENTRE CORPS OPAQUES A TRAVERS UN MILIEU TRANSPARENT : Hypothèses de base de la méthode. Expression du flux partant et incident. Expression du flux total partant.
Notion de facteur de forme – propriétés. Equations pour une enceinte fermée constituée de surfaces grises. Généralisation aux surfaces non grises
o TD (EAI) Rayonnement « face à face » ; (PbS) Ecran radiatif - Mesure de température par thermocouple
- Cours CONDUCTION INSTATIONNAIRE ET PHYSIQUE DE LA DIFFUSION (1/2): Equation de bilan d'énergie et conditions aux limites. Notion de diffusivité thermique
Théorèmes généraux : théorème de superposition et théorème Π . Application à une géométrie semi-infinie (réponse aux temps courts) : problèmes de la température imposée, du flux imposé et du régime périodique forcé
o TD (EAI) Mise en équation d'un problème de conduction instationnaire 2D; Conduction instationnaire 1D – solution analytique dans le cas du flux imposé ; (PbS) Inertie thermique d'un bâtiment (1/2)
- Cours CONDUCTION INSTATIONNAIRE ET PHYSIQUE DE LA DIFFUSION (2/2): Application à une géométrie semi-infinie (réponse aux temps courts – suite) : problème de la mise en contact thermique de deux corps. Cas des milieux d'extension finie. Temps caractéristiques de conduction et de transfert conducto-convectif, nombre de Biot et retour sur l'approximation de l'ailette
o TD (EAI) Refroidissement d'une bille transparente ; (PbS) Inertie thermique d'un bâtiment (2/2); Traitement thermique de l'acier par laser
- Cours APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE DE LA CONVECTION FORCEE EXTERNE : Flux de diffusion (à une paroi) et de convection (au loin). Notion de viscosité d'un fluide. Problème académique de la plaque plane à température imposée. Analyse dimensionnelle. Allure générale d'une corrélation de convection forcée externe. Introduction et significations physiques des groupements adimensionnés caractéristiques. Notion de similitude en convection. Critères de transition entre régimes laminaire et turbulent dans des configurations standard. Evolution du coefficient de transfert local le long d'une plaque ; effet de bord d'attaque.
o TD (EAI) Baie vitrée en convection forcée externe ; (PbS) Conducteur, prudence – problème instationnaire
- Cours LES NOTIONS DE CONVECTION FORCEE INTERNE : Notions élémentaires sur les établissements des régimes (mécanique et thermique) et sur les régimes établis dans les conduites de section constante. Notion de température de mélange. Expression du nombre de Nusselt en régimes laminaire et turbulent pour des

écoulements en conduite de section circulaire ; discussion physique des résultats. Cas des conduites de section non circulaire ; notion de diamètre hydraulique.

o TD (EAI) Calcul du coefficient de transfert dans un canal semi-circulaire ; (PbS) L'hélium comme fluide caloporteur ; Circulation d'eau dans un tube (devoir)

• Cours ANALYSE DIMENSIONNELLE EN CONVECTION NATURELLE : Phénomène – approximation de Boussinesq. Couches limites mécanique et thermique. Analyse dimensionnelle – similitude. Critère de transition entre régimes laminaire et turbulent. Expressions du coefficient de transfert. Spécificités de la convection naturelle interne. Caractère itératif d'un calcul de convection naturelle.

o TD (PbS) Etude thermique d'un double vitrage

o TD PROBLEMES DE SYNTHESE (PbS) Récupérateur d'énergie pour le résidentiel-tertiaire ; Climatisation d'un local dans un pays chaud et ensoleillé (devoir)

• EXAMEN FINAL

Déroulement, organisation du cours

Le cours est proposé en SG6 (occurrence en anglais) et SG8 (occurrence en français) à travers 19 créneaux de 1h30 chacune, 3 éléments de préparation en distanciel (3 x 1h30) et une séance d'examen de 2h.

Organisation de l'évaluation

Les deux premiers acquis d'apprentissage constituent le niveau de connaissance minimal attendu de la part de tout étudiant ayant suivi ce cours. Ils seront évalués en contrôle continu au fil de l'enseignement par de petits QCMs. Ces tests, non notés, permettront aux étudiants de s'autoévaluer et aux enseignants de mesurer le niveau de compréhension de certaines notions fondamentales et de détailler les points difficiles. Concernant l'activité de modélisation des systèmes thermiques, il s'agit là d'une compétence complexe à acquérir, à laquelle les étudiants s'initieront lors des séances de TD et qu'ils maîtriseront progressivement. La dernière séance de l'enseignement sera l'occasion de consolider tous les acquis de modélisation. Les acquis d'apprentissage seront évalués lors de l'examen final (2H) qui comportera deux parties. La première portera sur l'évaluation du niveau d'acquisition des deux premiers acquis d'apprentissage. Dans la deuxième on soumettra les étudiants à un problème de modélisation a priori complexe pour évaluer l'acquis de modélisation des systèmes thermiques.

La compétence C1.2 est validée si l'étudiant accomplit au moins 50% de la partie 2 de l'examen final. La compétence fondamentale C2.1 est validée si l'étudiant accomplit au moins 50% de la partie 1 de l'examen final. La note finale est la moyenne des notes des deux parties de l'examen.

Support de cours, bibliographie

- Livre en Anglais : « A first course in heat transfer » J. Taine, E. Iacona Editions Dunod 2011.
- Livre en Français : « Transferts Thermique » Partie 1, J. Taine, F. Enguehard, E. Iacona, Dunod 2014
- Plateforme « E-Self-Learning » en Anglais : <http://e-mentor-en.ecp.fr/> cours présenté par G.D. Stancu
- Plateforme « E-Self-Learning » en Français : <http://e-mentor2.ecp.fr/> cours présenté par J. Taine

Moyens

- Equipe enseignante (noms des responsables) : Gabi Daniel Stancu, Benoit Goyeau
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
- Plateformes « E-Self-Learning » en Français et en Anglais
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaire : aucun
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : aucune

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les élèves :

- Sauront identifier les différents modes de transfert thermique à l'œuvre dans une configuration donnée,
- Sauront écrire et utiliser les bilans d'énergie appropriés sous leurs formes locale et globale et les équations de continuité aux interfaces, et pourront ainsi déterminer les champs de flux thermique et de température d'un système permettant ainsi de calculer les caractéristiques locales et globales nécessaires au dimensionnement du système,
- Auront acquis une pratique de l'activité de modélisation des systèmes thermiques :
 - Lister de manière exhaustive les phénomènes de transfert thermique à l'œuvre dans une configuration donnée,
 - Utiliser l'analyse d'échelle pour : (i) faire des estimations d'ordres de grandeur permettant de discriminer les phénomènes prédominants de ceux qui peuvent être ignorés ; (ii) simplifier des problèmes a priori en géométries tridimensionnelles et/ou instationnaires vers des modèles avec des solutions analytiques,
 - Utiliser une approche inductive de résolution des problèmes : poser des hypothèses pertinemment justifiées qui seront validées a posteriori par les solutions résultantes,
 - Reformuler un problème multi-physiques et multi-échelles avec des phénomènes de couplage complexe, en une version simplifiée dans laquelle seuls les phénomènes prédominants auront été retenus,
 - Modéliser des systèmes thermiques complexes et utiliser les bilans fondamentaux pour résoudre des problèmes d'ingénieur.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 « Choisir le modèle adapté (parmi plusieurs possibles) pour un problème donné grâce aux bons choix d'échelle de modélisation et d'hypothèses simplificatrices »

C2.1 « Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi, via les enseignements de 2A»

2EL1420 – Mécanique des fluides

Responsables : **Ronan Vicquelin, Morgan Chabanon**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours vise à approfondir et structurer les compétences en mécanique des fluides acquises en première année, pour permettre une compréhension fine de la dynamique des écoulements et des phénomènes physiques qui les gouvernent. Il constitue une étape essentielle dans la formation de l'ingénieur généraliste, en consolidant les bases scientifiques nécessaires à l'analyse, la modélisation et la maîtrise des systèmes où les fluides jouent un rôle central. Le cours permet d'atteindre un niveau confirmé dans cette discipline et les applications concernées avant d'envisager des études plus avancées et spécialisées.

Discipline transverse par excellence, la mécanique des fluides est au cœur d'enjeux technologiques et sociétaux majeurs : transition énergétique (conversion, stockage et transport d'énergie), mobilité (aérodynamique, propulsion, écoulements internes), santé, environnement (dispersion atmosphérique, qualité de l'air, climat), ou encore procédés industriels. Une compréhension avancée de ces phénomènes fluides est également incontournable via les évolutions modernes de la discipline : simulation haute-fidélité, modélisation multi-échelle ou analyse de données expérimentales complexes.

Le cours développe une approche équilibrée entre compréhension physique des écoulements, théorie et pratique. Il est organisé en trois blocs complémentaires. Le premier approfondit les notions fondamentales à l'aide d'outils théoriques, expérimentaux et numériques pour résoudre, caractériser et analyser les champs fluides. Cette partie couvre une classe générale de situations tout en introduisant des écoulements plus complexes (instationnarités, turbulence). Le deuxième bloc est consacré aux écoulements compressibles dans différents régimes (subsonique, supersonique, ondes de choc), ouvrant ainsi l'accès à un vaste champ d'applications liées à l'aérodynamique haute-vitesse. Enfin, dans le troisième bloc, les étudiants choisissent un domaine d'application afin d'explorer plus spécifiquement un secteur parmi : aérodynamique, météorologie et climat, propulsion spatiale, systèmes énergétiques, ingénierie environnementale, etc.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

Prérequis

Les notions et compétences essentielles liées à la mécanique des fluides vu dans le cours de Sciences des Transferts sont un prérequis.

- Analyse dimensionnelle
- Bilans locaux et macroscopiques de transport de masse, espèces, quantité de mouvement et énergie
- Evolution entre des différents champs (vitesse, pression, température) et leurs interactions
- Calcul d'efforts (locaux ou intégrés), puissances, rendements, pertes de charges
- Couche limite

Pour les quelques élèves qui n'ont pas suivi Sciences des Transferts mais qui souhaiteraient tout de même suivre le cours de Mécanique des Fluides : il est impératif de travailler ces concepts et applications-clé avant de rejoindre le cours. Contactez le responsable de cours le cas échéant pour récupérer l'accès aux ressources mises à disposition pour rattraper.

Plan détaillé du cours (contenu)

Bloc n°1 : Mécanique des Fluides avancée (4 séances de 3h00)

Séance 1 : Equations fondamentales et Ecoulements potentiels

Rappel des équations-bilan locales, calcul des grandeurs d'intérêt, analyse dimensionnelle. Propriétés des écoulements incompressibles. Solutions analytiques classiques : Couette, Poiseuille, Tourbillon. Ecoulements potentiels.

TD : Ecoulement autour d'une sphère.

Séance 2 : Solutions analytiques et profil exact de Couche Limite

Méthodes de résolution analytique des équations (suite) : Fonction de courant, Autosimilarité. Application à la détermination du profil de couche Limite sur une plaque plane. Extension des écoulements potentiels. Notions sur les expériences et simulations numériques pour la caractérisation de champs de vitesse.

TD : Dispersion de polluants dans l'atmosphère ; Ecoulement devant un plan d'arrêt

Séance 3 : Bilans macroscopiques et conditions de saut aux interfaces

Rappel sur les bilans macroscopiques et expressions de la poussée d'un turboréacteur et d'une fusée.

Approfondissement : écriture de nouveaux bilans, bilan sur entrée/sortie non-homogène. Résolution d'un problème ouvert. Conditions de saut à travers une interface. Notions de tension superficielle.

TD : Etude du ressaut hydraulique

Séance 4 : Instabilités et Turbulence

Types d'écoulements instationnaires. Ondes acoustiques et vagues. Exemples d'instabilités. Démarche pour l'analyse d'instabilités. Application Couche Limite et Transition turbulente. Description des écoulements turbulents (Cascade de Kolmogorov, approches DNS, RANS, LES). Problème de fermeture et Hypothèse de Boussinesq.

TD : Instabilités d'interfaces ; Ressources de calcul pour une simulation directe

Bloc n°2 : Ecoulements compressibles (4 séances de 3h00)

Séance 5 : Dynamique des gaz - écoulements isentropiques

Ecoulements isentropiques de gaz réels. Conditions d'arrêt isentropiques. Ecoulements avec section de passage variable. Ecoulements isentropiques de gaz parfaits. Equations fondamentales pour écoulements isentropiques de gaz parfaits.

TD : Calcul de grandeurs d'arrêt dans une tuyère convergente-divergente ; Etude d'une entrée d'air

Séance 6 : Conditions critiques et rendements isentropiques

Conditions critiques isentropiques. Section critique et phénomène d'amorçage. Expression débit pour un écoulement compressible. Transformations réelles et Rendements isentropiques. Systèmes propulsifs.

TD : Analyse d'un turboréacteur à simple flux

Séance 7 : Ondes de choc

Equations fondamentales pour les ondes de chocs droits. Expressions pour les gaz parfaits. Propriétés de l'écoulement au travers d'un choc droit. Perturbations faibles des écoulements supersoniques.

TD : Etude d'un statoréacteur élémentaire

Séance 8 : Chocs obliques et écoulement dans les tuyères

Ondes de choc obliques. Régimes d'écoulement dans les tuyères convergentes-divergentes pour diverses valeurs du rapport de détente. Souffleries supersoniques.

TD : Entrée d'air d'un jet supersonique ; Soufflerie à basse densité

Bloc n°3 : Ouverture thématique (trois séances)

Au choix parmi plusieurs thématiques proposées. Par exemple : Aérodynamique, Ecoulements météorologique et climatique, Propulsion aéronautique et spatiale, Systèmes énergétiques, Environnement, ...

Les thèmes proposés en 2023-2024 étaient :

- Aérodynamique
- Propulsion Aéronautique
- Propulsion Spatiale
- Circulation atmosphérique
- Environnement et Qualité de l'air
- Hypersonique
- Computational Fluid Dynamics

Ces thèmes sont variables d'une année à l'autre. Ils seront présentés dès la première séance pour l'année en cours.

Déroulement, organisation du cours

Un équilibre est recherché entre une présentation de la physique des phénomènes, la discussion des aspects qualitatifs, l'introduction des concepts, de la modélisation, de l'écriture des équations et de leur résolution. Le choix des problèmes traités résulte d'un compromis difficile entre l'importance respective des sujets et le temps réduit disponible. Sur le plan pédagogique, le cours s'appuie sur une utilisation de tous les moyens audiovisuels : développements complets au tableau, expériences en amphi, illustrations et démonstrations sur ordinateur, projections multiples, films de mécanique des fluides, des sessions de résolution de problèmes en Petites Classes (« problem solving workshops »). Les problèmes abordés en PC sont proposés comme travail personnel en dehors des séances.

Le cours est programmé sur 10 séances de 3h (cours magistral puis classes de TD) et une séance d'examen.

L'activité comprend ainsi :

7 séances communes de cours en amphithéâtre, + 1 séance en vidéo

7 séances de problem-solving workshop réparties en Petites Classes + 1 séance à travailler à distance. Les étudiants sont répartis en groupes homogènes dans des salles de 30-35 personnes et encadrés par des assistants,

Un contrôle continu sous la forme d'un test de connaissance à la 4^{ème} et 6^{ème} séances,

3 séances en blocs thématiques

un contrôle final écrit d'une durée de 2h.

une évaluation des blocs thématiques

Langues

Cours SG6 : Français + petite classe en anglais

Par défaut, l'ensemble des élèves suivent le cours en Français en amphithéâtre.

Avant le début du cours, un message est envoyé aux élèves pour leur permettre, s'ils le souhaitent, de rejoindre une petite classe intégrée où tout le cours est réalisé en anglais.

Cours SG8 : Anglais

Le cours de SG8 est proposé uniquement en anglais. L'offre en bloc thématique est réduite.

Organisation de l'évaluation

3 évaluations à travers les différents blocs :

Bloc 1 (20%) : questionnaires (2 x 15 min.) de connaissances

Les contrôles des connaissances ont pour but la vérification des notions acquises durant le premier bloc du cours.

L'étudiant obtient une **note CA sur 20**. La présence à ces tests est obligatoire. Toute absence justifiée amène à repasser un questionnaire-test en dehors des séances prévues. En cas d'absence non-justifiée auprès de l'équipe pédagogique, la note de 0 sur 20 est attribuée à CA.

Bloc 2 (50 %) : contrôle écrit surveillé lors du dernier créneau de cours

Le contrôle écrit final est de 2h00. Dans l'absolu, l'ensemble des éléments du cours hors bloc thématique est au programme. En pratique, le sujet portera essentiellement sur le contenu du bloc n°2 lié aux écoulements compressibles. Le contrôle est réalisé avec tout document écrit autorisé. L'étudiant obtient une **note CF sur 20**.

Bloc 3 (30%) : évaluation bloc thématique

L'évaluation du bloc thématique porte sur un projet spécifique démarré en séance sur un sujet technique et scientifique lié à la thématique étudiée. La démarche et les résultats du projet sont rapportés au format spécifique demandé par le bloc (poster, présentation ou rapport). L'étudiant obtient une note CB sur 20 déterminée à partir de trois critères globaux déclinés dans chaque bloc:

CB.1 (4 points) : Forme, clarté et structure

CB.2 (7 points) : Engagement personnel en séance, travail continu en séance et en dehors, investissement particulier

CB.3 (9 points) : Qualité de l'étude, appréciation du travail, des résultats et analyses

La note finale correspond à l'arrondi de la note obtenue après application de la formule

$$NF = 0,5 \times CF + 0,3 \times CB + 0,2 \times CA$$

Une session bis est organisée plus tard dans l'année (juin les années précédentes). Dans ce cas, seule la note obtenue lors de ce contrôle de rattrapage est prise en compte. Les notes CA ou CB ne sont alors pas considérées.

Pour les élèves partant en S8 anticipé, leur absence à l'examen de session 1 est excusée et une dérogation au bloc thématique est accordée. La note finale est alors calculée comme $0,65 \times CF + 0,35 \times CA$, où CF est la note obtenue lors de l'examen de deuxième session.

Support de cours, bibliographie

Mécanique des Fluides, Tome I & II, S. Candel

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Modéliser des systèmes complexes, étape nécessaire à leur dimensionnement et leur optimisation :
 - Faire des approximations et des estimations d'ordres de grandeur,
 - Simplifier un problème d'apparence compliquée
 - Utiliser les bilans fondamentaux pour résoudre des problèmes d'ingénieur.
- Caractériser un système mettant en jeu un écoulement fluide à l'aide de plusieurs éclairages : solutions analytiques simplifiées, résultats de simulations numériques, données expérimentales.
- Décliner ces compétences dans des écoulements complexes (instationnaires, compressibles)
- S'approprier un champ disciplinaire et/ou applicatif connexe à la mécanique des fluides, lui permettant de démontrer qu'il/elle sait s'adapter à un nouveau contexte avec une certaine autonomie grâce à son niveau de maîtrise.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences liées au cursus CentraleSupélec :

Le cours émerge dans l'acquisition des compétences C1 et C2 du cursus ingénieur CentraleSupélec.

- C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
 - C1.2 : Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
- C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
 - C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique
 - C2.3 : Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires
 - C2.4 : Produire des données et développer de la connaissance selon une démarche scientifique

La compétence C1 est validée si $CF \geq 10$.

La compétence C2 est validée si les deux conditions suivantes sont respectées : $NF \geq 10$ et $CB \geq 12$.

2EL1430 – Ingénierie Nucléaire

Responsables : **Pascal Yvon, Didier Clouteau**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est destiné à apporter des connaissances de base sur le fonctionnement des réacteurs nucléaires et le cycle du combustible nucléaire civil. Il permettra aux élèves d'apprécier, sur un plan technique, économique et environnemental, les avantages et inconvénients de cette source d'énergie bas carbone, et sa place dans le paysage énergétique mondial actuel et futur.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Notions de physique et de chimie

Plan détaillé du cours (contenu)

- Principes de la fission nucléaire
- Fonctionnement des réacteurs à eau sous pression
- Interactions neutrons matière
- Les systèmes nucléaires de 4ème génération et les Small Modular Reactors
- Ressources naturelles et secondaires, activités minières, "yellow cake", chimie de l'uranium
- Enrichissement de l'uranium : technologies de séparation isotopique (diffusion gazeuse, centrifugation, autres ...)
- Fabrication du combustible et comportement en réacteur
- Economie circulaire, retraitement et gestion des déchets : le recyclage des combustibles usés
- Transport des matières nucléaires
- Développements futurs et R&D: une énergie jeune, déjà éprouvée et avec encore des promesses

Déroulement, organisation du cours

28,5 h de cours en amphi

4,5 de travail personnel en amont des cours

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu à la fin de chaque cours (50% de la note) Contrôle écrit de 2 heures (avec documents) (50% de la note) - Oral de rattrapage

Support de cours, bibliographie

Documents, vidéos disponibles sur edunao

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Principes de fonctionnement des réacteurs à eau sous pression

- Abondance des ressources en uranium, seul élément fissile naturel
- Introduction aux technologies d'extraction minière, d'enrichissement et de retraitement du "combustible" nucléaire
- Impact de l'irradiation neutronique sur la microstructure et le comportement des matériaux
- Fabrication et comportement en réacteur du combustible nucléaire
- Problématiques et solutions de gestion des déchets radioactifs
- Perspectives de développement futur des procédés et technologies nucléaires (Génération IV, SMR)

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Bonne compréhension du fonctionnement des réacteurs à eau sous pression et du cycle du combustible.
Compréhension des enjeux liés à la production d'électricité et de la place de l'énergie nucléaire dans un mix bas carbone.

C1.1: Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

2EL1440 – Modélisation et simulation numérique des milieux réactifs

Responsables : **Benoît Fiorina**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les milieux réactifs couvrent un vaste champ d'études qui s'inscrivent parfaitement dans le contexte énergétique et environnemental actuel. D'un point de vue scientifique, les milieux réactifs englobent la combustion et les plasmas. Représentant 80% des modes de conversion de l'énergie primaire, la combustion est présente dans le secteur de l'énergie, des transports et des procédés. Quant aux plasmas, ceux-ci représentent plus de 99% de la matière visible de l'univers. Ils interviennent dans de très nombreuses applications industrielles : énergétique, fabrication de semi-conducteurs, procédés de transformation et de traitement, santé.

L'objectif de ce cours est d'introduire les notions de bases de la combustion et des plasmas. Il vise notamment à sensibiliser les étudiants à la modélisation numérique qui est au cœur des stratégies de recherche et développement de l'ingénierie des systèmes réactifs. Afin d'illustrer le champ d'application des milieux réactifs dans le domaine de l'énergie, les étudiants construiront un outil numérique multi-physique pour simuler une technologie émergente et prometteuse : la combustion assistée par plasma d'une turbine à hydrogène.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction générale : applications industrielles et enjeux scientifiques
 - a. Combustion - (1h30)
 - b. Plasmas – (1h30)
2. Description d'un système réactif
 - a. Cours (1h30)
 - i. Rappels de thermodynamique chimique
 - ii. Richesse d'un mélange
 - iii. Calcul de la température de fin de combustion
 - b. TD (1h30) "Decreasing CO2 emissions by addition of di-hydrogen"
3. Formation aux outils numériques du cours
 - a. Initiation à Matlab (1h30)
 - i. Fonctions de base de Matlab
 - ii. Utilisation du package cinétique
 - b. TD (1h30) "Computation of adiabatic combustion temperature of H2-O2 and H2-air reactive systems under global-step reaction assumption"

4. Équilibre thermochimique
 - a. Cours (1h30)
 - i. Second principe de thermodynamique
 - ii. Méthodes de calculs de l'équilibre thermochimique
 - b. TD (1h30) "Computation of equilibrium composition in H₂-O₂ and H₂-air reactive systems "
5. Cinétique chimique de la combustion
 - a. Cours (1h30)
 - b. TD (1h30) "Computation of auto-ignition in a constant pressure reactor"
6. Production de plasma par décharges électriques
 - a. Cours (1h30)
 - b. TD et démonstrations expérimentales (1h30)
7. Cinétique chimique à deux températures dans les plasmas
 - a. Cours (1h30)
 - b. TD (1h30)
8. Optimisation énergétique des décharges
 - a. Cours (1h30)
 - b. TD (1h30)
9. Combustion assistée par plasma
 - a. Expériences et modèles (0h45)
 - b. Simulations (0h45)
 - c. Visite du laboratoire EM2C et présentation du mini-projet (1h30)
10. Mini-projet : simulation numérique de la combustion assistée par plasma (3h00)
11. Mini-projet : simulation numérique de la combustion assistée par plasma (3h00)

Déroulement, organisation du cours

Cours, travaux dirigés et travaux sur ordinateurs

Organisation de l'évaluation

Une soutenance sous forme de présentation orale.

Support de cours, bibliographie

- Nasser Darabiha, Emile Esposito, François Lacas et Denis Veynante, Poly de combustion de CentraleSupélec.
- Kenneth Kuo, Principle of Combustion, published by John Wiley & Son, 2005
- Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Michael A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg, John Wiley and Sons, New York, 2nd edition, 2005
- Partially Ionized Gases, M. Mitchner and C.H. Kruger, John Wiley & Sons, New York, 1973.
- Gas Discharge Physics, Yu. P. Raizer, Springer Verlag, Berlin, 1997

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Benoît Fiorina, Christophe Laux

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Pour dimensionner des systèmes réactifs, un ingénieur est amené à faire des approximations et à calculer des ordres de grandeurs. Il doit calculer des bilans de masse, d'espèces chimiques et d'énergie. Il doit déterminer l'équilibre thermochimique d'un système réactif et savoir exploiter les déséquilibres thermochimiques. En particulier, ce cours apporte les compétences suivantes :

- Comprendre les enjeux industriels, énergétique et environnementaux de la combustion et des plasmas
- Être capable d'établir les équations fondamentales permettant de dimensionner des systèmes de combustion et de plasmas
- Caractériser les états thermodynamiques et chimiques transitoire et d'équilibre d'un système réactif
- Être capable de programmer (sous environnement Matlab) un outil de simulation numérique de réacteurs chimiques avec prise en compte d'une cinétique détaillée. Le code développé par l'étudiant s'appuiera sur une bibliothèque MATLAB de fonctions thermochimiques préexistantes.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences acquises : C1, C2 et C6

Evaluations des compétences :

- Restitution écrite des résultats obtenus à l'issue de la réalisation des TD
- Présentation orale des résultats obtenus à l'issue du mini-projet

2EL1450 – Cours d'analyse structurelle

Responsables : **Karim Tarbali**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Comprendre comment les structures se comportent et si elles peuvent supporter leur propre poids et protéger les humains contre les facteurs environnementaux tels que les tremblements de terre, les tempêtes, les glissements de terrain, etc. est crucial pour concevoir des systèmes structurels sûrs et rentables.

Les méthodes permettant de déterminer les efforts internes et les réactions de support des systèmes structurels classiques et modernes seront au centre de ce cours. La connexion des concepts et méthodes fondamentaux avec les algorithmes utilisés dans les logiciels d'analyse structurelle (dans la pratique de l'ingénierie) sera abordée.

Les cours se concentreront sur le développement d'ensembles de compétences pour identifier les comportements du système et analyser les structures à l'aide de méthodes d'analyse appropriées. Des exemples de cas seront résolus dans le cadre du processus d'enseignement-apprentissage lors des cours magistraux et des séances de TD. Des projets pratiques et à emporter seront définis tout au long du cours et les étudiants sont encouragés à y travailler progressivement au cours du cours. Les projets impliquent des calculs manuels, une modélisation logicielle, des vérifications des résultats et des jugements techniques. Il y aura également des devoirs tout au long du cours pour renforcer les concepts abordés en classe.

Remarque 1 : toutes les activités du cours se dérouleront en anglais. Les étudiants doivent communiquer et remettre leurs devoirs, rapports de projet et examen final en anglais.

Remarque 2 : Les TD (c'est-à-dire les séances de laboratoire) seront menés dans la continuité des cours magistraux, axés sur la résolution pratique de problèmes. Les étudiants doivent participer à l'étape de développement de la solution via des discussions et en transmettant leurs idées au tableau (c'est-à-dire une séance de discussion interactive sur l'ingénierie parallèlement à un cadre de partage de connaissances et d'expériences).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Mécanique (pour les étudiants de CentraleSupélec)

Statique, résistance des matériaux (ou génie mécanique) pour les étudiants internationaux

Plan détaillé du cours (contenu)

- Concepts généraux de réponse statique, comportement élastique, inélastique, linéaire, non linéaire
- Équations d'équilibre ; Supports, réactions et diagrammes de corps libre ; Stabilité et détermination des réactions ; Calcul des forces de réaction
- Force de cisaillement et moment de flexion ; Relations entre charge, effort tranchant et moment fléchissant ; Principe de superposition
- Indétermination et stabilité ; Résolution aux joints des fermes ; Méthode de coupe ; Structures spatiales statiquement déterminées ; Structures articulées rigides
- Déflexion par intégration directe ; Méthode du faisceau conjugué
- Tutoriel OpenSEES-py
- Méthode de travail virtuel sur fermes et charpentes
- Méthodes moment-aire ; le théorème réciproque de Maxwell ; Théorème de Castigliano
- Méthode de distribution des moments ; méthode de déviation de pente
- Méthode de flexibilité
- Méthode de rigidité
- Méthode matricielle d'analyse structurelle ; approches et hypothèses dans les analyses informatiques
- Flambage
- Méthodes d'analyse structurelle approximatives (jugements techniques)

Déroulement, organisation du cours

Cours interactifs, apprentissage basé sur des projets et des devoirs

Organisation de l'évaluation

La note finale sera déterminée à l'aide des notes de :

- Les devoirs et Les projets (45 % de la note finale).
- Examen final de 2 heures. Les étudiants sont autorisés à apporter une feuille A4 de notes d'appui à l'examen final (55 % de la note finale).

Remarque : ces trois éléments d'évaluation sont obligatoires pour satisfaire aux exigences du cours.

Support de cours, bibliographie

Manuels et matériel :

- Structural Analysis, Hibbeler
- Structural Analysis: In Theory and Practice, Williams
- Vector Mechanics for Engineers – Statics, Beer et. al
- Mechanics of Materials, Hibbeler
- Matrix Methods of Structural Analysis, Nagarajan

N'importe quelle édition de ces manuels fonctionnera.

Inutile d'acheter ces livres si vous ne les trouvez pas en bibliothèque. Du matériel supplémentaire et des notes de cours seront téléchargés sur Edunao pour vous aider avec les sujets du cours.

Moyens

Manuels et matériel :

- Structural Analysis, Hibbeler
- Structural Analysis: In Theory and Practice, Williams
- Vector Mechanics for Engineers – Statics, Beer et. al.
- Mechanics of Materials, Hibbeler
- Matrix Methods of Structural Analysis, Nagarajan

N'importe quelle édition de ces manuels fonctionnera.

Inutile d'acheter ces livres si vous ne les trouvez pas en bibliothèque. Du matériel supplémentaire et des notes de cours seront téléchargés sur Edunao pour vous aider avec les sujets du cours.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Démontrer une compréhension des systèmes linéaires, non linéaires, déterminés et indéterminés
- Analyser les structures de fermes et de charpentes pour déterminer la réaction et les forces internes utilisées dans les processus de conception
- Utiliser des méthodes d'analyse classiques et des approches de rigidité et de flexibilité pour les analyses structurelles.
- Créer des liens conceptuels entre les calculs manuels et le flux de travail informatique du logiciel et effectuer des vérifications

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Identifier les systèmes structuraux déterminés et indéterminés et leur condition de stabilité
- Les comportements matériels et géométriques, linéaires et non linéaires
- Calculer la réaction et les efforts internes des fermes et les déformations de leurs éléments
- Appliquer les méthodes d'intégration directe, de distribution des moments et de déflexion de pente aux structures de charpente pour déterminer leur déformation
- Expliquer et appliquer les méthodes de rigidité et de flexibilité et les comparer
- Simuler la réponse des systèmes structurels via OpenSEES base de code
- Déterminer la force de flambement pour diverses conditions aux limites
- Fournir un rapport d'analyse structurelle comprenant des tracés de vérification et des commentaires sur les comportements du système à l'aide de résultats numériques et de jugements techniques.

2EL1520 – Génie logiciel orienté objet

Responsables : **Paolo Ballarini, Dominique Marcadet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le génie logiciel regroupe des concepts, techniques et outils visant la production de logiciels de qualité, en maîtrisant le coût et le délai de développement tout en prenant en compte les contraintes classiques des systèmes informatiques actuels : respect des exigences et des standards, ouverture, facilité de test et de maintenance, évolutivité. Java est l'un des langages de programmation les plus utilisés pour le développement d'applications informatiques.

En mettant l'accent sur la modélisation orientée objet, le langage java, le langage UML, en relation avec les phases du processus de développement de logiciels menant de l'expression du besoin au produit final testé et documenté, ce cours apporte aux étudiants des compétences de base indispensables à la réalisation de logiciels industriels.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 en français et SG8 en anglais

Prérequis

- 1CC1000 : Systèmes d'Information et Programmation
- 1CC2000 : Algorithmique et Complexité

La connaissance de Python ou d'un autre langage de programmation est fortement recommandée.

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction, notions de base du langage Java
- Classes Java, bases de l'API Java
- Héritage en Java, classes abstraites, interfaces
- Introduction Génie logiciel, UML
- Diagrammes de classes avec UML, liens avec Java
- Autres diagrammes UML
- Compléments Java (exceptions, généricité, énumérations...)
- Patrons de conception, exemples sur API Java
- Introduction à la réalisation d'interfaces graphiques en Java
- Tests unitaires avec JUnit
- Processus légers et synchronisation
- Mise en œuvre UML/Java sur un projet

Déroulement, organisation du cours

- Cours magistraux : 13h30 (SG6) - 13h30 (SG8)
- Travaux dirigés sur ordinateur : 15h00 (SG6) - 15h00 (SG8)
- Travail personnel (dont projet intégré) : 28h30
- Examen final : 2h00

Organisation de l'évaluation

40% sur le projet intégré 60% sur l'examen final (2h00)

Support de cours, bibliographie

- Livres
 - Java et Eclipse - Développez une application avec Java et Eclipse - Frédéric Déléchamp
 - UML 2.5 par la pratique - Etudes de cas et exercices corrigés - Pascal Roques
- Supports
 - Transparents projetés pendant les cours magistraux
 - Exercices et corrigés des travaux dirigés

Moyens

- Enseignant des cours magistraux : Dominique MARCADET
- 4 groupes de travaux dirigés, encadrants : Idir AIT SADOUNE, Francesca BUGIOTTI, Dominique MARCADET, Joanna TOMASIK
- Outils logiciels : Java : Eclipse, UML : Modelio

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce module, les élèves seront capables :

- De mettre en œuvre les principaux éléments de la programmation orientée objets en utilisant le langage Java ;
- D'écrire un programme informatique de complexité moyenne en utilisant le langage Java ;
- De connaître les différentes activités d'un cycle de développement logiciel et savoir choisir des outils adaptés pour ces activités ;
- De choisir le niveau d'abstraction approprié à la réalisation d'une activité ;
- De connaître et comprendre l'utilité de la modélisation UML dans la conception et la réalisation d'un logiciel
- De concevoir et réaliser une interface homme-machine simple ;
- D'appliquer des principes de bonne conception pour le développement des logiciels évolutifs et facilement maintenables ;
- De comprendre l'utilité de la programmation parallèle et savoir utiliser les outils nécessaires à sa mise en œuvre.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

C6.3 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel

2EL1540 – Informatique théorique

Responsables : **Marc Aiguier, Pascale Le Gall**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement donne une partie des fondements de la science informatique sur ses deux paradigmes de calcul que sont la réduction (calcul pas à pas) et la résolution (inférence logique/démonstration automatique).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Cours Algorithmes et Complexité (ST Modélisation)

Goût pour l'abstraction mathématique et pour le raisonnement

Plan détaillé du cours (contenu)

Il sera alors abordé dans ce cours les notions fondamentales sous-jacentes aux thèmes

- De l'induction et la récurrence (ensemble bien-fondé et équivalence avec l'induction mathématique). L'objectif est de formaliser les notions fondamentales d'induction et récursivité sous-jacentes à toutes les mathématiques discrètes.
- De l'algorithmique (fonctions récursives de Gödel/Herbrand, machine de Turing et tous les résultats d'indécidabilité associés). L'idée est de définir formellement (i.e. mathématiquement) ce qu'est un problème de décision et donner une dénotation formelle à la notion d'algorithme (thèse de Church).
- De la logique (syntaxe, sémantique et systèmes de preuves). L'intérêt des logiques est d'exprimer de façon formelle les propriétés des systèmes et de raisonner, de façon automatique ou assistée, à propos de ces propriétés. Les logiques propositionnelles et du premier ordre seront détaillées.
- Le cours est composé des parties suivantes :
- Fondements de l'induction et la récursivité.
- On y abordera plus particulièrement les notions de : Théorie des ensembles : Ordre et préordre, Majorants et minorants, Ensembles bien fondés et induction ; Systèmes formels, preuves, correction et complétude.
- Logique propositionnelle.
- La logique propositionnelle sera présentée selon les composantes classiques : syntaxe, sémantique et preuve. En particulier, les points suivants seront abordés : arbres binaires de décision, méthode des tableaux, algorithme DPLL, satisfiabilité des formules propositionnelles (problèmes SAT et 3-SAT), SAT-solveurs, les systèmes de preuve de la résolution, déduction naturelle, séquents.
- Théorie de la calculabilité et de la complexité.
- On verra plus précisément : les fonctions primitives récursives, les fonctions récursives, les problèmes décidables, indécidabilité du problème de l'arrêt, fonction récursive universelle (interpréteur) ; les machines de Turing, théorèmes d'équivalence, thèse de Church ; la théorie de la complexité en lien avec les modèles de calcul (complexité en temps, classes P et NP, structuration de la classe NP - problèmes NP-complets et NP-durs, un premier problème NP-complet) ; la décidabilité et NP-complétude du problème 3-SAT.
- Logique des prédicats. La logique des prédicats est une extension de la logique propositionnelle et est la logique privilégiée pour décrire les structures de données informatiques. On verra que la logique des prédicats est indécidable et la programmation logique sera introduite.

Déroulement, organisation du cours

Le cours sera divisé en 13,5h de cours magistraux et 15h de tds.

Un ou plusieurs travaux personnels (projet avec réalisation informatique ou problème à résoudre) seront proposés et constitueront la note de l'évaluation obligatoire.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera au moyen d'un projet et d'un examen écrit d'une durée de 2 heures.

La note finale sera partagée en 50% pour l'évaluation obligatoire et 50% pour l'examen écrit.

Pour cet examen, ne sont autorisés que le polycopié ainsi que les notes personnelles. Les dispositifs électroniques (ordinateurs portables, téléphones portables et tablettes) ne sont pas autorisés.

Support de cours, bibliographie

Il sera fourni aux élèves un polycopié ainsi que le sujet des tds et leur correction.

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Marc Aiguier et Pascale Le Gall

Taille des TD : 35 élèves au maximum

Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : les seuls logiciels utilisés (prolog, solveurs, assistants à la preuve) seront des logiciels libres d'accès, que les élèves installeront sur leur machine personnelle

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre les principes fondamentaux et les outils formels (i.e. mathématiquement fondés) à la base de toutes les méthodes de conception, de vérification et d'implantation des systèmes informatiques.

Savoir formaliser un problème de nature informatique et maîtriser les outils fondamentaux, de nature théorique, méthodologique et logicielle, nécessaires pour raisonner à propos de ces formalisations.

Donner les outils théoriques fondés sur les modèles de calcul et utilisés pour l'analyse de complexité des algorithmes abordés dans le cours Algorithmes et Complexité, ainsi que les méthodes de raisonnement fondées sur la logique mathématique.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Savoir formaliser un problème de nature informatique et maîtriser les outils fondamentaux, de nature théorique, méthodologique et logicielle, nécessaires pour raisonner à propos de ces formalisations. Donner les outils théoriques fondés sur les modèles de calcul et utilisés pour l'analyse de complexité des algorithmes abordés dans le cours Algorithmes et Complexité, ainsi que les méthodes de raisonnement fondées sur la logique mathématique.

2EL1550 – Calcul haute performance

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **CAMPUS DE METZ**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours permettra aux étudiants de :

- Comprendre les enjeux et les difficultés de la simulation numérique intensive dans tous les domaines de la recherche et du développement.
- Appréhender l'algorithmique parallèle et maîtriser les étapes de la parallélisation d'un code de calcul.
- Connaître et avoir expérimenté des bibliothèques et environnements de calcul parallèle.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

- Cours commun « Systèmes d'Information et Programmation » de SG1 (1CC1000)
- Cours commun « Algorithmique et complexité » de ST2 (1CC2000)
- Ainsi que des connaissances de bases en algèbre linéaire

Plan détaillé du cours (contenu)

- **Architectures parallèles et distribuées** : composants d'un supercalculateur ; hiérarchie de mémoires ; aspects énergétiques ; besoin de tolérance aux pannes.
- **Optimisation et parallélisation de boucles en mémoire partagée** : optimisation sérielles et vectorisation, algorithmique et programmations multithreads avec OpenMP, analyse et réécriture de boucles.
- **Algorithmique distribuée par envoi de messages** : circulation de données et communications point-à-point en MPI (mpi4py) : déploiement d'application et exécution distribuée en MPI (OpenMPI + mpi4py) ; distribution de données et communications collectives en MPI (mpi4py) ; algèbre linéaire, méthodes directes et méthodes itératives.
- **Calcul scientifique parallèle** : stratégies pour la résolution de problèmes linéaires de grande taille ; méthodes itératives de sous-structurations ; méthodes de décomposition de domaines.
- **Mesure et analyse de performances** : méthodologie de mesure ; métriques et limites d'accélération et d'efficacité ; métriques et limites de passage à l'échelle.

Déroulement, organisation du cours

Les approches mathématiques et les algorithmes présentées en cours seront mis en oeuvre lors de TD sur *clusters de calculs*, et des performances seront mesurées et analysées lors de chaque expérimentation. L'expérimentation sera une part importante du cours, et permettra de bien appréhender les concepts étudiés.

Composition du cours en présentiel : 18h00 de CM, 1h30 de TD, 9h00 de TD sur machines (3 TP), et 2h00 d'examen écrit final

Composition du cours en autonomie : lecture de polycopié, exercices de programmation multithread, TP noté de calcul distribué.

Séquençement possible du cours :

- 5 x 1h30 de CM ;
- *Autonomie : exercices de parallélisation de boucles et de programmation multithreads en OpenMP*
- 2 x 1h30 de TD sur machines (TP) ;
- 3 x 1h30 de CM
- 1x1h30 de TD de programmation distribuée
- *Autonomie : approfondissement du cours de MPI à partir d'un polycopié et de l'analyse numérique à partir d'un livre (distribués aux élèves)*
- 2 x 1h30 de TD sur machines (TP) ;
- *Autonomie : TP noté de programmation distribuée sur clusters de PC, avec enseignants joignables à certaines heures (office hours)*
- 4 x 1h30 de CM
- *Autonomie : exercices sur les méthodes de résolution*
- 2 x 1h30 de TD sur machines (TP) ;
- 2h00 d'EE final

Organisation des TD en présentiels (36% du volume total en présentiel) :

- 1 TD + 6 TD sur machines qui seront groupés par 2 (i.e. par blocs de 3h),
- Les codes développés seront exécutés sur les clusters de calculs du *Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec*, accessibles à partir de salles informatiques, ou à partir des ordinateurs des élèves.

Organisation de l'évaluation

Poids relatifs des différents examens :

- 50% : Comptes rendus de TDs sur machines
- 50% : Examen écrit de 2h00 (en fin de cours)
- En cas d'absence justifiée à l'un des TDs sur machines, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final. En cas d'absence injustifiée une note de 0/20 sera appliquée pour ce TD sur machines.
- L'examen de rattrapage consistera entièrement en un examen écrit, similaire à l'examen initial.

Support de cours, bibliographie

Supports de cours fournis aux étudiants :

- Frédéric Magoulès, François-Xavier Roux, Guillaume Houzeaux. *Parallel Scientific Computing*. Wiley & Sons, Inc., 2015. Hardcover 354 pages (in English). *This course support is available in other languages: in French (Dunod, 2017), in Spanish (CIMNE, 2014), in Japanese (Morikita Publishing Co Ltd, 2015), in Hungarian (Pollack Press, 2018).*
- Numerical Methods: Slides of the lectures
- Parallel and Distributed Computing: Slides of the lectures.

Autres livres suggérés :

- W. Gropp, E. Lusk, A. Skjellum. "Using MPI". MIT Press. 1999.
- R. Chandra, R. Menon, L. Dagum, D. Kohr, D. Maydan, J. McDonald. "Parallel Programming in OpenMP". Morgan Kaufmann Publishers. 2000.
- B. Chapman, G. Jost, R. Van Der Pas.. "Using OpenMP". MIT Press. 2007.

Moyens

- **Equipe pédagogique : Frédéric MAGOULES et Stéphane VIALLE**
- 64% de cours et 36% de TD, avec des groupes de TD de 25 étudiants travaillant sur des machines à haute performance.
- Accès à différents serveurs et clusters de calculs (Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, et/ou mésocentre CentraleSupélec-ENS Paris Saclay).
- Expérimentation avec des logiciels Open-source standards : C/C++/Python, bibliothèque de multithreading pour multicœurs (OpenMP), bibliothèque d'envois de messages pour clusters de calculs (MPI: MPICH2/OpenMPI), bibliothèque scientifiques optimisées (OpenBLAS).

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue du cours les étudiants seront capables de :

1. **[Acquis d'Apprentissage 1* (AA1*)]** contribuant aux compétences **C1 C2 C6** :
 - a. Adapter des méthodes numériques pour le calcul à haute performance (HPC)
 - b. Concevoir des méthodes numériques pour le calcul à haute performance (HPC) afin de résoudre des problèmes complexes
2. **[Acquis d'Apprentissage 2* (AA2*)]** contribuant aux compétences **C1 C2 C6** :
 - a. Concevoir des algorithmes parallèles de simulation intensive selon les règles du calcul à haute performance (HPC)
 - b. Implanter des algorithmes parallèles de simulation intensive sur supercalculateurs ou sur clusters de PC multi-cœurs
 - c. Gérer un quota d'heures de calculs lors de l'exécution d'une simulation intensive
3. **[Acquis d'Apprentissage 3* (AA3*)]** contribuant aux compétences **C1 C2 C6** :
 - a. Mettre en œuvre une simulation à haute performance complète et cohérente :
 - i. Choisir des modèles adaptés en précision et extensibles (pour un passage à l'échelle)
 - ii. Choisir des stratégies d'implantations parallèles et efficaces
 - iii. Réaliser une campagne de simulation en temps et ressources limitées

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- **C1** : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- **C2** : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- **C6** : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

2EL1560 – Modèles et systèmes pour la gestion des données massives

Responsables : **Nacera Seghouani**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les technologies de gestion de données ne cessent d'évoluer pour s'adapter à l'hétérogénéité des données (structurées, document, texte, image, video...), à leur volumétrie et à leur vitesse. Les bases de données NoSQL (Not only SQL) désignent une famille de Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD) qui s'écarte du paradigme traditionnel des SGBDs relationnels. Le but est de répondre aux besoins de mise à l'échelle horizontale (clusters de machines) de centres de données décrites à l'aide de schémas flexibles, d'accès en temps réel, de disponibilité et de performance dans une infrastructure distribuée.

L'objectif du cours *Modèles et Systèmes pour la Gestion des Données Massives* est d'étudier les fondements théoriques, les modèles conceptuels et les technologies permettant de stocker et de manipuler des données massives. Le passage du SQL au NoSQL, les différents modèles de représentation de données NoSQL, les requêtes de manipulation et d'analyse de données, les critères de mesure des performances dans un environnement distribué sont les principaux aspects traités dans ce cours.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Connaissances élémentaires sur les bases de données relationnelles et du langage de requêtes SQL.
Connaissances élémentaires en réseau (architecture Client/Serveur) souhaitées.

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Modèles conceptuels de représentation de données SQL (relationnels) et NoSQL (document, clé-valeur, colonne, graphe).
2. Langages de requêtes de manipulation et analyse des données.
3. Concepts transaction, propriétés ACID, théorème CAP.
4. Concepts fondamentaux liés à la distribution des données sur un cluster.
5. Travaux dirigés de modélisation et mise en pratique utilisant des données réelles (réseaux sociaux, Wikipédia, ...).
6. Logiciels : postgres, MongoDB, Neo4J, Spark-MapeReduce.

Déroulement, organisation du cours

Le cours est organisé comme suit :

- 11 créneaux de 1h30 de cours magistral.
- 4 créneaux de 3h TP.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu pendant TDs/TPs, mini-projet, examen écrit (2h) :

80% Examen écrit,

20% mini-projet (dernier TP),

Moyens

Slides, TDs/TPs/ QCMs et corrigés, références bibliographiques.

Utilisation de logiciels de gestion de bases de données installés sur MyDocker.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Choisir un modèle de gestion de données adapté à l'application et à la nature des données.
- Définir, déployer et manipuler une base de données SQL et NoSQL.
- Acquérir les concepts fondamentaux liés aux données distribuées.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique et une famille de métiers

C6.4 Résoudre des problèmes dans une démarche de pensée computationnelle.

C6.5 Exploiter tout type de données, structurées ou pas, y compris massives.

2EL1580 – Intelligence Artificielle

Responsables : **Fabrice Popineau**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Qu'est-ce que la recherche d'informations sur le Web, la réalisation d'assistants personnels, la conduite autonome ou la planification automatique ont en commun ?

Ce sont tous des problèmes complexes du monde réel que l'intelligence artificielle (IA) vise à résoudre en les abordant avec des méthodes rigoureuses.

Dans ce cours, vous étudierez les principes fondamentaux qui guident ces applications et vous mettrez en œuvre certains de ces systèmes.

Les sujets spécifiques incluent l'apprentissage automatique, l'exploration, le jeu, les processus de décision de Markov, la satisfaction de contraintes, les modèles graphiques et la logique.

L'objectif principal du cours est de vous fournir un cadre pour attaquer les nouveaux problèmes d'IA que vous pourrez rencontrer ultérieurement.

Les aspects éthiques et philosophiques de l'IA seront également abordés.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Pré-requis : **bonnes compétences en programmation Python.**

Cours Systèmes d'Information et Programmation

Cours Algorithmique et Complexité

Notions de base en probabilités : variable aléatoire, théorème de Bayes

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction – Présentation du domaine
- Agents et architectures d'agents
- Apprentissage automatique et agents réflexes
 - Prédicteurs linéaires
 - Fonction de perte et optimisation
 - Réseaux de neurones
- Représentation par états et exploration
 - Agents qui planifient
 - Exploration adversariale
 - Fonctions d'utilité
 - Processus décisionnels de Markov
 - Apprentissage par renforcement
- Représentation à base de variables
 - Connaissance incertaine
 - Raisonnement probabiliste
 - Réseaux bayésiens
 - Prise de décisions simples et complexes

- Représentation basée sur la logique (si le temps disponible le permet)
 - Syntaxe vs sémantique
 - Systèmes d'inférence
- Conclusion
 - Approfondissement sur l'apprentissage profond
 - Futur de l'IA

Déroulement, organisation du cours

Après la première session d'introduction (1,5 heure), toutes les sessions durent 3 heures et consistent en un mélange de cours magistraux et de travaux dirigés.

Les étudiants recevront des notes de cours avant chaque sujet abordé.

Les notes de cours seront commentées et des réponses seront apportées aux questions en début de session.

Ensuite, la session se poursuivra avec des exercices permettant d'appliquer les nouvelles notions.

À la fin de chaque sujet abordé, du temps sera pris pour s'assurer que les étudiants progressent correctement dans leurs travaux de programmation.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation repose sur :

- Des projets de programmation (40%)
- Un examen terminal (60%)

Les projets de programmation sont au nombre de 4 ; les étudiants recevront des spécifications de tâches pour lesquels ils devront construire un programme "agent" capable de prendre en charge la tâche demandée.

Les soumissions des étudiants seront évaluées automatiquement sur la base de leur performance.

Les travaux de programmation seront distribués selon un calendrier présenté en début de module.

Chaque travail aura une fenêtre temporelle de remise.

Des pénalités seront appliquées pour les remises tardives.

L'examen terminal dure 2h. Il consiste en une série d'exercices similaires à ceux présentés en travaux dirigés.

Support de cours, bibliographie

Intelligence artificielle (4^{ème} éd.) (Français)

Auteurs : Stuart Russel, Peter Norvig

ISBN : 9782326002210 (Français)

Editeur : Pearson

Moyens

- Equipe enseignante : Fabrice Popineau (responsable du module)
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35 élèves, possibilité d'encadrer 100 étudiants avec les enseignants (Arpad Rimmel, ...)
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaires : Pas de licences. Outils libres : Python et son écosystème essentiellement.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce module, les élèves seront capables :

- D'identifier les problèmes pour lesquels les techniques d'intelligence artificielle sont adaptées, et quand c'est le cas identifier la ou les techniques adéquates,
- De formaliser un problème donné dans le langage / le cadre de différentes techniques d'IA,
- De mettre en œuvre des algorithmes élémentaires d'IA (par exemple, les algorithmes d'exploration standards),
- De concevoir et mettre en œuvre une évaluation de différents algorithmes sur une formalisation d'un problème, et tirer les conclusions de cette évaluation.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Choisir le modèle adapté (parmi plusieurs possibles) pour un problème donné grâce aux bons choix d'échelle de modélisation et d'hypothèses simplificatrices

C2.1 Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi, via les enseignements de 2A

C6.1 Développer des méthodes heuristiques afin de résoudre des problèmes de haute complexité

C6.3 Analyser des données (analyse prédictive, prise de décision)

2EL1590 – Cloud computing et informatique distribuée

Responsables : **Francesca Bugiotti, Gianluca Quercini**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

De nos jours, la stratégie marketing des entreprises repose de plus en plus sur l'analyse de données massives et hétérogènes qui nécessite d'une grande puissance de calcul.

Au lieu d'investir sur l'acquisition de matériel et de logiciel, les entreprises souvent font recours à la puissance de calcul et de stockage mise à disposition par des plateformes de *cloud computing* via internet.

L'objectif du cours est de présenter les concepts fondamentaux des systèmes distribués et du calcul distribué qui sont à la base du *cloud computing*.

Le cours abordera les principes de la virtualisation et de la conteneurisation, ainsi que les méthodes et les outils pour effectuer des calculs distribués (par exemple, *MapReduce*, *HDFS*, *Spark*).

Le cours introduira aussi des techniques et des algorithmes avancés pour l'analyse de données massives et hétérogènes (PageRank, apprentissage supervisé, *clustering*) et une introduction à un ensemble techniques de stockage optimisées Spark-compliant (Parquet).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Programmation en Python, bases de données, des notions en réseaux seront aussi appréciées.

Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction

- Cloud computing : motivation et terminologie.
- Présentation des cloud publiques (Amazon AWS, Microsoft Azure).
- Démarrage d'une machine virtuelle sur le cloud Microsoft Azure.

Virtualisation

- Principes de base de la virtualisation.
- Principes de la conteneurisation.
- Architecture de Docker.
- Images, conteneurs, volumes et réseaux en Docker.
- Déploiement d'applications avec Docker.

Applications multi-services et orchestration

- Architecture microservices.
- Principes de l'orchestration.
- Présentation de Kubernetes.
- Déploiement d'applications avec Kubernetes.
- Déploiement d'applications dans le cloud.

Programmation cloud et environnements logiciel.

- Calcul parallèle, paradigmes de programmation.
- Hadoop MapReduce.
- Apache Spark.
- Apache Parquet.

Analyse de données.

- Environnements Cloud et stockage de données.
- Données distribuées.
- Dataframes.

Déroulement, organisation du cours

Introduction.

- **Cours magistral** : 1,5h
- **Virtualisation et conteneurisation.**
 - **Cours magistral** : 3h
 - **TD + QCM (noté)**: 3h
- **Applications Multi-service.**
 - **Cours magistral** : 3h
 - **TD + QCM (noté)**: 3h
 - **TP (noté)** : 3h
- **Programmation cloud et environnements logiciel.**
 - **Cours magistral** : 6h
 - **TD + QCM (noté)**: 3h
 - **TP (noté)** : 3h
- En résumé :
- **Cours magistral** : 13,5 heures
- **TD** : 9 heures
- **TP** : 6 heures

Des ponts réguliers de suivi seront programmés pendant le cours, notamment pour la finalisation des TP notés. L'équipe enseignante sera aussi disponible à des créneaux horaires fixés pour suivre le travail individuel requis pour le cours et répondre aux questions des élèves.

Organisation de l'évaluation

La note finale est calculée comme suit :

- 2 TPs notés ; chaque TP compte pour 35% de la note finale ; -4 points sur la note finale pour chaque absence injustifiée (2 absences injustifiées = -8 points) ;
- 3 QCMs notés (1 QCM après chaque TD) ; chaque QCM compte pour 10% de la note finale ; -3 points sur la note finale pour chaque absence injustifiée (2 absences injustifiées = -6 points).

Support de cours, bibliographie

- Hwang, Kai, Jack Dongarra, and Geoffrey C. Fox. *Distributed and cloud computing: from parallel processing to the internet of things*. Morgan Kaufmann, 2013.
- Erl, T., Puttini, R., & Mahmood, Z. (2013). *Cloud computing: concepts, technology & architecture*. Pearson Education.
- Tel, G. (2000). *Introduction to distributed algorithms*. Cambridge university press.
- Miner, D., & Shook, A. (2012). *MapReduce Design Patterns: Building Effective Algorithms and Analytics for Hadoop and Other Systems*. O'Reilly Media, Inc..
- Karau, H., Konwinski, A., Wendell, P., & Zaharia, M. (2015). *Learning spark: lightning-fast big data analysis*. O'Reilly Media, Inc.
- Schenker, Gabriel. *Learn Docker - Fundamentals of Docker 19.x*. Packt Publishing,. Print.
- Lisdorf, Anders. *Cloud Computing Basics: A Non-technical Introduction*. Apress, 2021.
- Linthicum, David. *An Insider's Guide to Cloud Computing*. Addison-Wesley, 2023

Moyens

Equipe enseignante : Francesca Bugiotti, Gianluca Quercini, Idir Ait Sadoune, Marc-Antoine Weisser, Arpad Rimmel

Taille des TP : 25 élèves

Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Utilisation de logiciels licence libre

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, l'élève sera capable de :

- Comprendre les concepts à la base du cloud computing.
- Maîtriser la notion de virtualisation et conteneurisation dans le cloud.
- Connaître les différentes plateformes cloud.
- Utiliser les paradigmes de calcul distribué, tels que MapReduce et Spark.
- Concevoir des algorithmes de calcul distribué sur les données.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C.2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

- Assimiler les nouvelles connaissances au sein d'outils ou méthodes opérationnels et efficaces pour le problème donné

C.6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

- Appliquer les principes de la conception de bases de données destinées à récolter une grande masse de données,
- Prendre en compte les principes de distribution spatiale des données afin de les traiter (virtualisation),
- Mettre en œuvre des algorithmes traitant ou utilisant des données massives (intelligence artificielle, clustering),
- Analyser des données (analyse prédictive, prise de décision),
- Prendre en compte l'impact écologique du stockage et du traitement de données et savoir le pallier,
- Identifier les systèmes de stockage de données garantissant la minimisation du risque de leur perte.

2EL1710 – Probabilités avancés

Responsables : **Erick Herbin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours théorique fait suite au cours de Mathématiques de 1ère année, qui comprend les concepts de base de la théorie des probabilités. Il introduit les fondements de la théorie générale de processus stochastiques, prenant en compte l'évolution temporelle de concepts aléatoires.

Ces modèles probabilistes constituent les objets mathématiques de base pour modéliser des phénomènes à forte variabilité, incertains ou dont la complexité rend impossible une description déterministe fine. Parmi eux, le mouvement brownien est largement utilisé pour décrire les phénomènes (naturels, physiques, biologiques ou financiers) à base d'équations différentielles stochastiques. Il se situe au carrefour de classes importantes telles que martingales, processus de Markov ou processus gaussiens, dont il hérite des propriétés.

L'objectif de ce cours est l'étude théorique des deux premières familles de processus stochastiques, dans le cas particulier où les paramètres sont dans un espace discret, puis d'introduire les processus gaussiens indicés par les réels. Le cours revêt le format classique d'un cours de mathématiques dans lequel les théorèmes fondamentaux sont démontrés au tableau.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Très bonne maîtrise du cours de CIP du cursus CentraleSupélec ou des cours de dernière année de Licence de Mathématiques : Intégration, théorie de la mesure, Probabilités.

Plan détaillé du cours (contenu)

Martingales à temps discrets : étude des martingales à temps discrets ; martingales et stratégie de jeu ; résultats de convergence

Chaînes de Markov : opérateurs de transition, propriété de Markov et chaîne de Markov canonique ; classification des états, récurrence/transience ; résultats asymptotiques

Processus gaussiens et introduction au mouvement brownien : loi d'un processus stochastique ; processus gaussiens, bruit blanc et introduction au mouvement brownien

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux entièrement au tableau (résultats, preuves et exemples) : 19h30

Travaux dirigés : 9h

Organisation de l'évaluation

Home Works, Evaluation continue sous forme de devoirs libres, Contrôle final écrit : 2h (sans document, ni calculatrice, ni ordinateur).

Support de cours, bibliographie

Notes de cours et éléments de correction d'exercices en ligne

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Erick Herbin

Un seul groupe de TD (effectif complet) : Philippe Bouafia

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

L'objectif de ce cours est l'étude théorique des deux premières familles de processus stochastiques, dans le cas particulier où les paramètres sont dans un espace discret, puis d'introduire les processus gaussiens indicés par les réels.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Fondements théoriques de l'étude des processus stochastiques à temps discret et des processus aléatoires gaussiens. A l'issue de ce cours, les étudiants seront prêts à suivre un cours de Calcul Stochastique de 2ème année de Master de Mathématiques.

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

C2.2 : Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

C2.3 : Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires

C7 : Savoir convaincre

C7.1 : Structurer ses idées et son argumentation

2EL1720 – Distributions et opérateurs

Responsables : **Pauline Lafitte**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours théorique revient à la genèse des concepts d'analyse fonctionnelle présentés dans le cours de CIPEDP de 1ère année.

Historiquement, les distributions et les opérateurs ont été introduits pour donner un cadre mathématique adapté à la formalisation de problèmes issus de la physique. Ainsi ont été généralisés les concepts de fonctions en fournissant une théorie pour traiter de manière rigoureuse des questions fondamentales de l'analyse (intersion de limites, intersion limite-intégrale, transformée de Fourier...).

Ces concepts permettent d'apporter une réponse : dans quel espace fonctionnel doit-on chercher la solution du problème pour qu'il soit bien posé au sens de Hadamard, c'est-à-dire pour qu'il ait une et une seule solution qui dépende continûment des données ? En particulier, le concept de topologie (générale) sur de tels espaces revêt un rôle essentiel pour étudier la question de la continuité et plus généralement celle de la convergence. Selon les cas considérés, elles peuvent être définies par une distance, une norme ou une famille de semi-normes.

Dans le cadre de la théorie générale des processus stochastiques (ou fonctions aléatoires), les distributions et opérateurs constituent les outils mathématiques de base pour étudier les processus gaussiens ou des extensions du mouvement brownien classique. Les concepts étudiés dans ce cours sont à la base de la représentation de ces processus sous forme spectrale ou intégrale, qui permet leur étude fine (propriétés géométriques, propriétés de Markov, définition d'une intégrale stochastique, etc.)

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

CIPEDP

Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours de mathématiques fondamentales est organisé autour de l'étude théorique des notions suivantes :

- Théorèmes de Hahn-Banach
- Opérateurs non bornés
- Topologies faibles
- Concepts avancés de distributions

Au sein de chacun de ces thèmes, la majeure partie des résultats sont démontrés rigoureusement en cours.

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux durant lesquels les concepts et les résultats sont exposés et démontrés au tableau. Séances d'exercices d'application sous forme de travaux dirigés.

Organisation de l'évaluation

Homeworks + Devoirs libres + Contrôle Final obligatoire écrit 2h sans document

Support de cours, bibliographie

Éléments de correction d'exercices en ligne.

Moyens

- Equipe enseignante : Pauline Lafitte (CM), Alexandre Richard (TD)
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : un seul groupe de TD (effectif complet)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Maîtriser les bases de la théorie de l'analyse fonctionnelle : les élèves posséderont les capacités de raisonnement et de rigueur indispensables à l'acte de modélisation et à son analyse.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

C2.2 : Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

C2.3 : Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires

C7.1 : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

Ce cours constitue un fondement important pour les étudiants souhaitant poursuivre un Master 2 en lien avec les mathématiques fondamentales (par exemple en Analyse, Equations aux dérivées partielles ou Probabilités).

2EL1730 – Machine Learning

Responsables : **Nora Ouzir**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cours d'introduction à l'apprentissage automatique, **donnant un aperçu des concepts fondamentaux et des algorithmes d'apprentissage automatique les plus courants**, y compris les algorithmes d'apprentissage supervisé, d'apprentissage non supervisé et de réduction de dimension (K-means, SVMs, arbres de décision, PCA, etc.). Le cours comprend une partie travaux pratiques, et les étudiants appliqueront la théorie de l'apprentissage automatique à un problème complexe du monde réel par le biais d'une compétition Kaggle. **Un niveau en mathématiques intermédiaire à avancé est requis** pour ce cours, avec une bonne compréhension de l'algèbre linéaire et des statistiques. Les étudiants sont encouragés à utiliser les ressources supplémentaires fourni pour une compréhension plus approfondie des algorithmes discutés.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

- Algèbre linéaire
- Probabilités et statistique
- Programmation en Python

Plan détaillé du cours (contenu)

- **Sélection et évaluation des modèles :**
[Le compromis biais-variance, overfitting, underfitting, la validation croisée.](#)
- **Régression linéaire et logistique.**
[Lasso et régression ridge.](#)
- **Classifieurs probabilistes :**
[Classifieur de Bayes, analyse discriminante de Fisher, analyse discriminante linéaire.](#)
- **SVM :**
[Hard SVMs, soft SVMs, kernel SVMs.](#)
- **Réduction de dimension:**
[SVD, PCA, MDL, Isomap.](#)
- **Apprentissage non supervisé :**
[K-means, spectral clustering.](#)
- **Apprentissage non paramétrique et méthodes des plus proches voisins :**
[K-NNs](#)
- **Méthodes basées sur les arbres et apprentissage par ensembles :**
[Arbres de décision, random forests, bagging, boosting.](#)
- **Réseaux de neurones :**
[Perceptrons, multilayer perceptrons, backpropagation.](#)
- **Introduction aux réseaux de neurones profonds :**
[Fonctions d'activation, réseaux neuronaux convolutifs.](#)

Déroulement, organisation du cours

Une session de laboratoire aura lieu après chaque cours avec des exercices théoriques et des implémentations en Python. Le cours, travaux pratiques et examens sont en anglais.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation du cours sera basée sur les critères suivants :

- **Projet de groupe** : mise en œuvre d'un pipeline complet d'apprentissage automatique.
- **Examen final** : questions à choix multiples (QCM). La première partie de l'examen portera sur les différents concepts appris en cours, la seconde partie comprendra des exercices théoriques similaires à ceux vus en séance de travaux pratiques.

La notation sera pondérée comme suit : projet de groupe 40%, et examen final 60%.

Un travail individuel facultatif sera fourni, comprenant des questions théoriques et pratiques. L'objectif est de résoudre des problèmes d'apprentissage automatique d'un point de vue théorique et de familiariser les étudiants avec les types de questions qui pourraient apparaître dans l'examen final.

Support de cours, bibliographie

Il n'y aura pas de manuel unique ou de poly pour ce cours. Les diapositifs utilisés en cours seront fournis aux étudiants et des chapitres spécifiques des livres suivants seront recommandés pour chaque thème du cours (via Edunao) :

- Shai Shalev-Shwartz and Shai Ben-David. *Understanding Machine Learning : From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press, 2014.
- Christopher M. Bishop. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2011.
- Trevor Hastie, Robert Tibshirani, and Jerome Friedman. *The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction*. Second Edition, Springer, 2017.
- Jure Leskovec, Anand Rajaraman, and Jeff Ullman. *Mining of Massive Datasets*. Cambridge University Press, 2014.

Moyens

- Toutes les ressources du cours seront disponibles sur la page **Edunao** du cours.
- L'enseignant communiquera les annonces importantes par le biais du forum Edunao.
- Veuillez utiliser le forum pour toute question relative au cours.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du cours, les étudiants seront capables de :

- Reconnaître les problèmes qui peuvent être résolus à l'aide de l'apprentissage automatique.
- Choisir et appliquer le(s) algorithme(s) le(s) plus approprié(s) en fonction d'un problème.
- Implémenter certains algorithmes.
- Évaluer et comparer les algorithmes d'apprentissage automatique pour une tâche particulière.
- Comprendre et traiter certains défis liés aux données du monde réel.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences acquises à l'issue du cours sont :

- C1
- C2
- C6

2EL1740 – Algèbre et cryptologie

Responsables : **Remi Geraud**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction aux outils mathématiques modernes, et leur matérialisation en applications technologiques et scientifiques.

À la croisée des mathématiques fondamentales, de l'informatique et de la théorie de l'information, nous aborderons des questions telles que

- Comment envoyer un message depuis une sonde spatiale ?
- Comment garantir l'authenticité d'un document numérique ?
- Comment trouver de très grands nombres premiers ? Ou factoriser de grands nombres ?
- Et beaucoup d'autres

Le thème directeur de notre exploration sera la théorie du logarithme discret et des réseaux euclidiens, qui sous-tend une immense partie des concepts cryptologiques des 20^e et 21^e siècles et croise de nombreuses questions fondamentales de mathématiques.

L'objectif de ce cours est de doter les étudiants :

- D'un bagage culturel sur le développement des mathématiques au 20^e et 21^e siècle, avec un langage qui leur permettra d'approfondir ces questions
- D'une maîtrise opérationnelle du calcul dans les structures algébriques, en particulier anneaux, corps finis et courbes elliptiques
- D'une compréhension des fondements mathématiques de la cryptologie moderne

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Ce cours ne suppose pas de connaissances spécifiques au-delà de notions mathématiques générales normalement acquises en classes préparatoires.

Une familiarité avec la programmation informatique est fortement recommandée.

Attention, **ce cours demande un travail sérieux et conséquent**, pour assimiler et s'approprier les notions discutées.

Plan détaillé du cours (contenu)

En 2023 le cours détaillait notamment les points suivants :

- Applications des groupes cycliques [Diffie-Hellman'76, Schnorr'89, ElGamal'85]
- Constructions élémentaires sur les corps finis [Reed-Solomon'60, Shamir'79, Toom-Cook-66]
- Outils arithmétiques élémentaires [Miller-Rabin'80, Pollard'74, Dixon'81]
- Groupe de Picard des anneaux de Dedekind et des variétés projectives lisses
- Réduction de réseaux et applications [LLL'82, Lagarias-Odlyzo'85, Wiener'02, Coppersmith'96]
- Courbes elliptiques sur les corps finis et applications [Lenstra'85, Koblitz-Miller'86, NIST'05]
- Apprentissage avec erreurs et applications [Regev'05, Dilithium'22]

Déroulement, organisation du cours

- Les cours sont présentés au tableau
- Des notes de cours, reprenant les éléments importants, sont fournies après les séances
- Des exemples commentés de calcul formel sont mis à disposition
- Les TDs prennent la forme d'une application détaillée des notions acquises et permet de les mettre en contexte et d'en discuter les spécificités ou les limites
- Un contrôle continu permet de s'approprier les notions importantes du cours et de les mettre en œuvre

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu

Support de cours, bibliographie

- David Eisenbud, *Commutative Algebra (with a View Toward Algebraic Geometry)*
- Robin Hartshorne, *Algebraic Geometry*
- William Fulton, *Algebraic curves: An Introduction to Algebraic Geometry*
- Henning Stichtenoth, *Algebraic Function Fields and Codes*
- Michel Demazure, *Cours d'algèbre*
- Joseph H. Silverman, *The Arithmetic of Elliptic Curves*
- Joseph H. Silverman, *Advanced Topics in the Arithmetic of Elliptic Curves*
- Jean-Pierre Serre, *Cours d'arithmétique*
- Michael Tsfasman, Serge Vlăduț, Dmitry Nogin, *Algebraic Geometric Codes : Basic Notions*

Moyens

Cours magistral au tableau, certains exercices nécessitent l'utilisation de l'ordinateur. Le cas échéant on précisera les logiciels à installer.

Equipe enseignante : Rémi Géraud-Stewart (remi.geraud@ens.fr)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les élèves seront capables de :

- Identifier les structures algébriques manifestes dans les problèmes rencontrés
- Comprendre les enjeux et les outils de la cryptologie et de la théorie des codes, et (re)connaître leurs principales applications industrielles
- Maîtriser le langage dans lequel sont formulés et analysés les problèmes algébriques

Description des compétences acquises à l'issue du cours

1. Identifier les structures algébriques manifestes dans les problèmes rencontrés
 - Compétence C.1.2 : reconnaître les structures étudiées en cours
 - Compétence C.6.1 : utiliser les outils technologiques appropriés
2. Comprendre les enjeux et les outils de la cryptologie et de la théorie des codes, et (re)connaître leurs principales applications industrielles
 - Compétence C.6.7 : comprendre les enjeux de l'échange d'information
 - Compétence C.3.6 : comparer les solutions existantes ou proposées aux besoins et contraintes
 - Compétence C.6.1 et C.1.4 : invoquer les outils pertinents et bien les configurer
3. Maîtriser le langage dans lequel sont formulés et analysés les problèmes algébriques
 - Compétence C.2.3 : apprendre à approfondir ses connaissances pour répondre à un problème donné

2EL1750 – Statistiques avancées

Responsables : **Sarah Lemler**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours de Statistiques Avancées a pour objectif de présenter diverses méthodes statistiques permettant de faire de l'estimation, de la prédiction et de déterminer les propriétés des estimateurs proposés. Nous développerons deux grands thèmes :

- La régression linéaire multivariée
- Les statistiques non-paramétriques.

Le cours aborde à la fois les aspects théoriques de ces notions mais propose également une mise en pratique des modèles et méthodes considérées à l'aide de TPs avec le logiciel R sur des jeux de données provenant de différents domaines.

A télécharger avant le premier TP :

- Le logiciel R <https://www.r-project.org/>
- L'interface RStudio <https://www.rstudio.com/>

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Pour ce cours les prérequis sont les suivants :

Il faut connaître les notions vues en cours de Statistiques et Apprentissage en 1ère année, en particulier :

- Les estimateurs,
- Les intervalles de confiance,
- Les tests,
- Les premières notions sur le modèle linéaire

Plan détaillé du cours (contenu)

Nous développerons deux thèmes :

- La régression linéaire multivariée
- Les statistiques non-paramétriques

Déroulement, organisation du cours

Le cours se fera au tableau (pour la partie la plus théorique) ou à partir de slides projetées lorsqu'il s'agira par exemple de présenter une application faite à partir du logiciel R.

Il y a 28,5 heures prévues pour cet électif, dont 2 heures pour l'examen final.

Organisation de l'évaluation

Le cours comporte deux évaluations : un devoir maison (DM) obligatoire à composer par binôme à rendre à mi-parcours (la date sera précisée lors du premier cours) et un examen final (EX) sur table de 2 heures qui porte sur l'ensemble du programme traité en cours. La note de cet électif sera alors la moyenne pondérée des notes des deux évaluations précédentes ($(1/3)*DM + (2/3)*EX$), arrondie au demi-point le plus proche. Le rattrapage est un examen EX2 de mêmes modalités que EX. La note de l'électif après le rattrapage est celle de l'examen EX2 uniquement (sans le DM).

Support de cours, bibliographie

Le cours de Statistiques et apprentissage de première année de Arthur Tenenhaus

Moyens

A l'issue de chaque cours, des exercices de TDs ou des TPs seront proposés pour se familiariser avec les notions théoriques vues en cours et les mettre en pratique pour répondre à des problèmes concrets éventuellement à partir de jeux de données.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Utiliser des techniques d'estimation statistiques paramétriques et non-paramétriques
- Valider une modélisation et comprendre les limites d'un modèle statistique
- Proposer, implémenter et calibrer un modèle prédictif
- Utiliser le logiciel R et interpréter des résultats

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Utilisation de techniques d'estimation statistiques paramétriques et non-paramétriques
- Valider une modélisation et comprendre les limites d'un modèle statistique
- Proposer, implémenter et calibrer un modèle prédictif
- Utiliser le logiciel R et interpréter des résultats

2EL1760 – Calcul scientifique

Responsables : **Hachmi Ben Dhia**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une brique rigoureuse et appliquée, à la fois, contribuant à la conception des systèmes mécaniques complexes et énergétiquement soutenables, via la modélisation, l'analyse mathématique, l'approximation et la simulation numérique contrôlée de problèmes d'ingénieur en mécanique des solides et des fluides, à la fois. Cela couvre des secteurs tels l'énergie, le transport, le Génie Civil ou l'aérospatial, etc.

L'objectif pédagogique est que les élèves suivant ce cours acquièrent une bonne compréhension de cette chaîne intégrant la modélisation, l'analyse mathématique et la simulation numérique performante pour l'aide à la conception des systèmes complexes et soutenables, et ce à travers des problèmes simplifiés, mais pertinents, de la mécanique des solides et des fluides.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Notions de base de la Mécanique des Milieux Continus - Notions de base de calculs intégral et différentiel - Notions de base sur les espaces de Hilbert (Sobolev classiques, en particulier) - Notions premières d'approximations numériques appropriées en espace et en temps pour un solide et pour un fluide - Quelques éléments de programmation. En bref, un niveau de base de première année CS, en Mathématique et en Mécanique ou un niveau de base de M1 de Mathématiques Appliquées à la Mécanique.

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours comporte deux parties successives : 5,5x3h, Partie Fluides dont (4,5x3h données par l'enseignante et 3h sur le temps libéré pour les élèves) et 5x3h Partie Solides + 1,5h sur temps libéré pour les élèves.

1. Simulation des écoulements de fluides compressibles :
 - Modèles d'écoulements, solutions discontinues, entropie, solveurs basiques, extensions.
 - Mise en œuvre en TP.
2. Modélisation, analyse et simulation en mécanique du solide :
 - Rappels des équations de l'élasticité linéaire : Equations fortes et faibles
 - Analyse mathématique du problème primal. Méthode des éléments finis vectoriels. Estimation d'erreur a priori.
 - Mise en œuvre numérique de la MEF (TP d'assemblage EF) temps libéré pour les élèves
 - Approximation d'un problème d'élasticité singulier (lecture de documents en temps libéré).

Déroulement, organisation du cours

Cours-TD (individuels et Collaboratifs) -TP, Projet + du travail (dans des temps libérés) pour mieux comprendre et avancer des points de cours

Organisation de l'évaluation

Examens Ecrits, Oraux, TP, projets Evaluation (première session) : Examen écrit et TP/projet Note E : Contrôle écrit de 2 h dont 1h00 pour la mécanique des solides et 1h00 pour la mécanique des fluides, avec tous les documents papiers autorisés Note P : TP et projet Note finale= $(2 \cdot E + P)/3$ Evaluation (session de rattrapage) : oral ou écrit (selon de nombre d'élèves à rattraper)

Support de cours, bibliographie

- Polycopié EDP de Première année, Polycopiés pour la partie fluides et la partie solide du cours (et références mentionnées dans ces polycopiés)
- Matlab, Scilab, Python...

Moyens

Hachmi Ben Dhia (Professeur des Universités, CentraleSupélec), Laboratoire MSSMat et Fédération de Math CS, (Partie Solides & Responsable du cours)

Frédérique Laurent-Nègre (Chercheur CNRS), Laboratoire EM2C et Fédération de Math CS, (Partie Fluides du cours)

(TP, Projets)

Salles informatiques

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Méthodes et outils mathématiques de base pour l'analyse de problèmes continus de Mécanique des solides et des fluides

Méthodes numériques variées pour l'approximation des problèmes continus (Différences Finies, Volumes Finis et Eléments Finis)

Estimation des erreurs entre solution continue et approchées et contrôle mathématique de la convergence

- Analyse de problèmes régis par des Equations aux Dérivées Partielles (EDPs)
- Pratique de la simulation numérique, en lien avec la nature et les propriétés mathématiques de ces EDPs
- Initiation au problème du choix des méthodes numériques adaptées

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Analyse de problèmes d'ingénierie régis par des équations aux dérivées partielles (EDP)- Acquérir des Idées sur la maîtrise de la complexité

Pratique de la simulation numérique, prenant en compte les propriétés mathématiques de ces EDP

Initiation au choix du meilleur ajustement des méthodes numériques.

Prendre conscience de l'intérêt de la recherche de la performance de la résolution de problèmes d'in génieurs pour minimiser l'impact énergétique

Intégrer les intérêts des travaux collaboratifs

2EL1810 – Dynamique des Structures et Acoustique

Responsables : **Didier Clouteau**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les vibrations jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines : géophysique, résistance des ouvrages au vent et aux séismes, stabilité et confort des véhicules aéronautiques ou terrestres. Les questions d'acoustique sont aussi importantes, par exemple dans les transports, à la fois du point de vue du confort interne que vis à vis de l'environnement. Ces deux domaines sont associés dans le fonctionnement d'instruments de musique, mais également dans le cadre de contrôles non destructifs.

Le but de ce cours est de donner les connaissances essentielles, en termes de méthodes et d'outils pour l'analyse et la quantification des phénomènes de vibration et d'acoustique. Il s'appuiera sur un certain nombre d'applications pour mettre en évidence les concepts fondamentaux de résonance et d'émission.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Il est fortement recommandé d'avoir suivi le cours de mécanique des milieux continus ou un cours sur les ondes.

Plan détaillé du cours (contenu)

Réponse d'un oscillateur à des chargements stationnaires, transitoires et aléatoires (cours)

1. Ondes mécaniques et acoustiques, résonances (cours et TD)
2. Vibration des poutres (cours et TD)
3. Construction de modèles réduits en dynamique et rappels de mécanique des milieux continus (cours et TD)
4. Réponse dynamique d'un système complexe (Cours et Bureau d'étude 1.1 : vibrations d'un bâtiment soumis à un séisme et au vent)
5. Bureau d'étude 1.2 et 2.1: vibrations d'un bâtiment soumis à un séisme et au vent (modèle par Eléments Finis)
6. Modèles dynamiques avancés (cours) et BE 2.2
7. Rayonnement acoustique (cours et TD)
8. Résonances acoustiques (cours et TD)
9. Bureau d'étude 3 : Analyse d'un papier scientifique par binôme
10. Examen final

Déroulement, organisation du cours

Cours : 8 séances

TD : 5 séances

Bureau d'étude : 6 séances + travail personnel

Organisation de l'évaluation

Examen écrit 2h (coeff 0,55) + 3 Contrôles continus en Bureau d'études (Coeff 0,15 chacun)

Support de cours, bibliographie

Document de cours + slides des séances de cours + Videos du cours en français et en anglais

Moyens

Le cours sera donné en amphi en anglais et des videos dans les deux langues seront à la disposition des étudiants.

TD : 35 élèves avec une classe en anglais et, en fonction des effectifs, une classe en français.

Software : notebook Python

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de l'enseignement les élèves seront capables de:

- Modéliser le comportement vibratoire de structures en adoptant la bonne modélisation (3D, poutres...)
- Modéliser le comportement acoustique d'un système fermé et le rayonnement d'une source ou d'un système ouvert
- Modéliser les effets dynamiques et aléatoires de l'environnement (vent, séisme...)
- Mettre en œuvre une stratégie d'approximation en basses fréquences par projection sur une base adaptée (pour un problème de vibration ou d'acoustique)

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 capacité à modéliser le comportement dynamique d'une structure

C1.2 capacité à modéliser des effets incertains d'environnement (vent, séismes)

C1.2 capacité à modéliser des problèmes acoustiques simples

C1.3 Capacité à résoudre les problèmes de dynamique des structures et d'acoustique en basses fréquences, en utilisant les outils associés à une approche modale (développement sur base, fonction de réponse en fréquence)

C2.1 Fondamentaux de la dynamique des structures linéaire basse fréquence et de l'acoustique linéaires et des limites associées à ces modèles

2EL1830 – Comportement non-linéaire des matériaux

Responsables : **Véronique Aubin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

La conception des structures des matériaux et leur optimisation (en termes de durée de vie, de performances, de coût) nécessite de pouvoir prédire la réponse des matériaux considérés pour cette application sous les sollicitations imposées pendant leur durée de vie (charge, température, contrainte, humidité...).

L'objectif de ce cours est de mettre en évidence le comportement mécanique et la durabilité des principales classes de matériaux dans diverses conditions de chargement, de comprendre les bases physiques des micromécanismes impliqués, et d'utiliser une modélisation pertinente pour la conception, dans le cadre de méthodes numériques. Les concepts sont introduits dans le cadre de la mécanique des milieux continus, et utilisent des notions liées au cours de Matériaux.

Applications dans les transports, l'énergie, les systèmes électroniques et le génie civil.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

1EL5000 Mécanique des milieux continus
1CC3000 Modélisation

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction, approche de la modélisation, rappel de mécanique des milieux continus et de thermoélasticité
2. Élasticité anisotrope des matériaux composites: Introduction aux matériaux composites (nature, intérêt au moyen des cartes Ashby, procédé de fabrication). Élasticité linéaire anisotrope. Calcul des propriétés du milieu homogène équivalent.
- 3-4. Viscoélasticité des polymères et des élastomères (2 séances) : introduction aux polymères (nature, comportement en fonction de la température). Mécanismes de déformation. Modélisation de la viscoélasticité : modèles rhéologiques, hyperélasticité 3D. Comportement dépendant du temps.
- 5-6. Plasticité dans les alliages métalliques (2 séances) : Mécanismes de déformations (dislocations, durcissement des alliages). Modélisation de l'élastoplasticité : Description des modifications du domaine élastique. Élastoplasticité 3D incrémentielle
7. Sécurité des structures - endommagement et ruptures : introduction au béton. Modélisation de l'endommagement : comportement élastique endommageable, mécanique de la rupture.

8. Choix d'un modèle de comportement. (Sur un cas donné, analysez le problème, proposez / créez un modèle capable de prendre en compte les mécanismes physiques observés.). Visite du laboratoire LMPS
9. Conférence, Etude de cas (utilisation des différents concepts du cours sur une application donnée)
10. Etude de cas (utilisation des différents concepts du cours sur une application donnée), révisions avant l'examen
11. Examen final

Déroulement, organisation du cours

- Session 1 : cours magistral
- Sessions 2 à 7 : cours magistral + session d'étude dirigée
- Session 8 : session de travail + visite du laboratoire
- Session 9 : conférence + session d'étude dirigée
- Session 10 : session de travail
- Session 11 : examen final : 2H

Organisation de l'évaluation

L'évaluation finale comprend un examen (70% de la note) + un rapport sur une étude de cas (30% de la note). Examen et rapport sur l'étude de cas permettant d'évaluer des compétences différentes, les deux sont obligatoires et seront exigés au rattrapage le cas échéant.

Support de cours, bibliographie

Pas de polycopié ; mais une liste de livres
Chaboche and Lemaître, Mechanics of Materials, Dunod
Roesler, Harders, Baeker, Mechanical Behaviour of Engineering Materials, Springer, 2007
Besson, Cailletaud, Chaboche, Forest, Non linear Mechanics of Materials, Hermès, 2001

Moyens

- Personnel enseignant : Véronique Aubin, Camille Gandiolle, Jan Neggers
- Nombre maximum d'inscriptions : 70

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de ce cours, les étudiants seront capables de :

- Analyser une structure matérielle, énumérer les sollicitations qui lui sont appliquées, expliquer les critères auxquels elle doit répondre (performance, économique, etc.).
- Interpréter le comportement mécanique expérimental d'un matériau donné à partir des mécanismes physiques impliqués, distinguer entre plusieurs interprétations possibles
- Sélectionner, combiner et utiliser des lois de comportement prenant en compte des comportements élastiques, visqueux, plastiques et endommageables
- Utiliser et mettre en oeuvre de manière analytique des lois de comportement 1D ou 3D
- Convaincre de la valeur d'une solution ou d'une recommandation prouvable ou démontrable

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le cours permet de progresser dans les compétences C1 et C2.

2EL1840 – Construire Demain – La Mécanique Appliquée au Génie Civil

Responsables : **Brice Bossan**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Il s'agit de matérialiser un projet de construction futuriste, et donc d'exercer simultanément des compétences en innovation et techniques, et aussi de travail en mode-projet ...

A travers cette problématique posée d'un environnement contraint et différent de celui connu aujourd'hui les élèves développent leurs capacités d'innovation et acquièrent des compétences en Génie Civil, en Matériaux, en Thermique, et en Construction & Logistique, et aussi Environnementales

Les travaux dirigés se faisant en sous-groupe, les élèves acquièrent alors des compétences de travail en équipe, en pilotage de projet transdisciplinaire, en reporting et en communication technique lors des revues de projet et la soutenance finale.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

1EL3000 - Génie industriel ou 1EL4000 - Matériaux ou 1EL5000 - Mécanique des milieux continus ou 1EL7000 - Sciences des transferts

Plan détaillé du cours (contenu)

Séance 1 (3h00) : Amphi de lancement, contexte de cours, et évolution des modes de construction. Cours : Le bas carbone dans la construction du point de vue des matériaux et des méthodes de construction.

Séances 2, 3, 4, 5 et 6 (5 fois 3h) : Cours en amphi (théorie et non applicatif) sur la thématique des structures et de l'énergie. Ces cours sont nécessaires pour la valorisation du projet.

Séances 7, 8 et 9 (3 fois 3h) : Ces TD, en 4 groupes de 25, permettent aux élèves de mesurer l'avancement des travaux de toutes les thématiques, de faire les choix cohérents et d'acter les acquis, puis d'identifier les verrous à lever pour la bonne suite des travaux qu'ils feront en TD, et en travail perso.

Séance 10 (3h00) : Restitution des travaux via une soutenance en amphi des 4 groupes de 25 ainsi qu'une synthèse de la solution par les 4 rapporteurs des 4 groupes. L'évaluation des élèves est faite par les responsables du cours + les animateurs techniques et innovation.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation individuelle des élèves est faite « en continue » par le Responsable lors des TD des séances 7, 8 et 9 ; celle du groupe est faite lors de la Séance 10.

Support de cours, bibliographie

Les étudiants pourront échanger avec le corps professoral pour obtenir des références bibliographiques et être orientés dans leurs recherches

Moyens

Equipe enseignante : Brice Bossan est responsable de l'organisation de l'électif. Chaque thématique est pilotée par un professionnel référent de son activité.

Taille des TD : 4 groupes de 25 élèves

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C7 Savoir convaincre

C8 Mener un projet, une équipe

2EL1850 – Simulation des couplages multiphysiques avec la MEF

Responsables : **Guillaume PUEL**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le but de ce cours est de donner des connaissances théoriques et appliquées sur les simulations de couplages multiphysiques telles que : thermomécanique, piézoélectrique, vibroacoustique, magnétomécanique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

- Équations aux dérivées partielles
- 1EL1010 - Rayonnement et propagation ou 1EL1500
- Physique des ondes ou 1EL4000 - Matériaux ou 1EL5000
- Mécanique des milieux continus ou 1EL7000 - Sciences des transferts

Plan détaillé du cours (contenu)

- S1(1h30) -S2-S3 Formulation variationnelle et MEF 1D / Application : poutre thermoélastique (couplage faible thermique/mécanique)
- S4-S5 MEF 2D / Application : pièce chauffée avec fenêtre ouverte (couplage faible thermique et mécanique des fluides)
- S6 Techniques de couplage multiphysique / Application : microactionneur thermique
- S7-S8 Estimation de l'erreur de modèle / Application : pièce chauffée avec fenêtre ouverte (estimation des erreurs)
- S9-S10 Problèmes dépendant du temps et de la fréquence / Application : évolution de température d'une pièce chauffée et acoustique
- S11 Examen final

Déroulement, organisation du cours

S1 à S10 : cours magistral 1h30 + TD numérique sur Comsol 1h30, sauf séance 6 (3h TD)

En autonomie : projet de simulation multiphysique (capteur, actionneur, phénomène physique...) par groupes de 4

Organisation de l'évaluation

Examen écrit de 2 heures (1h de théorie + 1h de pratique sur l'outil de simulation) : 65% de la note finale

Evaluation des projets en guise de contrôle continu : 35% de la note finale

Support de cours, bibliographie

Polycopié de cours

Moyens

Enseignant : Guillaume PUEL

TD : 35 élèves

Logiciel : Comsol Multiphysics (Structural mechanics, MEMS)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Résoudre et modéliser un problème multiphysique incluant la mécanique des solides, la thermique, la mécanique des fluides, l'électricité et le magnétisme.
- Concevoir des capteurs et des actionneurs grâce à l'utilisation de différentes physiques et technologies couplées.
- Modéliser et résoudre un problème multiphysique avec un code d'éléments finis commercial en portant une attention particulière à la précision de la solution.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

La validation des jalons 2 des compétences **C1** et **C6** est liée au projet effectué en groupe, en autonomie.

La validation du jalon 2 de la compétence **C2** est liée à la note finale obtenue à ce cours.

2EL1860 – La rénovation, enjeux architecturaux, techniques et urbains

Responsables : **François Cointe, Frédérique Delmas-Jaubert**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'essentiel des villes est déjà là : la proportion de constructions neuves est extrêmement faible comparée aux bâtiments et aux espaces publics existants. C'est pourquoi cet enseignement propose d'approfondir les enjeux de la rénovation, notamment en les différenciant de la construction neuve.

L'étude de cas de rénovations permet de développer une approche d'ingénierie fondée sur l'adaptation à l'existant plutôt que sur l'application de solutions génériques.

Les objectifs généraux du cours sont :

- Montrer comment les bases de données publiques peuvent être mises au service de la planification de la rénovation, grâce aux Systèmes d'Information Géographiques par exemple (utilisation du logiciel gratuit QGIS)
- Utiliser des outils de représentation cartographique des données pour spatialiser les enjeux de la rénovation des villes et des bâtiments
- Identifier les verrous organisationnels et techniques au déploiement massif de la rénovation énergétique et urbaine : concevoir des stratégies de rénovation à partir des données urbanistiques, proposition de loi, ou de régulation pour orienter les actions des acteurs privés et publics de la ville
- Rencontrer les enjeux architecturaux et leur traduction opérationnelle dans le cadre d'une étude de cas

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

- Les différents acteurs impliqués dans la rénovation, (privés et publics) et leurs interactions
- Introduction aux fondamentaux de l'architecture : matériaux, structure, fonction et usage, enjeux esthétiques, sociaux et environnementaux dans la conception architecturale
- Principes constructifs et organisation d'un chantier
- Introduction aux données urbaines, étude de cas
- Réglementation : RE2020, analyse du cycle de vie (bilan carbone), phase chantier et exploitation
- Visite de Nanterre, histoire de la ville : excursion pédagogique

Déroulement, organisation du cours

Chaque cours magistral est accompagné d'une séance de TD encadrée.
Évaluation continue.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation comprend :

- Une évaluation intermédiaire (soutenance intermédiaire ou contrôle continu)
- Une soutenance finale
- Un rapport

Il n'y a pas d'examen sur table.

Support de cours, bibliographie

<https://observatoire-national-batiments.fr>

<https://qgis.org>

<https://www.pavillon-arsenal.com/>

<https://www.architectes.org/actualites/retrouvez-les-podcasts-le-bas-carbone-en-renovation-120660>

Moyens

Equipe enseignante : Louis Massonet, Ulisse Vizzardi, Frédérique Delmas Jaubert

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser un système (ville, quartier, bâtiment) dans sa globalité, expliciter les enjeux d'adaptation et d'atténuation au changement climatique et formuler un cahier des charges de rénovation

C2 : Développer son expertise dans le domaine de la conception, non pas d'un système neuf ou nouveau, mais de la rénovation de l'existant pour prolonger ses qualités d'usage, sa valeur économique, et sa durée de vie.

C8 : Contribuer à la constitution et la mobilisation d'une équipe opérationnelle pour traiter le sujet, identifier les conditions de réussite et de difficulté de fonctionnement de l'équipe, proposer des évolutions permettant une meilleure atteinte des objectifs

2EL1910 – Lois fondamentales de l'Univers : physique des particules et de la gravitation

Responsables : **Christophe Yèche, Samira HASSANI**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction aux quatre interactions fondamentales : physique des particules d'une part et physique de la gravitation et cosmologie d'autre part, tant du point de vue théorique qu'expérimental.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

A. Physique des particules

- A.1 Introduction historique aux particules élémentaires
- A.2 Relativité restreinte et dynamique relativiste
- A.3 Interactions fondamentales
- A.4 Modèle standard de la physique des particules

B. Gravitation

- B.1 Relativité générale : principe d'équivalence, équation du mouvement, équation Einstein
- B.2 Cosmologie : géométrie et expansion de l'Univers, histoire thermique, formation des structures (CMB), matière noire, énergie noire
- B.3 Exemple d'un projet de cosmologie observationnelle : DESI, étude de l'énergie noire et de la gravitation, sélection de quasars, tomographie de l'Univers avec des quasars.

Déroulement, organisation du cours

Sept cours d'une heure trente en cours magistraux sur la physique des particules et sept cours magistraux d'une heure trente sur la gravitation et la cosmologie. Cinq TD d'une heure trente.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation combinera un contrôle final [75% de la note] et plusieurs contrôles continus équipondérés dont leur moyenne suit la règle énoncée dans le RDE [25% de la note].

Toutes les compétences seront évaluées dans les deux types de contrôle. Mais plus spécifiquement, Les compétences C2-1 entreront en jeu surtout au cours de l'examen final, tandis que les compétences C1-2, C2-3 et C6-3 seront testées en contrôle continu et en TD.

Support de cours, bibliographie

Vidéos, diapositives de cours, supports écrits et par ailleurs références bibliographiques distribuées en cours.

Moyens

Les cours seront donnés en français sous la forme de cours magistraux qui se termineront par des exercices comptant comme contrôle continu. Les diapos et des documents écrits en anglais seront mis à disposition.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Se familiariser avec les concepts de particule élémentaire et de symétrie fondamentale
- Maîtriser les concepts d'espace-temps et de quadrivecteur
- Identifier les référentiels inertiels pertinents dans un problème et maîtriser les transformations de Lorentz.
- Comprendre la différence entre conservation et invariance et savoir appliquer la conservation de l'énergie-impulsion dans l'espace-temps.
- Maîtriser les bases de l'algèbre tensorielle avec les notations d'Einstein
- Calculer les corrections relativistes pour le Global Positioning System
- Introduction à la cosmologie

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 - Savoir utiliser un modèle présenté en cours de manière pertinente
C1.3 - Mettre au point une simulation numérique
C2.1 - Approfondir ces connaissances en physique des particules et en cosmologie
C6.3 - Traiter des données de physiques des particules et d'astrophysiques

2EL1920 – Physique quantique et Statistique Avancée

Responsables : **Jean-Michel Gillet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est à la fois la continuité du cours de première année et son complément. Il permet ainsi de revenir sur certains aspects qui, faute de temps, ont été parcourus de manière trop superficielle pour une véritable utilisation et d'accroître sa familiarité avec les concepts de base. Ce sera l'occasion de traiter de la physique statistique des systèmes ouverts (grand canonique) et des statistiques quantiques (bosons et fermions). Des liens seront établis avec les bases de la mécanique Hamiltonienne (et Lagrangienne). Le cours a aussi pour but d'offrir un prolongement vers la physique quantique des noyaux, des atomes et des molécules. Une séance dédiée à l'intrication quantique est prévue.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Le prérequis est :
Cours Physique Quantique et Statistique de première année.

Plan détaillé du cours (contenu)

Dans le désordre, nous aborderons une sélection de sujets parmi lesquels (de manière non contractuelle):
Rudiments de mécanique Lagrangienne et Hamiltonienne
Compléments sur l'oscillateur harmonique quantique
Compléments sur le moment cinétique
Physique statistique des systèmes ouverts
Statistiques quantiques
Fermions
Bosons
Structure fine et hyperfine de l'atome
Théorème variationnel
Retour sur l'atome à N électrons
Aspects de la physique quantique moléculaire
Le modèle de Bethe et Weizsacker du noyau
Le phénomène d'intrication et les inégalités de Bell

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux, travaux dirigés, lectures et projet informatique
8 cours
1 séminaire (3h).
9 TD ou TP

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fait au moyen de 2 volets :

Une épreuve écrite (1h30) dont les questions portent potentiellement sur l'ensemble du programme et qui permet en particulier d'évaluer les connaissances, la maîtrise des méthodes énoncées plus haut et les compétences associées.

La compétence C1, jalon 2 sera testée au travers du projet numérique et d'une question associée lors de l'examen final.

La compétence C2 sera testée lors de questions de la partie rédactionnelle et/ou QCM

Support de cours, bibliographie

Le livre de référence est "Application-Driven Quantum and Statistical Physics" (Vol. 1, 2 et 3, World Scientific).

Des références additionnelles seront être données. **Aucun polycopié n'est fourni.**

Moyens

L'équipe enseignante est composée de : F. Bruneval, M. Ayouz, E. Klein, J-M Gillet

Nombre maximum d'élèves : 100

Utilisation de codes sous : Python et GAMESS

Les locaux seront constitués de : petit amphi pour cours magistral, 3 salles de TD

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du cours, l'étudiant sera capable de :

- Justifier la structure des premières lignes du tableau périodique et les mécanismes de liaisons
- Décider de la nécessité d'une approche quantique sur des problèmes dépendant de la température.
- Différencier un comportement fermionique de celui adopté par des bosons. Il pourra alors justifier des différentes composantes intervenant dans les fonctions réponses telles que la chaleur spécifique, en particulier à basse température.
- Proposer une méthode de modélisation quantique de quelques propriétés importantes d'un gaz moléculaire idéal mais connaîtra des moyens de prendre en compte certaines interactions.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences visées sont

C1.2 (jalon 1 voire 2) : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

C1.3 (jalon 1) : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C2.1 (jalon 2) : Approfondir l'ensemble de ses connaissances sur un domaine choisi

Les compétences sont testées au moyen du projet numérique et d'une question associée lors de l'examen final

2EL2010 – Compréhension, optimisation et simulation des procédés biotechnologiques

Responsables : **Filipa Lopes**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

La biotechnologie est définie comme « l'application de la science et de la technologie à la transformation de matériaux par des agents biologiques et des enzymes pour produire des biens et des services ». Ses domaines d'application sont très larges et comprennent de nombreuses applications industrielles, en particulier dans les secteurs de la santé, l'agroalimentaire, le traitement de déchets, la production d'énergie, la cosmétique ou la pharmaceutique. Les procédés biotechnologiques connaissent un très fort développement, et recrutent fortement. L'objectif général de cet enseignement est d'introduire les approches modernes du génie des bioprocédés nécessaires pour comprendre, améliorer, optimiser et concevoir des bioprocédés innovants, compétitifs et plus respectueux de l'environnement.

Dans ce contexte, le bioprocédé sera abordé par une approche multi-échelle (de la cellule au bioréacteur) et multidisciplinaire aux interfaces, guidés par des outils de simulation et d'optimisation. Ce cours se situe entre les sciences des transferts, le génie des procédés, la physique et les sciences du vivant. Les concepts abordés dans ce cours serviront pour certains enseignements des dominantes (Vivant, Santé et Environnement, Energie, ...) ainsi qu'en appui de certains Pôles Projets (Biotechnologies et Santé, Energie, ...).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Science des Transferts (électif 1A)

Plan détaillé du cours (contenu)

Microbiologie :

- La cellule ;
- Le métabolisme microbien.

Principes de génie des bioprocédés :

- Le bioréacteur ;
- La mise en œuvre d'un bioprocédé ;
- Etudes d'exemples emblématiques : méthanisation, fermentation alcoolique, microalgues, boues activées, ...
- Modes de conduite ;
- Transfert de matière au sein du bioréacteur.

Modélisation multi-échelle du bioprocédé :

- Modélisation macroscopique ;
- Modélisation métabolique ;
- Analyse mathématique des modèles à bilan de masse ;
- Calibration et validation des modèles.

Déroulement, organisation du cours

Les principes généraux seront abordés et illustrés avec des exemples et applications industriels lors de cours magistraux et des TDs. Ainsi les élèves mettront en œuvre les connaissances acquises sur des cas pratiques d'ingénieur. En parallèle, les élèves développeront un projet dont le but est de proposer un schéma de bioprocédé pour une application industrielle donnée. Les élèves appliqueront ainsi leur connaissance à une étude de cas, qu'ils traiteront en groupe. Ils choisiront un sujet parmi différents objectifs biotechnologiques. Ils devront proposer à la fois des procédés et des microorganismes adaptés et mettre en œuvre une modélisation du bioprocédé.

Organisation de l'évaluation

Contrôle final écrit (65%) et présentation orale du projet en équipe (35%).

Support de cours, bibliographie

Copies des présentations des différents intervenants et ouvrages (Madigan, M. (2007). Brock Biologie des microorganismes ; Doran, P. M. (1995). Bioprocess engineering principles. Academic press, ...).

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Filipa Lopes (Dép. Procédés) et Francis Mairet (Ifremer).

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Expliquer les bases du fonctionnement du vivant.
- Identifier les phénomènes (chimiques, physiques et biologiques) qui ont lieu au sein du bioréacteur.
- Ecrire le réseau réactionnel caractérisant les principaux flux de matière au sein d'un bioréacteur, et adapté aux objectifs du modèle.
- Identifier les expressions mathématiques des cinétiques réactionnelles associées au réseau réactionnel.
- Etudier les principales propriétés des modèles dynamiques de bioréacteur (positivité des variables, bornitude, équilibres, stabilité locale).
- Calibrer un modèle de bioréacteur à partir de données expérimentales.
- Proposer un schéma de bioprocédé pour une application donnée.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 – Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 – Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

2EL2020 – Hydrodynamique et interfaces

Responsables : **Hervé Duval**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

"God made solids, but surfaces were the work of the devil" (Wolfgang Pauli)

Plus la matière est divisée (en d'autres termes, plus la taille caractéristique d'un système, solide ou liquide, est petite), plus son comportement est dominé par les forces de surface. Corrélativement, le rôle des forces de volume telle que la gravité par exemple, devient négligeable. L'échelle de taille des systèmes qui nous intéressent ici s'étend typiquement de 10 nm à 1 mm. Les formes de la matière divisée sont multiples : bulles, gouttes, films liquides, colloïdes...

Ces systèmes sont très présents autour de nous. Les applications concernent la biologie (feuilles super-hydrophobes, film liquide à la surface des alvéoles pulmonaires, bulle de cavitation formée par la crevette-pistolet), l'environnement (rôle des gouttes de pluie dans la biosphère, envasement des estuaires), l'industrie (fabrication d'émulsions pour les industries cosmétique, pharmaceutique ou agro-alimentaire, mousses extinctrices ou isolantes, traitements de surface, lab-on-a-chip) ou la vie quotidienne (larmes du vin, remontée capillaire dans les maisons ou les monuments historiques). Un grand nombre d'innovations industrielles repose sur la mise en œuvre et la maîtrise de ces systèmes.

Dans le cadre de ce cours, nous découvrirons les phénomènes liés à la capillarité et au mouillage, la dynamique des interfaces et les instabilités associées. Nous examinerons également le rôle de l'énergie interfaciale lors de l'apparition (germination) d'une nouvelle phase. Enfin, nous aborderons quelques aspects plus spécifiques à l'échelle colloïdale (inférieure au micromètre) : mouvement brownien, forces DLVO.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Sciences des transferts (conseillé)

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours s'articule en trois volets : 9h de **cours de base et de travaux dirigés associés**, 12h consacrées à des **études de cas**, 9.5h dédiées à la réalisation d'un **miniprojet** et à son rendu.

Concepts de base (3 x (1.5h de cours + 1.5h de TD))

1) Notion de tension de surface

Origine physique

Les points de vue thermodynamique et mécanique

Capillarité : loi de Laplace

Interfaces et conditions aux limites des équations de Navier-Stokes

Minimisation d'aire et surfaces minimales

TD n°1 : Ménisques de liquide, forces capillaires, cheveux mouillés et insectes sur l'eau

2) Mouillage

Surfaces solides idéales : loi de Young-Dupré

Hystérésis d'angle de contact

Influence de la rugosité de surface
Influence des hétérogénéités chimiques
Vers les surfaces superhydrophobes
Dynamique de la ligne triple
TD n°2 : Modélisation des angles de contact d'équilibre sur des surfaces texturées

3) Tensioactifs : équilibre et dynamique
Des molécules amphiphiles
Concentration de surface et équation d'adsorption de Gibbs
Micelles et concentration micellaire critique
Tension de surface dynamique et dynamique des tensioactifs
Rhéologie interfaciale
TD n°3 : Formation et drainage d'un film de savon

Etudes de cas (4 x 3h)

Chaque étude de cas donne l'opportunité de se pencher sur un phénomène particulier, d'intérêt industriel ou pratique, d'appliquer les concepts introduits dans la première partie du cours et de se familiariser avec différentes méthodes de modélisation ou outils mathématiques. Les études de cas ont la forme de « grands TD », réalisés par groupes de 3 à 4 étudiants et encadrés par un enseignant. La durée de 3h par étude laisse le temps à chaque groupe de bien s'approprier le sujet, de construire sa démarche et d'élaborer sa solution, en autonomie, avec l'appui méthodologique de son encadrant. A l'issue des 3h, chaque groupe fournit un compte rendu écrit (manuscrit ou par traitement de texte, au choix) de son travail.

5) Montée capillaire et imbibition
De l'ascension de la sève brute dans les arbres à la fabrication de matériaux composites
Hauteur d'équilibre dans un tube vertical
Dynamique de l'imprégnation : régime inertiel et régimes visqueux
Montée dans un coin

6) Drainage et dépôt de films liquides sur une plaque plane verticale
Des traitements anti-corrosion aux couches anti-reflet des verres à lunette
Drainage d'un film de liquide
Enduction par trempage
Analyse en loi d'échelle
Théorie de Landau-Levich-Derjaguin : ménisque dynamique et raccordement asymptotique

7) Etalement de gouttes
Revêtements, impression à jet d'encre et enquêtes criminelles
Angle de contact dynamique et vitesse de la ligne triple
Cas du mouillage parfait : loi de Tanner
Influence de la vitesse d'impact sur le diamètre d'étalement maximal
Les différents régimes d'impact

8) Mesure de tension de surface
Cette étude de cas comporte une partie expérimentale. Elle est réalisée dans les salles de travaux pratiques du Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (bâtiment EIFFEL, Univers Vivant). Deux techniques de mesure de tension de surfaces sont mises en œuvre, analysées et modélisées :
La méthode de la goutte pesée (ou stalagmométrie)
La méthode de la goutte pendante

Miniprojet (7.5h + 2h)

Le mini-projet est l'occasion d'étudier plus en détails un phénomène physique, un système ou un objet relevant de la physique de la matière divisée. Il permet non seulement d'appliquer et d'approfondir les différents concepts abordés en cours mais aussi d'explorer d'autres pans de la physique de la matière divisée. Le miniprojet est réalisé par groupes de 3 à 4 étudiants. A titre d'exemple, voici une liste non exhaustive de thèmes choisis par différents groupes les années précédentes : Ascension de la sève dans les arbres, Physique des pièges utilisés par les plantes carnivores, Marangony bursting, Détergence et rolling-up, Caléfaction, Analyse de l'impact de gouttes en science forensique, Gerris artificiel ... Partant du thème retenu, le travail consiste à :

- Dégager une problématique,
- Réaliser et présenter des expériences de « coin de table » permettant d'illustrer le thème et/ou la problématique choisie
- Identifier les mécanismes physiques mis en jeu
- Au choix : conception d'une expérience, campagne d'essais, analyse des résultats expérimentaux et proposition d'un modèle simple permettant de rendre compte de ces résultats OU développement d'un

modèle plus complexe, implémentation informatique, étude paramétrique et analyse/discussion des résultats obtenus

Les livrables sont :

- Un fichier ppt qui rend compte du travail effectué (le support de la présentation orale + annexes détaillant les expériences, les calculs, la liste des références bibliographiques)
- Un exposé oral de 20 min avec une démonstration du code ou un film de la manip en fonctionnement, suivi de 10 min de questions (durée ajustée en fonction du nombre de groupes)

Déroulement, organisation du cours

Le cours s'articule en trois volets (voir Contenu pour de détails sur chacun des volets): 9h de cours de base et de travaux dirigés associés, 12h consacrées à des études de cas (incluant 3h de travaux pratiques), 9.5h dédiées à la réalisation d'un miniprojet et à son rendu.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu (note sur 6, basée sur les rendus à l'issue de chaque étude de cas) + Miniprojet (note sur 14, Fichier ppt + soutenance orale + réponses aux questions)

Support de cours, bibliographie

- Matériel de cours fourni : copie des slides, énoncés des problèmes, corrigés
- Quelques références bibliographiques :
 - P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart and D. Quéré, Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves, Springer, New York, 2004.
 - J. Israelachvili, Intermolecular and surface forces, Academic Press, Elsevier, 3rd edition, 2011.
 - E. Guyon, J.P. Hulin, L. Petit, Hydrodynamique physique, EDP Sciences, 3ème édition, 2012.

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Hervé Duval, Marie-Laurence Giorgi, Irma Liascukiene, Jacopo Seiwert

- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : ImageJ (logiciel libre), python avec les modules scipy, matplotlib et numpy (logiciel libre)
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : aucune

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Lister et expliquer les mécanismes et phénomènes physiques intervenant dans les systèmes dispersés les plus courants, dans l'industrie ou la vie quotidienne ;
- Définir et calculer les longueurs, temps et vitesses caractéristiques associés ;
- Interpréter le comportement dynamique d'un système dispersé ;
- Construire un modèle capturant l'essentiel de la physique de ce système et permettant de décrire son évolution ;
- Proposer un dispositif/protocole expérimental permettant de valider ce modèle.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines.

C1.2 : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème.

C1.3 : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation.

C2.1 : Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

2EL2030 – Génomique et biologie synthétique en biotechnologie sanitaire et industrielle

Responsables : Behnam Taidi

Département de rattachement : DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS

Langues d'enseignement : ANGLAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 60

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 30,50

Catégorie d'électif : Sciences de l'ingénieur

Niveau avancé : Non

Présentation, objectifs généraux du cours

L'avènement récent des techniques de biologie moléculaire à haut débit et la compréhension approfondie de la génétique fondée sur les progrès des méthodes de séquençage ont submergé **la biotechnologie médicale et industrielle**. De plus, la **biologie synthétique** (où des systèmes basés sur ou inspirés par la biologie sont conçus et construits pour mettre en place de nouvelles fonctions qui n'existent pas dans la nature) a ouvert un tout nouveau champ d'opportunités où les ingénieurs interagissent avec des biologistes, des chimistes et des informaticiens pour concevoir et fabriquer des dispositifs diagnostiques et thérapeutiques.

Un cours est prévu pour les étudiants afin de **s'immerger dans l'univers de la génétique et de la biologie synthétique** où les **derniers concepts et applications industrielles** sont dévoilés et discutés.

Le but de ce cours est d'enseigner au futur ingénieur la structure, **le fonctionnement et la régulation du génome et comment cela peut être lié aux applications industrielles et médicales**. De plus, en apprenant la nature des signaux analogiques et des données génétiques numériques, l'ingénieur pourra choisir les méthodes les plus pertinentes pour le traitement et l'interprétation des données. Cela transformera le bassin d'informations en connaissances informatives qui pourraient être utilisées pour la fourniture de nouveaux produits et services. Ainsi, à la fin du cours, les étudiants auront une vision stratégique sur la façon de progresser dans le domaine de la génomique et de la biologie synthétique : de l'exploration d'une accumulation de données sans précédent à l'extraction de connaissances novatrices et la transformation des données en nouvelles connaissances rationnelles et utiles.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Notions générales de biologie, de biochimie, de génétique et de construction d'organismes génétiquement modifiés.

- Le suivi de ce cours sera grandement facilité par des connaissances préalables en biologie moléculaire et en génétique.
- Une introduction à la modélisation des voies biochimiques
- Le cours est dispensé en anglais, un niveau d'anglais raisonnable serait donc utile.

Plan détaillé du cours (contenu)

Le programme se compose de quatre modules, dont deux sont des cours de base communs qui ouvrent la voie aux deux modules suivants, axés sur l'application de la biologie synthétique à la santé humaine et à la biotechnologie industrielle.

- **Introduction** : Structure et régulation du génome, techniques de clonage, biologie synthétique
- **Analyses génomiques par des méthodes à haut débit** : De l'ADN génomique à l'ARN
- **Applications à la santé humaine** : Modifier et reprogrammer le génome comme base de la thérapie génique et cellulaire, à base de cellules souches et de cellules souches pluripotentes induites (iPSC).

- **Applications en biotechnologie industrielle** : Ingénierie du génome, du châssis cellulaire, allocation des ressources, ingénierie des circuits, ingénierie métabolique, rôle de la conception assistée par ordinateur en biologie synthétique et ingénierie métabolique, introduction à iGEM

Déroulement, organisation du cours

Le module est organisé en cours magistraux pour introduire les connaissances et outils méthodologiques 28,5 heures de cours
Ils sont obligatoires et compteront dans la note finale au même titre que l'examen écrit final.
La présence aux quiz est obligatoire, une absence non justifiée sera considérée comme un zéro.

Organisation de l'évaluation

Examen écrit final de 2 heures (aucun document et aucun ordinateur n'est permis)

- Contrôle continu pour les cours magistraux donnés par Marie-Anne DEBILY ; la présence est donc obligatoire pour tous ces cours magistraux qui couvrent la moitié de l'électif. Le contrôle en continu compte pour 40% de note de l'examen mais il ne compte pas pour l'examen de rattrapage.
- Il y a 4 contrôles continus, chacun compte pour 10% de grade finale.
- L'examen final compte pour 60%
- Les examens de rattrapage porteront sur l'ensemble du cours

Support de cours, bibliographie

Diaporamas disponibles en ligne

Moyens

Equipe enseignante (nom des enseignants des cours magistraux) : Behnam TAIDI (CS-LGPM), Marie-Anne DEBILY (Gustave Roussy), John Love (Exeter University), Ioana POPESCU (Université d'Evry-val-d'Essonne), Matthieu JULES (AgroParisTech)

- Inscription maximale : 40 étudiants
- Logiciel, nombre de licences requises : Plateforme d'analyse Knime (open source)
- Salles de classe spécifiques à l'équipement : Salle informatique équipée d'un bureau (Linux ou Windows OS) pour un module de 4 heures
- Contrôle continu pour une partie du cours avec un examen final de 2 heures pour la seconde moitié du cours. La présence aux cours magistraux couvrant la première moitié du cours est obligatoire car ils comprennent les quiz d'évaluation continue qui contribueront à la note finale. Toute absence non justifiée sera considérée comme un zéro et diminuera donc la note moyenne à la fin du cours après l'examen écrit.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de l'enseignement les étudiants devraient être en mesure de :

- Connaître les outils et les développements techniques qui permettent de mieux comprendre comment les génomes fonctionnent et ont une action de régulation.
- Comprendre les contributions des génomes à l'identité d'une personne et comprendre les principes généraux qui régissent l'évolution immunitaire physiologique et pathologique
- Comprendre comment l'information génomique peut être utilisée pour mettre au point de meilleures thérapies
- Se renseigner sur l'état actuel des cellules souches et sur les nouveaux développements thérapeutiques
- Avoir une vision stratégique de la façon de progresser dans le domaine de la génomique : de l'exploration de données à l'extraction de connaissances novatrices

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Jalon 1

- C1.2 : Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, Économiques et humaines. Jalon 1
- C1.3 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe. Jalon 1

2EL2040 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrifications.

Responsables : **François Puel**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le Génie des Procédés moderne consiste à **concevoir, exploiter, optimiser des procédés**, destinés à l'**élaboration de produits et services variés** dans de nombreux secteurs classiques et high-tech (pharmacie, pétrole, chimie fine, agroalimentaire, cosmétiques, traitement de l'eau et des déchets, matériaux, biotechnologies, etc.) et à la production d'**énergies** traditionnelles, décarbonées et renouvelables.

Ce cours est une introduction au Génie des Procédés et des Bioprocédés et à ses méthodologies. **Les fondamentaux enseignés permettent aux élèves d'acquérir des outils généralistes**, transposables aisément à de multiples domaines.

La durabilité des procédés est un enjeu majeur.

Certains procédés s'inscrivent intrinsèquement comme des outils de choix dans la stratégie de **développement durable** aux différentes échelles (locale et mondiale), tel que le recyclage et la valorisation de nombreux produits ou la purification d'effluents liquides et gazeux. Il n'en demeure pas moins que, de manière générale, **de nouveaux procédés doivent être développés et que les procédés existants doivent être optimisés (intensification)**, afin de réduire les impacts du secteur industriel. Les défis associés à cette dynamique sont multiples : réduction des coûts, des risques et dangers, des déchets, des consommations en énergie et en matières premières.

Par ailleurs, les **bioprocédés** connaissent un très fort développement, pour deux raisons : (i) l'emploi du vivant pour transformer la matière, épurer des systèmes pollués (liquide, solide), les microorganismes se comportant comme des usines et (ii) l'emploi de biomasse renouvelable en remplacement de ressources fossiles.

Ce cours s'appuie sur des **exemples concrets** (simplifiés afin de les rendre accessibles), pour permettre aux étudiants **d'appliquer et de s'approprier les fondamentaux** du cours, tout en **s'intéressant à des procédés orientés vers le développement durable**.

Certaines études de cas se concentrent sur des bioprocédés déployés en **biotechnologie industrielle et environnementale**. Le bioprocédé est étudié **à l'échelle du bioréacteur industriel**. La description et compréhension des processus biologiques (métabolisme, maintenance, etc.) à l'échelle de la cellule ne sont pas abordées. Les agents biologiques sont donc considérés comme des catalyseurs cellulaires transformant des matières premières en des produits selon des lois cinétiques fournies, dont l'application ne nécessite **aucun prérequis en biologie**.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Aucun

Ce cours n'est pas accessible aux étudiants ayant suivi le cours analogue en ST5 (2SC5210)

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction Génie des Procédés au service du Développement Durable ; Bilan matière

Étude de cas : Procédé de production de bioéthanol de 1^{ère} génération (*conversion des matières premières renouvelables par biotechnologies blanches*)

2. Modèles d'écoulement (parfaitement agité et piston)

Étude de cas :

Valorisation de Lactoserum (*Valorisation de résidu de l'industrie agroalimentaire par biotechnologies blanches*)

Dimensionnement de bassins de traitement biologique d'une station d'épuration des eaux usées urbaines (*procédé au service de l'environnement, réduction des volumes de réacteurs et de l'emprise au sol*)

3. Bilans thermiques : calorifique / enthalpique

Étude de cas : Dimensionnement d'une cuve de vinification et de son contrôle de température (*optimisation de la géométrie d'un réacteur et de sa régulation thermique*)

4. Équilibres liquide-vapeur, distillations simple et multiétagée

Étude de cas : Distillation simple et multiétagée de bioéthanol (*production d'alternatives aux carburants fossiles*)

5. Transfert de Matière : Diffusion et Convection

Étude de cas : Production en Raceway de Microalgues Spirulina (*production durable de nutriments pour alimentation humaine et animale*)

6. Transfert de Matière : technologie à Contact Permanent

Étude de cas :

Traitement d'un effluent gazeux. Élimination d'un polluant (*procédé pour l'environnement*)

Épuration de biogaz pour produire du biométhane par technologie membranaire (*production d'un vecteur énergétique renouvelable pour usages conventionnels*)

Déroulement, organisation du cours

Le module est organisé en cours magistraux (12h), pour introduire les connaissances et outils méthodologiques, et en TD (13.5h) afin d'appliquer les acquis dans le cadre d'études de cas. La modalité pédagogique des cours magistraux (présentiel ou classe inversée) sera discutée collectivement lors de la première séance. Les TD seront effectués en présentiel. Un de ces TD consistera à un mini projet à réaliser par groupe en autonomie. La dernière session consistera à résumer les 6 thèmes du cours (modalité collaborative)

Organisation de l'évaluation

Homework : Présentation, par groupe, d'un projet bibliographique dont le sujet s'inscrit en prolongement du cours (40 % de la note) ; ces présentations auront lieu par affiche (poster).

Contrôle final individuel, sur table (2h) : Questions de cours + Étude de cas (60 % de la note).

Support de cours, bibliographie

Diaporamas

• Techniques de l'ingénieur :

- + Charpentier J., Génie des procédés, développement durable et innovation – Enjeux et perspectives, 2013
- + Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Méthodologie, 2000
- + Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Isambert A., Transfert de matière – Distillation compartimentée idéale, 2001
- + Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière- Autres opérations compartimentées, 2002
- + Buch A., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière- Cinétique du transfert de matière entre deux phases, 2008
- + Sun L.M., Thonnellier J.Y., Perméation gazeuse, 2004
- + Vuillermans J., Réacteurs chimiques – Principes, 1994
- + Boulinguez B., Le Cloirec P., Purification de biogaz – Élimination des COV et des siloxanes, 2011

• Ouvrages généraux : Perry Chemical Engineer's Handbook, 8th edition, 2007, McGraw-Hill, New York

• Ouvrages spécifiques :

- Génie des réacteurs et bioréacteurs

- + Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 3A: Chemical and Biochemical Reactors and Reaction Engineering, 4th Edition, 2017, Elsevier. Oxford

+ Fogler H.S., Elements of chemical reaction engineering, 5th Edition, 2016, Pearson Education, Englewood Cliffs
 + Levenspiel O., Chemical Reaction Engineering, 3rd edition, 1999, John Wiley and Sons, New York
 + Villadsen J., Nielsen J., Lidén G., Bioreaction Engineering Principles, 3rd Edition, 2011, Springer, New York
 - Transferts de chaleur et de matière
 + Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt F., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition, 2011, John Wiley and Sons, New York
 + Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 1B: Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Application, 7th Edition, 2018, Elsevier, Oxford
 + Cussler E.L., Diffusion Mass Transfer in Fluid systems, 3rd Edition, 2009, Cambridge University Press, Cambridge
 + Treybal R., Mass Transfer Operations, 4th Edition, 1982, McGraw Hill, New York
 - Production de bioéthanol
 + Cardona C.A., Sanchez O.J., Gutierrez L.F, Process synthesis for fuel ethanol production, 2010, CRC Press, Boca Raton
 + Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K., Dalai A.K, Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010, 578–597
 + Vohra M., Manwar J., Manmode R., Padgilwar S., Patil S. Bioethanol production: Feedstock and current technologies, Journal of Environmental Chemical Engineering 2, 2014, 573–584

Moyens

Équipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : François PUEL / Victor POZZOBON
 Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
 Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Excel, Python
 Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Aucune

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Lister les modes de transfert de matière,
- Identifier les différentes modes de transfert de matière (diffusion / convection) à l'œuvre dans une configuration donnée et les éventuels couplages entre transferts de matière et thermique,
- Écrire les bilans de matière, en prenant en compte, si nécessaire, des cinétiques réactionnelles chimiques ou biochimiques,
- Simplifier un problème en apparence compliqué, où plusieurs phénomènes de transfert coexistent, en ne retenant que les modes de transfert significatifs (qui ont un impact),
- Traduire les phénomènes en équations en utilisant les bilans fondamentaux,
- Dimensionner des technologies de conversion et de séparation, sur la base de considérations thermodynamiques et cinétiques.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes pour traiter le problème. **Jalon 2**

C1.3 : Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation. **Jalon 1**

C2.4 : Créer de la connaissance, dans une démarche scientifique. **Jalon 2**

C7.1 : Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée. **Jalon 2**

C7.2 : Convaincre en travaillant sur la relation à l'autre. Comprendre les besoins et les attentes de ses interlocuteurs. En tenir compte de façon évolutive. Susciter des interactions. Créer un climat de confiance. **Jalon 2**

2EL2050 – Biomécanique et matériaux du vivant

Responsables : **Elsa Vennat**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le lien entre la mécanique et le vivant est bien plus fort qu'on ne le pense au premier abord. Savez-vous que notre tissu osseux évolue et s'adapte en fonction du chargement mécanique qu'il subit ? Cela est important dans notre vie quotidienne (une activité physique modérée régulière induit une meilleure qualité osseuse) mais aussi dans les soins médicaux (comment remplacer ou régénérer du tissu osseux après un accident ?).

Dans ce cours nous allons aborder les liens entre mécanique et vivant, de la biomécanique à la mécanobiologie.

Des outils seront d'abord mis en place pour décrire, modéliser et résoudre un problème de mécanique où des matériaux du vivant sont en jeu : rappels de Mécanique des Milieux Continus, anisotropie des composites naturels, viscoélasticité des tissus mous, introduction et application de la méthode des éléments finis pour résoudre des problèmes de complexité croissante.

Dans un second temps, ces outils seront utilisés pour caractériser et modéliser un matériau du vivant au choix (os, dent, cellules, bois...) dans le cadre d'une série de travaux pratiques numériques et expérimentaux. Les matériaux du vivant sont par nature multi-échelle. Une démarche complète sera menée pour caractériser et modéliser en trois étapes le matériau du vivant choisi :

- Recherche bibliographique (présentation des outils puis recherche par groupe)
- Observations aux différentes échelles pertinentes : observation d'échantillons au microscope, visualisation tridimensionnelle de la microstructure, traitement et analyse d'images.
- Étude expérimentale du comportement (des cellules sous contraintes, des tissus sous chargement...), modélisation éléments finis et analyse critique

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

G6

Prérequis

1EL5000 - Mécanique des milieux continus

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours se déroule en deux parties :

- Une partie assez classique avec des séances de cours puis TD
- Une deuxième partie plus pratique avec des séances de travail (bibliographie, expérimentation et simulations numérique sur un tissu biologique)

Déroulement, organisation du cours

Travaux pratiques et travaux dirigés

Organisation de l'évaluation

Examen (50%) + Rapport sur les séances expérimentales et numériques (50%)

Support de cours, bibliographie

S.C. Cowin. Bone Mechanics Handbook. CRC Press, Boca Raton, 2001.
G. Puel. Polycopié de Mécanique des milieux continus 1ère année CentraleSupélec.

Moyens

Enseignants : Elsa VENNAT
Outils logiciels : Comsol Multiphysics, ImageJ (ou FIJI)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, les élèves seront capables :

- De décrire les équations d'un problème de mécanique des milieux continus en proposant une (des) loi(s) de comportement adaptée(s) au(x) tissu(s) biologique(s) impliqué(s) + résoudre le problème dans des cas simples.
- De décrire le comportement de tissus biologiques à partir de courbes expérimentales (traction/compression),
- De savoir trouver des données fiables dans la bibliographie,
- De caractériser un tissu biologique poreux par analyse d'images sur ImageJ
- De proposer un modèle géométrique simple et de mener une étude numérique par la méthode des éléments finis (logiciel COMSOL) de ce tissu pour évaluer son module d'Young effectif
- De commenter de façon étayée le lien entre microstructure et propriétés mécaniques pour un tissu biologique dur

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1
C2
C3

2EL2115 – Gestion de l'innovation technologique

Responsables : **Diego-Manuel CEBREROS SAETTONE, Éléonore MOUNOUD**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les technologies disruptives redéfinissent les industries à un rythme sans précédent, remettant en cause les modèles économiques traditionnels et ouvrant de nouvelles opportunités d'innovation. Ce cours offre aux étudiants en ingénierie un cadre rigoureux pour comprendre, anticiper et naviguer innovations disruptives. A travers des concepts théoriques et des études de cas pratiques, les étudiants exploreront la dynamique de l'innovation, depuis l'émergence d'idées révolutionnaires dans les laboratoires de recherche jusqu'à leur commercialisation et leur adoption à grande échelle. Le programme dotera les futurs ingénieurs d'outils stratégiques et analytiques pour reconnaître les schémas de rupture, évaluer le potentiel des marchés et comprendre les problématiques et solutions associées à l'exploitation du changement technologique pour un avantage compétitif.

En intégrant des études de cas réels — allant des opportunités manquées de Xerox PARC et du Minitel à l'essor de l'informatique numérique et des économies de plateformes — les étudiants participeront à des discussions dynamiques et à des exercices pratiques simulant les défis auxquels font face les acteurs disruptifs et les entreprises établies. Le cours mettra également l'accent sur les impacts sociétaux et réglementaires de la disruption, notamment son rôle dans la durabilité environnementale et l'évolution de la gouvernance de l'innovation. Que les étudiants aspirent à créer leur propre start-up, à stimuler l'innovation au sein d'entreprises établies ou à influencer les politiques publiques, ce cours leur fournira les connaissances essentielles pour devenir des leaders à une époque de transformation technologique profonde.

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Professeur : **Diego Cebberos**, <https://www.linkedin.com/in/diego-cebreros-saettone-94659a66/>

Cours Magistral 1 : Qu'est-ce qu'une technologie disruptive ?

Cette séance introduit le concept de technologies disruptives, en distinguant innovations incrémentales et disruptives. Elle explore le cadre théorique de Clayton Christensen et présente des exemples historiques de transformations industrielles.

Séance pratique 1 : Organisation

Les étudiants s'organiseront en groupes de discussion et attribueront les rôles pour l'analyse des études de cas. Ils définiront également des critères d'évaluation des technologies disruptives pour les séances suivantes.

Cours Magistral 2 : Qui développe les technologies disruptives ?

Cette séance examine le rôle des start-ups, des instituts de recherche et des entreprises établies dans le développement de technologies disruptives. Elle traite des retombées de connaissances (« knowledge spillovers ») et de l'influence des structures organisationnelles sur l'innovation.

Séance pratique 2 : Xerox

Analyse des innovations développées par Xerox au sein du PARC et étude des raisons pour lesquelles l'entreprise n'a pas réussi à commercialiser des technologies clés comme l'interface graphique (GUI) et Ethernet.

Cours Magistral 3 : De la science aux organisations

Exploration du passage des découvertes scientifiques aux innovations commerciales. Cette séance aborde les écosystèmes d'innovation, le transfert de technologie et le rôle des mécanismes de financement.

Séance pratique 3 : Théorie de l'information et télécommunications

Analyse de l'impact de la théorie de l'information de Claude Shannon sur les télécommunications modernes et l'internet.

Cours Magistral 4 : Prévoir la disruption

Séance consacrée aux défis liés à la prévision des disruptions technologiques. Analyse des limites des méthodes prédictives, de l'émergence des standards dominants et du rôle des premiers utilisateurs.

Séance pratique 4 : Minitel

Étude de cas sur l'échec du Minitel français à opérer la transition vers l'ère internet.

Cours Magistral 5 : Concurrence avec les acteurs établis

Analyse de la façon dont les entreprises disruptives concurrencent les acteurs historiques, des stratégies d'entrée sur le marché, de l'importance des actifs complémentaires et des défis auxquels font face les entreprises établies.

Séance pratique 5 : De la niche à l'échelle – Modèle de compétition d'Adner

Les étudiants modéliseront la disruption à l'aide du cadre d'Adner, en étudiant comment les start-ups évoluent depuis des marchés de niche.

Cours Magistral 6 : Gérer la disruption – Quelles stratégies pour les disruptifs ?

Exploration des stratégies utilisées par les entreprises disruptives, telles que la modularité, les plateformes ouvertes et le développement d'écosystèmes.

Séance pratique 6 : Modularity and Platform Economy

Analyse de cas d'études sur la conception modulaire des produits (ex. : écosystèmes Android vs. iOS).

Cours Magistral 7 : Comment les marchés évoluent-ils ?

Étude des effets post-disruption : consolidation des marchés, évolution des standards industriels et changements dans les comportements des consommateurs.

Séance pratique 7 : Analyse de l'évolution du marché

Évaluation par les étudiants de l'évolution d'un secteur disrupté, en se concentrant sur la consolidation et les nouveaux modèles économiques.

Cours Magistral 8 : Comment les organisations changent-elles ?

Discussion sur les transformations structurelles que subissent les entreprises après une disruption, de la réinvention du modèle d'affaires à la restructuration d'entreprise.

Séance pratique 8 : Réinvention du modèle d'affaires
Analyse des stratégies de restructuration et de leur impact sur le succès à long terme.

Cours Magistral 9 : Comment la réglementation évolue-t-elle ?

Explore comment les gouvernements et les organismes de régulation répondent à la disruption, y compris les questions de concurrence, les efforts de normalisation et le développement de nouveaux cadres politiques.

Séance pratique 9 : Simulation de la réponse réglementaire : Le professeur analysera et discutera de la manière dont les décideurs politiques réagissent face à une technologie disruptive.

Cours Magistral 10 : La disruption pour la durabilité environnementale.

Examine comment la disruption peut contribuer au développement durable, en mettant l'accent sur les transitions énergétiques, les économies circulaires et les technologies à faible émission de carbone.

Séance pratique 10 : Cartographie de l'innovation durable : Le professeur réalisera une cartographie des innovations qui favorisent la transformation durable des industries.

Déroulement, organisation du cours

Le cours est divisé en séances théoriques et pratiques. Lors des séances théoriques, l'instructeur donnera une master class, présentant les concepts principaux et les idées clés à explorer. Les séances pratiques sont dirigées par les étudiants, afin de créer un contexte d'apprentissage actif et de discussion.

Chaque séance pratique est structurée en deux parties :

Analyse de cas (Première partie de 30 minutes) : Un groupe d'étudiants analysera un cas spécifique, en appliquant les concepts issus de la séance théorique.

Débat et discussion (Deuxième partie d'une heure) : Un autre groupe d'étudiants animera un débat, engageant leurs pairs dans des discussions critiques.

Organisation de l'évaluation

Examen final : quiz sans documents, 25 %

Travail individuel : essai avec documents, 25 %

Travail de groupe : présentation d'une étude de cas, 50 %

Support de cours, bibliographie

- Adner, R. (2002). "When Are Technologies Disruptive? A Demand-Based View of the Emergence of Competition." *Strategic Management Journal*, 23(8), 667-688.
- Adner, R., & Snow, D. C. (2010). "Old Technology Responses to New Technology Threats: Demand Heterogeneity and Technology Retreats." *Industrial and Corporate Change*, 19(5), 1655-1675.
- Adner, R., & Zemsky, P. (2005). Disruptive technologies and the emergence of competition. *RAND Journal of Economics*, 229-254.
- Anderson, P. W. (1972). More Is Different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science*, 177(4047), 393-396.
- Arrow, K. J. (1969). Classificatory notes on the production and transmission of technological knowledge. *The American Economic Review*, 59(2), 29-35.
- Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*. Harvard Business Review Press.
- Christensen, C. M., & Raynor, M. E. (2003). *The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth*. Harvard Business Review Press.

- Christensen, C. M., Dyer, J., & Gregersen, H. (2011). *The Innovator's DNA: Mastering the Five Skills of Disruptive Innovators*. Harvard Business Review Press.
- Chesbrough, H. W. (2003). *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Harvard Business Review Press.
- Baldwin, C. Y., & Clark, K. B. (2000). *Design Rules: The Power of Modularity*. MIT Press.
- Bower, J. L., & Christensen, C. M. (1995). "Disruptive Technologies: Catching the Wave." *Harvard Business Review*, 73(1), 43-53.
- Foster, R. (1986). *Innovation: The Attacker's Advantage*. Summit Books.
- Gans, J. S., & Stern, S. (2003). "The Product Market and the Market for 'Ideas': Commercialization Strategies for Technology Entrepreneurs." *Research Policy*, 32(2), 333-350.
- Gawer, A., & Cusumano, M. A. (2002). *Platform Leadership: How Intel, Microsoft, and Cisco Drive Industry Innovation*. Harvard Business Review Press.
- Borrás, S. (2011). "Policy Learning and the Changing Governance of Innovation Systems." *Research Policy*, 40(5), 715-728.
- Henderson, R. M., & Clark, K. B. (1990). "Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms." *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 9-30.
- Helfat, C. E., & Raubitschek, R. S. (2000). "Product Sequencing: Co-evolution of Knowledge, Capabilities, and Products." *Strategic Management Journal*, 21(10-11), 961-979.
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press.
- Simon, H. A. (2001). Complex systems: The interplay of organizations and markets in contemporary society. *Computational & Mathematical Organization Theory*, 7, 79-85.
- Rogers, E. M. (1962). *Diffusion of Innovations*. Free Press.
- Stigler, G. J. (1971). "The Theory of Economic Regulation." *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 2(1), 3-21.
- Teece, D. J. (1986). "Profiting from Technological Innovation: Implications for Integration, Collaboration, Licensing and Public Policy." *Research Policy*, 15(6), 285-305.
- Tushman, M. L., & O'Reilly, C. A. (1996). "Ambidextrous Organizations: Managing Evolutionary and Revolutionary Change." *California Management Review*, 38(4), 8-30.
- Tripsas, M. (1997). "Unraveling the Process of Creative Destruction: Complementary Assets and Incumbent Survival in the Typesetter Industry." *Strategic Management Journal*, 18(S1), 119-142.

Moyens

- **Fiches de cas** : À chaque séance pratique, les étudiants recevront une brève description d'un cas d'étude accompagnée d'un ensemble de questions à débattre. Un résumé des concepts clés abordés dans la partie théorique sera également fourni.
- **Présentations (slide-decks)** : Un ensemble de supports de présentation sera mis à disposition pour accompagner les séances et structurer les apprentissages.
-

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Définir et différencier les innovations progressives et disruptives.

- Analyser le développement des technologies disruptives.
- Examiner comment la recherche se traduit en applications commerciales.
- Comprendre les défis liés à la prévision de la disruption technologique.
- Analyser comment les acteurs disruptifs pénètrent et se développent sur des marchés concurrentiels.
- Explorer les stratégies utilisées par les entreprises établies pour répondre à la disruption.
- Évaluer comment les industries se consolident et s'adaptent après un événement disruptif.
- Analyser les transformations structurelles que subissent les entreprises en réponse à la disruption.
- Identifier comment les gouvernements et les autorités de régulation réagissent face aux technologies disruptives.
- Évaluer le rôle des politiques publiques et de la régulation dans la structuration des paysages de l'innovation.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences en pensée critique et en analyse

Recherche

Prise de décision stratégique

Analyse économique

Analyse des politiques et de la régulation

2EL2140 – Stratégie, Marketing et Organisation

Responsables : **Éléonore MOUNOUD**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours permet de mettre en œuvre de façon pertinente et raisonnée les principaux modèles de la stratégie et du marketing. Il permet en particulier d'approfondir la notion de business model et d'apprendre à utiliser le concept de business model pour rendre compte des transformations passées et futures de développement des entreprises. Les enjeux stratégiques liés au développement des services, à la globalisation des chaînes de valeur, à l'innovation sont ainsi abordés à travers des études de cas. Les enjeux sociétaux de transformation numérique et de transition écologique ainsi que leur impact sur les business modèles seront également traités. Les principes de l'économie de fonctionnalité et de l'économie circulaire sont présentés et appliqués. Le cours invite les étudiants à une réflexion personnelle sur la simultanéité mais aussi la rivalité entre ces deux transitions à partir de l'analyse critique des stratégies de grandes entreprises en groupe de 3 ou 4 étudiants sur plusieurs séances du cours.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Cours commun de gestion et transformation des entreprises ou cours équivalent pour les étudiants en échange (analyse PESTEL, SWOT, stratégies génériques, notions de parties prenantes et de RSE responsabilité sociale de l'entreprise, bases de l'économie circulaire)

Start up Week : business model canvas

Le cours est organisé selon les règles de la classe sans écran (device free classroom)

Plan détaillé du cours (contenu)

Les étudiants doivent suivre (gratuitement) le cours en ligne Réussir la transition énergétique sur la plateforme SATOR

1. Introduction - rappel des enjeux globaux & des transformations stratégiques, organisationnelles et managériales
2. Cours - Business model innovation - Cas Nespresso / détail des composantes du business model
3. Cours - Stratégies / calcul du TCO / notion de fonctionnalité - Cas Michelin solutions
4. Cours sur les outils et marchés carbone avec Alexandre Joly, Carbone 4
5. Atelier méthodologique : la démarche d'analyse d'un grand groupe, données financières et extra financières
6. Mooc Réussir la transition énergétique sur la plateforme SATOR de Alexandre Joly, Carbone 4
7. Atelier interactif. Apprendre à lire les données financières, faire une synthèse
8. Atelier interactif. Apprendre à mettre en perspective les données extra-financières
9. Atelier interactif. Apprendre à comparer deux entreprises
10. Examen écrit

Déroulement, organisation du cours

Le cours électif SMO sera organisé selon le principe de la classe sans écran pour (device-free classroom ou classe sans écran)

Cours 6h

Conférences 6h

Atelier / workshop 12h

Mooc 6h

Examen écrit 2h

Organisation de l'évaluation

Travail demandé :

Les étudiants doivent suivre (gratuitement) le cours en ligne Réussir la transition énergétique sur la plateforme SATOR et valider certains modules

Un travail de préparation est demandé en amont des séances, sous la forme de notes de lecture préalables aux cours, ateliers et études de cas.

Les séances seront majoritairement sur le format de "session sans écran" ("device-free classes"), sans ordinateur ni téléphone

Les supports des présentations seront mis à disposition, les étudiants feront le travail de synthèse sous forme de points clés des différentes interventions

En cas d'absence à une séance, la synthèse devra être remise pour évaluation

Evaluation :

Validation du cours en ligne (20%)

Comptes-rendus de préparation amont et de restitution en aval des séances d'atelier (40%)

Examen écrit - SANS DOCUMENT (40%)

Support de cours, bibliographie

Les supports des présentations des différentes séances seront mis à disposition sur Edunao,

Les étudiants feront le travail de synthèse sous forme de points clés des différentes interventions

Moyens

Eléonore Mounoud, responsable du cours et deux chargées de cours Catherine Kokoreff et Aurélie Darmon

Avec les contributions de

- Alexandre Joly, Leader du pôle Energie chez Carbone 4 - Sobriété, énergie & climat
- Simon Colboc, Partner, head of Financial Services practice chez CMI Stratégies

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable :

- De formuler le positionnement et la proposition de valeur d'une entreprise à ses clients
- De détailler le business model d'une entreprise et d'en diagnostiquer la cohérence
- D'identifier les enjeux de transformations internes ou externes (transitions) pertinents pour une entreprise et les façons d'y répondre
- De proposer une logique de transformation d'une entreprise (services, innovation, globalisation, transitions) vers un modèle plus durable et plus vertueux

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences cahier des charges

C4.1 Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques

C4.2 Savoir identifier la valeur ajoutée par une solution apportée par une solution pour un client, le marché. Savoir discerner les opportunités, les bonnes occasions d'affaires et les saisir.

C9.2 Percevoir le champ de responsabilité des structures auxquelles on contribue, en intégrant les dimensions environnementales, sociales et éthiques

C9.4 Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques.

2EL2150 – Finance et Droit de l'entreprise

Responsables : **Maxime Guymard, Valérie Feray**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours permet d'approfondir la gestion financière d'une entreprise et le droit de l'entreprise. Il fait suite au cours d'initiation de première année en Finance et de deuxième année en Droit. Il donne également une ouverture sur différents métiers de la Finance et du Droit via des interventions de conférenciers du monde de l'entreprise (audit, conseil financier, responsables innovation et propriété intellectuelle, avocats et spécialistes de la propriété intellectuelle).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Cours de Gestion de l'Entreprise 1A, Cours d'introduction à la Finance d'entreprise 1A, Cours d'introduction au Droit 2A

Plan détaillé du cours (contenu)

Les sujets abordés dans ce cours seront divisés en trois parties : un tiers en droit, un tiers en finance d'entreprise, un tiers en finance et en droit.

Droit

Thèmes des cours magistraux :

- Droit du travail
- Introduction au Droit des sociétés
- Brevetabilité, procédure brevets et coûts associés
- Protection des logiciels

Finance

Thèmes des cours magistraux :

- Rappels et approfondissements des bases de comptabilité : bilan, compte de résultat, le tableau de flux de trésorerie
- Solvabilité de l'Entreprise
- Rentabilité de l'Entreprise (ROCE, ROE)
- Coût Moyen Pondéré des Capitaux (WACC)
- Critères financiers pour sélectionner des investissements (VAN, TRI)
- L'Evaluation d'entreprise
- Gestion financière des Start-Up
- Faillites et restructurations
- Introduction à la Finance de Marché (actions, obligations, produits dérivés)

Finance et Droit

Thèmes des cours magistraux :

Comprendre les différentes étapes d'un processus de fusion-acquisition d'un point de vue juridique et financier

Déroulement, organisation du cours

- Cours magistraux (15*1h30) | Travaux Dirigés (4*1h30) | Examen Final (2 heures : Finance 1h + Droit 1h)
- Il est possible qu'une ou deux séances aient lieu à distance (visio), en fonction de la disponibilité des intervenants, mais cela représenterait nécessairement moins de 10% du volume total de cours. Le but est d'avoir la grande majorité des cours en présentiel, dans des salles de cours.

Organisation de l'évaluation

Examen écrit final (100% de la note finale).

Moyens

- **Equipe enseignante** (noms des enseignants des cours magistraux) :

Droit

Valérie FERAY (cours magistraux et TD - Associée fondatrice IPSILON)

Pierre-Jacques CASTANET (conférencier et chargé de TD - Associé In Extenso et avocat spécialisé en droit du travail)

Mélanie COIRATON (conférencière et chargée de TD - Associée Racine et avocate)

Finance

Maxime GUYMARD (cours magistraux - Professeur de Finance d'Entreprise à CS and et Directeur Financier d'une startup dans le secteur des énergies renouvelables)

Guillaume CASSES (cours magistraux - analyste financier à RTE)

Finance et Droit

Mélanie COIRATON (conférencière et chargée de TD - Associée Racine et avocate)

Guillaume CASSES (cours magistraux - analyste financier à RTE)

- **Nombres d'élèves** : maximum 105 pour le cours, répartis en 3 groupes de TD de 35 élèves

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

En Finance :

- Savoir lire et interpréter les états financiers d'une entreprise (Bilan, Compte de Résultat, Tableau de Flux de trésorerie)
- Evaluer la rentabilité et la solvabilité d'une entreprise
- Connaître les critères financiers de décision d'un investissement
- Estimer la valeur d'une entreprise
- Comprendre les notions de bases de la Finance de Marché (actions, obligations, produits dérivés)
- Connaître les différents métiers de la Finance

En Droit :

- Droit du travail : connaître les éléments de base en tant qu'employeur et en tant que salarié (**cette séance de 3 heures de cours + TD sera exceptionnellement en français - un abrégé en anglais sera fourni pour les étudiants non-francophones**)
- Introduction au Droit des sociétés : Pourquoi créer une Société ? Quelle est la définition d'une société ? Le classement des sociétés ; Présentation des principaux acteurs, aspects financiers et étapes clés de la vie d'une entreprise.

- Brevetabilité, procédures brevets : évaluer les sujets susceptibles d'être protégés par brevets, l'état de la technique pour comprendre si un sujet est brevetable ou pas, connaître les procédures du dépôt à la délivrance du brevet
- Logiciels : connaître les principes fondamentaux et les différentes voies de protection, et les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles ainsi que les écueils correspondants

En Finance et Droit :

Fusions & Acquisitions : A partir d'une étude de cas, comprendre les différentes étapes d'un processus de fusion-acquisition d'un point de vue juridique et financier.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C3- Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

C4- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

2EL2160 – Economie de l'environnement, énergie et développement durable

Responsables : **Pascal DA COSTA**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif du cours d' "Economie de l'Environnement, de l'Energie et du Développement Durable" est d'aborder, à la fois :

- i) les grands enjeux environnementaux du XXI^e s. et les facteurs humains les structurant (démographie, économie, développement, etc.) ;
- ii) les principales théories dans le domaine qui ont notamment fondé les principes économiques adoptés face à ces enjeux (taxe carbone optimale et fiscalité environnementale, lutte contre les externalités négatives, etc.) ;
- iii) les politiques économiques et énergétiques dans les faits (neutralité carbone européenne, mix électriques décarbonés, etc.) ;
- iv) les stratégies de transitions écologiques et climatiques de grands secteurs énergétiques structurants (électricité, transports, hydrogène, etc.), en France et en Europe, grâce à l'intervention de spécialistes et experts du domaine, capables : 1. de présenter les ordres de grandeurs tant physiques qu'économiques ; 2. dans une vision à la fois prospective et pluridisciplinaire également.

Plan du cours :

- Les grands enjeux de décarbonation de l'économie à l'échelle mondiale
- Principes généraux d'économie de l'environnement sur la décarbonation et la biodiversité (services écosystémiques) et systèmes fiscaux et de comptabilité environnementale
- Le retour de la planification des systèmes énergétiques. L'illustration par les bilans prévisionnels et schémas décennaux de développement de réseau dans les secteurs gaziers et électriques
- Evolutions du système énergétique. Focus sur le système électrique (ouverture à la concurrence et glissement vers la transition énergétique)
- Clair obscur de la politique de décarbonation française
- Les enjeux de la décarbonation de la consommation
- Le gaz dans la transition énergétique

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Cours commun d'économie.

Plan détaillé du cours (contenu)

- Origines de la croissance économique et effet sur l'"indisponibilité" des ressources naturelles (fin du pétrole bon marché, etc.)
- Modèles économiques de gestion optimale des ressources naturelles renouvelables et non-renouvelables

- Démographie : évolution des populations mondiales
- Les enjeux de la gestion des ressources naturelles (réserves, répartition, prix) : ressources pour l'énergie (pétrole, gaz, charbon, uranium), matières premières (minerais), l'eau...
- Etat de l'art et nouvelles technologies pour l'énergie, dans une vision à la fois prospective et pluridisciplinaire
- Différents dimensions (analyses technico-économiques) de la transition énergétique en France.

Déroulement, organisation du cours

Amphi / TD

Organisation de l'évaluation

Evaluation en mode projet / travail sur articles scientifiques : **les 3 derniers créneaux de cours sont prévus pour l'évaluation et tous les élèves doivent y être présents.**

Support de cours, bibliographie

Diaporamas, divers ouvrages pluridisciplinaires et articles économiques.

Moyens

Cours en français.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Connaître les chiffres clés (état des lieux et prévisions scientifiques) qui font tant débat dans les médias lorsqu'ils opposent des parties prenantes d'un conflit environnemental, par exemple les industriels aux écologistes.
- Comprendre les hypothèses et les modèles économiques et d'ingénieurs sur lesquels reposent ces chiffres.
- Sensibiliser au couplage ressources, énergie, environnement, climat, économie, géopolitique, démographie.
- Sensibiliser aux différentes échelles : locale à mondiale.
- Un cours accès sur les objectifs de développement durable.
- Un cours qui porte sur les objectifs de développement durable.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 Examiner un problème dans toute son ampleur et sa profondeur, dans et au-delà de ses paramètres immédiats, afin de le comprendre comme un tout. Cet ensemble relie les dimensions scientifique, économique et sociale du problème.

C2.1 Maîtriser un domaine ou une discipline fondée sur les sciences fondamentales ou les sciences de l'ingénieur.

C4.1 Penser en termes de clients, identifier et analyser les besoins des clients, les contraintes des autres parties-prenantes ainsi que les défis sociétaux.

C9.4 Faire preuve de rigueur et de pensée critique en abordant les problèmes sous tous leurs angles, scientifique, humain et économique.

2EL2170 – Economie de la croissance et de l'innovation

Responsables : **Mehdi SENOUCI**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

La croissance économique, au sens large, est un concept qui désigne l'ensemble des changements économiques au cours du temps. Un des consensus les plus forts en sciences économiques est celui qui lie la croissance à l'innovation. Le premier objectif du cours est de sensibiliser les étudiants à l'étude de la croissance économique, sur le long comme sur le plus court terme, en essayant de convaincre que les régularités de même que les paradoxes de la croissance justifient une approche analytique mêlant exploration des faits, analyses empiriques et construction de théories. Le second objectif est de présenter les grandes évolutions économiques du monde depuis les origines jusqu'à nos jours, avec une plus grande importance donnée à l'époque moderne, ainsi que les grandes théories afférant à chaque époque et chaque transition. Le troisième objectif, plus diffus, est de pousser les étudiants à s'interroger sur les conséquences futures des innovations actuellement en cours ou en gestation. Le cours mêlera donc théorie et études empiriques en suivant le fil rouge de l'Histoire.

Le cours est exigeant, car tourné vers la recherche, et destiné à un public désireux de s'investir. Il est fortement déconseillé (en SG6) aux étudiants partant en S8 anticipé, et plus généralement aux étudiants non-disposés à y investir du temps. A part l'examen final, deux rendus seront attendus (dont l'un en TD) qui impliqueront la lecture constructive d'articles de recherche.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

Prérequis

Cours commun d'économie. Cours de statistiques de première année. Mathématiques niveau 1ère année prépa.

Plan détaillé du cours (contenu)

- 1 - La croissance économique comme phénomène historique : les grandes tendances
- 2 - Un détour : le modèle néoclassique des marchés parfaits
- 3 - Analyse néoclassique de la croissance : succès et échecs
- 4 - Croissance, énergie et environnement
- 5 - Technologie, travail et inégalités
- 6 - La croissance de très long terme
- 7 - Le futur de la croissance

Déroulement, organisation du cours

CM (19,5h), TD (9h), Examen (2h)

Organisation de l'évaluation

Rendu en TD obligatoire : 1/3

Travail de groupe obligatoire : 1/3

Examen final obligatoire : 1/3

Support de cours, bibliographie

- Slides de cours
- Le cours ne s'appuiera pas sur un manuel spécifique, mais les étudiants peuvent se référer à :
 - Hal R. Varian (2014) *Intermediate microeconomics - A modern approach*, W. W. Norton & Company, 9th edition
 - Robert J. Barro & Xavier Sala-i-Martin (2003) *Economic Growth*, MIT Press, 2nd Edition
 - David N. Weil (2012) *Economic Growth*, Pearson Education
 - Charles I. Jones & Dietrich Vollrath (2013) *Introduction to economic growth*, W. W. Norton & Company, 3rd edition
- De nombreux articles et livres seront abordés, parmi lesquels :
 - a. Acemoglu, Johnson, and Robinson (2001) "The Colonial Origins of Comparative Development: An Empirical Investigation." *American Economic Review*.
 - b. Acemoglu, Johnson, and Robinson (2002) "Reversal of Fortune: Geography and Institutions in the Making of the Modern World Income Distribution." *Quarterly Journal of Economics*.
 - c. Aghion, Dechezleprêtre, Hémous, Martin and Van Reenen (2016) "Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry," *Journal of Political Economy*.
 - d. Ashraf and Galor (2013) "The 'Out of Africa' Hypothesis, Human Genetic Diversity, and Comparative Economic Development," *American Economic Review*.
 - e. Clark (2007) *A Farewell to Alms: A Brief Economic History of the World*, Princeton University Press.
 - f. Comin and Mestieri (2014) "Technology Diffusion: Measurement, Causes and Consequences," *Handbook of Economic Growth*.
 - g. Diamond (1997) *Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies*, W. W. Norton & Company.
 - h. Galor (2005) "From Stagnation to Growth: Unified Growth Theory," in *Handbook of Economic Growth*.
 - i. Galor and Ozak (2016) "The Agricultural Origins of Time Preference," *American Economic Review*.
 - j. Greenwood Herowitz and Krusell (1997) "Long-Run Implications of Investment-Specific Technological Change," *American Economic Review*.
 - k. Habakkuk (1962) *American & British Technology in the 19th Century: The Search for Labour-Saving Inventions*; Cambridge University Press [2nd edition: 1967].
 - l. Kaldor (1961) "Capital Accumulation and Economic Growth," in *The Theory of Capital* (F. A. Lutz & D. C. Hague, eds.); Macmillan, St. Martin's.
 - m. Mankiw, Romer, and Weil (1992) "A Contribution to the Empirics of Economic Growth." *Quarterly Journal of Economics*.
 - n. Nordhaus (1973) "The Allocation of Energy Resources," *Brookings Papers on Economic Activity*.
 - o. Piketty and Zucman (2014) "Capital is Back: Wealth-Income Ratios in Rich Countries 1700-2012," *Quarterly Journal of Economics*.
 - p. Romer (1990) "Endogenous Technological Change." *Journal of Political Economy*.
 - q. Solow (1956) "A Contribution to the Theory of Economic Growth," *Quarterly Journal of Economics*.
 - r. Solow (1957) "Technical Change and the Aggregate Production Function," *Review of Economics and Statistics*.

Moyens

Cours magistraux (Mehdi Senouci)

TD

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les étudiants seront capables de :

- Modéliser la consommation, la production, l'échange et le changement technique avec les modèles néoclassiques ;
- Connaître, manipuler et interpréter différents modèles théoriques de croissance économique ;
- Débattre des enjeux de la croissance dans une logique analytique et en connaissance de l'histoire et des faits de la croissance économique.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Modéliser la consommation, la production, l'échange et le changement technique avec les modèles néoclassiques, s'inscrit dans **C1.3 "Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation"**, et dans **C2.3 "Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres"**.

Connaître, manipuler et interpréter différents modèles théoriques de croissance économique, s'inscrit dans **C1.1 "Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines"**, et dans **C2.3 "Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres"**.

Débattre des enjeux de la croissance dans une logique analytique et en connaissance de l'histoire et des faits de la croissance économique, s'inscrit dans **"C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée"**.

2EL2210 – Introduction to Operations Management

Responsables : Adam ABDIN, Alicia Bassiere, Guillaume LAMÉ

Département de rattachement : DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS

Langues d'enseignement : ANGLAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 60

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 30,50

Catégorie d'électif : Sciences de l'entreprise

Niveau avancé : Non

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours initie les étudiants aux enjeux de la gestion des opérations en examinant les décisions impliquées dans les problèmes de conception, de planification et de contrôle rencontrés dans les systèmes de production et de distribution de biens et de services. L'enjeu principal de la gestion des opérations est de garantir que les produits ou services vendus par l'entreprise sont disponibles au bon endroit, au bon moment, dans la qualité et la quantité exigées par le client, tout en utilisant efficacement les ressources, et d'anticiper les évolutions réglementaires susceptibles de remodeler ces contraintes.

L'objectif est de comprendre le fonctionnement d'un système de production à différentes échelles (usine, entrepôt, ateliers, machines), ses processus et les enjeux économiques et environnementaux associés, et de développer des outils classiques et avancés (modèles d'optimisation, analyse statistique et cadres de théorie des jeux) pour améliorer ses performances.

Des exemples seront tirés de divers secteurs industriels.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Bases en optimisation

Plan détaillé du cours (contenu)

Après une séance d'introduction générale, le cours portera sur :

- Les dimensions organisationnelles et les processus des systèmes de production et de distribution de biens et services
- La performance d'un système de production à travers l'organisation du travail, l'agencement physique, les processus et les ressources en place
- L'utilisation de la théorie des jeux pour modéliser et aligner les incitations dans les décisions opérationnelles, de la conception des contrats aux changements de direction, afin d'améliorer la coordination
- Les approches et méthodes qualitatives et quantitatives pertinentes pour optimiser la performance des systèmes de production et de distribution
- La mise en œuvre de ces approches, en mettant l'accent sur la faisabilité, l'adaptation, les limites et la gestion du changement

Déroulement, organisation du cours

Cours et TDs.

Organisation de l'évaluation

Devoir maison (40%) et Examen final sur place par QCM de 2h (60%) + bonus de participation TD

Support de cours, bibliographie

Sujets de TDs

Bibliographie :

- Operations management. 5. ed. - Slack N, Chambers S, Johnston R.
- Process theory : the principles of operations management. First ed - Holweg M, Davies J, Meyer Ad, et al.
- Game Theory with Applications in Operations Management - R. K. Amit

Moyens

Cours et TDs (exercices et cas pratiques)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Diagnostiquer les problèmes et les performances d'un système d'exploitation industriel
- Mobiliser les outils et concepts fondamentaux pour améliorer les performances opérationnelles
- Appliquer des approches quantitatives clés aux problèmes industriels (par exemple, prévision de la demande, planification et suivi de la production)
- Expliquer les concepts fondamentaux de la théorie des jeux et reconnaître leur pertinence en logistique et en réglementation

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ce cours permettra de travailler les compétences suivantes :

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

- C1.1 Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.
- C1.2 Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
- C1.3 Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

- C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique
- C2.2 Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

- C4.2 Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions. Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles

2EL2220 – Théories des organisations et des marchés

Responsables : **Yannick PEREZ**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objet de ce cours est l'analyse des organisations, en s'appuyant sur les outils de la microéconomie élargie. A l'instar d'autres domaines d'application des sciences économiques, l'économie des organisations (Organizational economics) a connu un développement soutenu lors des 20 dernières années. L'économie des organisations implique le recours à l'analyse économique et à ses méthodes pour comprendre l'existence, la nature, le 'design' et la performance des organisations. L'analyse économique des organisations est menée en comparaison avec les marchés et elle porte, au-delà de la firme, sur des formes organisationnelles d'une grande diversité (syndicats, mouvements sociaux, agences, écoles, ...).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Ce cours ne suppose pas de prérequis pour les étudiants parfaitement francophones

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction
2. Chapitre 1 : Diversité des modes d'organisation en économie de marché
 - a. Les marchés comme mode structurant de la production et des échanges
 - b. Les organisations intégrées et la nature de la firme.
 - c. Les formes hybrides
 - d. Le problème de l'arbitrage entre les modes d'organisation
3. Chapitre 2 : Les modes de coordination
 - a. Les processus d'information
 - b. Le rôle des contrats
 - c. Nature et fonction de la hiérarchie
4. Chapitre 3. Incitations et motivations
 - a. Incitations : modèles de base
 - b. Incitations liées aux propriétés des modes d'organisation
5. Conclusion

Déroulement, organisation du cours

Le cours est composé de deux parties :

Une première où les outils de la théorie économique des organisations sont présentés.

La seconde où ils sont mis en applications par l'analyse en groupe d'étudiants de cas typiques de la théorie des organisations.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation est composée de deux exercices.

Le premier est une présentation de situation typique en groupe d'étudiant. Ce travail représente 60% de la note finale.

Le dernier est un devoir sur table composé de 4 questions sur les notions essentielles du cours. Ce travail représente 40% de la note finale.

Support de cours, bibliographie

Ménard Claude, L'économie des organisations, Repères la découverte.

Saussier Stéphane et Anne Yvrande, L'économie des couts de transactions, Repères la découverte.

Chabaud Didier, Jean-Michel Glachant, Claude Parthenay et Perez Yannick (eds), 2008, « *Les grands auteurs en économie des organisations* », Ed. Management & Société. 13 chapitres.

Moyens

Les étudiants doivent venir équipés de leurs ordinateurs portables.

Un seul TD sera ouvert cette année universitaire pour 40 étudiants.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre les enjeux de création, de développement et du fonctionnement des organisations économiques.

Acquérir les outils de la théorie économique des contrats

Découvrir les modalités de construction des incitations et de la coordination des équipes

Comprendre les déterminants des choix des formes organisationnelles adaptées aux activités économiques.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Au terme de cet enseignement les étudiants comprendront pourquoi les organisations économiques fonctionnent ou pas.

Ils comprendront les problèmes de gestion hiérarchique, de principal agent, d'aléas moral et de sélection adverse.

Ils auront analysé des systèmes d'incitation et de rémunération et auront des outils analytiques pour comprendre les relations inter-industries.

C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C3 - Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

2EL2230 – Maintenance et industrie 4.0

Responsables : **Zhiguo ZENG**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

La maintenance prédictive est un des piliers de l'industrie 4.0. Elle repose sur l'utilisation de données collectées en ligne, leur traitement et leur intégration dans des processus de décisions dynamiques. Elle repose aussi sur la mise à disposition d'agents connectés susceptibles d'exécuter des tâches en temps réel et d'en optimiser leur gestion. Concrètement, il s'agit d'anticiper les défaillances, arrêts, accidents des processus de production ou des systèmes de services et de planifier au mieux les opérations de remplacement, renouvellement, remise en service, etc...

L'objectif de ce cours est de donner à de futurs décideurs, la culture nécessaire qui permet de concevoir, modéliser et recommander des stratégies de maintenance prédictive. L'accent est mis sur les approches guidées par les données et les modèles probabilistes ou statistiques qui s'appliquent à tout système industriel. Ce bagage doit permettre d'interagir efficacement avec des ingénieurs « métier » très proche des applications et des « data scientist » en charge du traitement des données

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

- Connaissances de base en probabilité et statistique, analyse de données, modélisation et optimisation.
- Connaissances de base en machine learning et Python

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction au cours ; Présentation du projet (1.5h);
- Fault detection and diagnosis through machine learning (9h)
- Planning maintenance activities through optimization (9h)
- Predictive maintenance (9h)
- Examen (2h)

Déroulement, organisation du cours

- 14.5h de cours, 14h de travaux dirigés et mise en oeuvre pratique des modèles.
- Possibilité d'évolution en classe inversée partiellement.

Organisation de l'évaluation

Course project + Soutenance

Support de cours, bibliographie

Bibliographie

- System Reliability Theory, Models, Statistical Methods and Applications, Marvin Rausand, Anne Barros, Arnljolt Hoyland, 2020, Third Edition, Wiley
- Degradation Processes in Reliability, Waltraud Kahle, Sophie Mercier, Christian Paroissin, John Wiley & Sons, 2016
- Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications, Second Edition (Mechanical Engineering) 2nd edition by Jardine, Andrew K.S., Tsang, Albert H.C. (2013) Hardcover
- Case Studies in Reliability and Maintenance, Wiley Series in Probability and Statistics, Wallace R. Blischke, D. N. Prabhakar Murthy, John Wiley & Sons, 2003
- Reliability and Optimal Maintenance, Hongzhou Wang Hoang Pham, 2006, Springer Science & Business Media
- Reliability and Maintenance Engineering, R C Mishra, New Age International, 2006
- Models of Preventive Maintenance (Study in Mathematics & Managerial Economics), Ilya B. Gertsbakh, North Holland, 1977

Supports de cours

Recueil de transparents, site Web, Jupyter notebook

Moyens

1. Equipe pédagogique (Cours et TD): Zhiguo Zeng
2. Outils informatiques: Python, Matlab

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Concevoir une stratégie de maintenance dans un contexte d'application donné
- Effectuer le choix de modélisation adéquat pour évaluer les performances d'une stratégie de maintenance
 - Savoir définir et formaliser des variables d'états pertinentes
 - Savoir définir et formaliser un critère de performance
 - Savoir élaborer un modèle avec le bon niveau d'abstraction à partir de la description de scénarios ou d'un ensemble états-transition
- Quantifier des performances à partir de modèles probabilistes ou guidés par les données
 - Savoir identifier le bon cadre de modélisation à base de processus stochastiques
 - Savoir identifier les bons algorithmes d'apprentissage et de machine learning en fonction d'un ensemble de données
 - Savoir calculer des lois de probabilités ou des grandeurs moyennes à partir d'un formalisme analytique ou en simulation de Monte Carlo
- Optimiser les performances d'une stratégie de maintenance
 - Savoir mettre en œuvre des techniques d'optimisation paramétriques pour un critère de performance donné
 - Savoir formaliser un problème d'optimisation lorsque la stratégie de maintenance n'est pas fixée à priori

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences validées :

- Concevoir, modéliser et recommander des stratégies de maintenance prédictive (C1.1 et C1.2)
- Être capable d'interagir avec des ingénieurs métiers et des data scientists sur ce sujet (C1.5 - jalon 2)
- Superviser la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance prédictive depuis la collecte des données jusqu'à la mise en œuvre pratique des activités de maintenance (C1.5, jalon 2)
- L'étude de cas finale s'inscrit dans C1.3 (jalons 1B, 2B, 3B), C6.5 et C7.1

Mode de validation :

- Les compétences C1.1 (jalons 1 et 2) et C1.2 sont validées lors des séances de TD. La compétence C1.1 est validée lors de l'étude de cas finale pour le jalon 3.
- La compétence C1.5 est validée lors de l'étude de cas finale.

2EL2240 – Économie des systèmes de transport décarbonés

Responsables : **Yannick PEREZ**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours consistera à étudier trois innovations qui sont en passe de transformer profondément l'industrie associée à la mobilité individuelle. Les deux premières sont d'abord de nature technologique, il s'agit du véhicule autonome et du véhicule électrique - à batterie ou hydrogène. La troisième est liée à la pénétration et la généralisation des nouvelles technologies de l'information et la communication et l'IoT dans la mobilité qui permette la mise en œuvre des principes de l'économie du partage.

La motivation pour étudier la combinaison de ces trois innovations est de déterminer les conditions de passage d'un modèle de propriété individuelle des biens de mobilités avec des externalités négatives considérables en termes de pollution, de congestion, de d'accidentologie vers des usages de services de mobilité autonomes, électriques et/ou partagés qui pourraient apporter des solutions aux problèmes susmentionnés.

Cette transformation des moyens de la mobilité est donc au croisement des approches de l'ingénieur (comment mettre en place de la mobilité autonome, quels usages de la 5G pour la mobilité, comment utiliser l'intelligence artificielle, comment inclure des véhicules électriques dans les réseaux électriques pour des recharges intelligentes à base de renouvelable...), de l'économiste industriel (quels modèles économiques sous-jacents, quelle réglementation des usages, quels jeux d'acteurs dans une industrie en profonde réorganisation) et des analyses des besoins de mobilités et des comportements des consommateurs (quelles incitations pour l'adoption des comportements, acceptation de l'auto-partage, nouveaux comportement et micro-mobilité, transferts multimodal...).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Pas de prérequis nécessaire.

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours 1: Introduction à la transition énergétique et à la mobilité.
Cours 2: Véhicule électrique pour tout: cadre des flux de revenus
Cours 3: Tarif de conception pour les VE et les énergies renouvelables.
Cours 4: Théories et applications des déploiements d'infrastructures
Cours 5: Économie de l'autopartage
Cours 6: Economie de l'autopartage une application en région parisienne
Cours 7: Véhicules électriques autonomes et partagés: définitions, coût des technologies, mobilité partagée
Cours 8: Nouvelles technologies pour les livraisons urbaines et sur le dernier kilomètre
Cours 9: Mobilité en tant que service
Cours 10: Nouvelles perspectives de la mobilité urbaine

Déroulement, organisation du cours

Pendant la session de 3h, la première heure et demie sera animée par un intervenant (professeur, chercheur, urbaniste, économiste...) spécialiste du thème. Les TDs seront organisés pendant l'heure et demie suivante. Dans les TDs, les étudiants, en groupe de 3, présenteront des exposés sur des articles de recherches mis à leurs dispositions par les intervenants.

Organisation de l'évaluation

Le cours sera évalué en deux format obligatoires : Pendant les travaux de groupes réalisés pendant les TDs. Ce travail de présentation comptera pour 50% de la note finale.

L'examen final en 2 h portera sur des questions, une par cours, comptera pour 40 % de la note finale.

Les 10% restant porteront sur la participation active en cours et en TD.

Support de cours, bibliographie

Sperling, Daniel (2018) Three Revolutions: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future. Island Press/Center for Resource Economics

Icaro Silvestre Freitas Gomes, Yannick Perez, Emilia Suomalainen 2020 Coupling small batteries and PV generation: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 126 (2020) 109835.

Andrew Thompson and Yannick Perez 2020, Vehicle-to-Anything (V2X) Energy Services, Value Streams, and Regulatory Policy Implications, Energy Policy 137 (2020) 111136

Quentin Hoarau & Yannick Perez, 2019, Network tariff design with distributed energy resources and electric vehicles, Energy Economics, Volume 83, September, Pages 26-39.

Olfa Tlili Christine Mansilla David Frimat Yannick Perez, 2019 Hydrogen market penetration feasibility assessment: Mobility and natural gas markets in the US, Europe, China and Japan, International Journal of Hydrogen Energy Volume 44, Issue 31, 21 June 2019, Pages 16048-16068.

Ramírez Díaz Alfredo, Marrero Gustavo, Ramos-Real Francisco, Perez Yannick, 2018 Willingness to pay for the electric vehicle and their attributes in Canary Islands, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 98, December 2018, Pages 140-149.

Ramírez Díaz Alfredo, Ramos-Real Francisco Javier, Perez Yannick, Barrera Santana Josue, 2018, Interconnecting isolated electrical systems. What is the best strategy for the Canary Islands? Energy Studies Review- Vol. 22 (2018) pp. 37–46.

Hoarau Quentin and Perez Yannick, 2018, Interactions Between Electric Mobility And Photovoltaic Generation: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 94 (2018) 510–522.

Rodríguez Brito Maria Gracia, Ramírez-Díaz Alfredo Jesús, Ramos-Real Francisco J., Perez Yannick, 2018, Psychosocial traits characterizing EV adopters' profiles: The case of Tenerife (Canary Islands), Sustainability 2018, 10, 2053.

Codani Paul, Perez Yannick and Petit Marc 2018 Innovation et règles inefficaces : le cas des véhicules électriques, Revue de l'Energie n° 638, Mai-Juin

Borne Olivier, Yannick Perez and Marc Petit 2018, Market integration or bids granularity to enhance flexibility provision by batteries of Electric Vehicles, Energy Policy, Volume 119, August 2018, Pages 140–148.

Borne Olivier, Korte Klaas, Perez Yannick, Petit Marc and Purkus Alexandra 2018, Barriers to entry in Frequency-Regulation Services Markets: Review of the status quo and options for improvements, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 81, Part 1, January 2018, Pages 605–614.

Codani Paul, Perez Yannick and Petit Marc 2016, Financial Shortfall for Electric Vehicles: economic impacts of Transmission System Operators market designs, Energy, Volume 113, pp 422-431.

Eid Cherrelle, Codani Paul, Perez Yannick, Reneses Javier, Hakvoort Rudi, 2016, Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 64, pp 237–247.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Analyser les potentialités techniques, économiques et sociales de la mobilité électrique, autonome et partagée. Mettre en évidence les limites des solutions proposées, des business models en cours de développement et des besoins à pourvoir pour mettre en œuvre cette nouvelle mobilité décarbonée dans des villes plus intelligentes.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines

C2.4 Créer de la connaissance, dans une démarche scientifique

C3.6 Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées

C9.4 Faire preuve de rigueur et d'esprit critique dans l'approche des problèmes sous tous les angles, scientifiques, humains et économiques

2EL2410 – Compression et débruitage des signaux

Responsables : **Gilles Chardon**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction à la représentation, l'analyse, la compression et le débruitage des signaux et des images. Ces notions forment le socle des traitements modernes utilisés pour le stockage de musique, de vidéos, l'amélioration des images photographiques dans les téléphones portables, le traitement des images médicales ou issues de l'astrophysique...

Avec la quantité croissante de données collectées et stockées, la compression de signaux (images, sons, vidéos, etc.) reste un enjeu majeur en sciences des données, permettant de limiter la quantité de stockage nécessaire, ainsi que les flux de données sur les divers réseaux de télécommunications. Des méthodes de restauration de signaux (dont le débruitage est un exemple particulier) sont embarquées dans les smartphones récents permettant de pallier les limitations des capteurs photographiques en résolution et sensibilité.

Les méthodes présentées dans le cours auront pour point commun d'être frugales en calculs, énergie, et quantité de données nécessaires à leur conception et leur utilisation.

Après un rappel des notions fondamentales de signal et d'analyse harmonique (filtrage, série et transformée de Fourier, processus aléatoires), un premier aperçu du débruitage et de la compression de signaux sera donné par le filtrage de Wiener et le codage LPC de la parole.

L'introduction du codage entropique de source permettra ensuite de concevoir des codeurs sans perte d'images (type PNG) et de sons (type FLAC).

La compression avec perte, avec des taux de compression supérieurs (JPEG, MP3, etc.), sera ensuite abordée.

Enfin, les bases orthogonales d'ondelettes seront définies, avec pour applications la compression d'image (JPEG2000) et le débruitage non-linéaire d'images.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

1SL1000 CIP

1SL1500 EDP

1CC4000 Traitement du signal

Plan détaillé du cours (contenu)

1- Introduction

- Filtrage, échantillonnage
- Série et transformée de Fourier
- Processus aléatoires

2- Filtrage de Wiener et codage de parole

- Débruitage linéaire de processus aléatoires
- Modèles de production de la parole
- Coefficients de prédiction linéaire
- Codage LPC

3 - Codage de source et quantification

- Codage de source, entropie
- Compression d'images sans perte (PNG)
- Codage universel et compression audio sans perte (FLAC)
- Quantification

4 - Représentations temps-fréquence

- Bases et frames temps-fréquence (Transformée de Fourier à court terme, bases de cosinus)
- Compression d'image JPEG
- Masquage audio et application au codage audio (MP3, Vorbis, etc.)

5 - Bases d'ondelettes

- Bases orthogonales d'ondelettes et transformée rapide en ondelettes
- Ondelettes de Daubechies
- Application à la compression d'image, JPEG2000
- Seuillage d'ondelettes pour la compression d'images

Déroulement, organisation du cours

15h Cours

13h30 TD/TP

2h Contrôle final

Organisation de l'évaluation

Compte rendus des TP 30% Absence à un TP = 0 points pour le TP Examen final écrit 2h sans documents. 70% Rattrapage : examen écrit 2h ou oral.

Compétences C1 et C2 évaluées pendant l'examen écrit, compétence C7 validée par les compte-rendus de TP.

Support de cours, bibliographie

A Wavelet Tour of Signal Processing, Stéphane Mallat, Academic Press

Moyens

Ordinateurs personnels des étudiants, Python.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin du cours, les étudiants pourront :

- Connaître les bases mathématiques de la représentation des signaux non stationnaires
- Analyser des signaux à l'aide de représentations temps-fréquence
- Choisir la représentation adaptée pour un modèle donné de signal.

- Mettre en oeuvre des techniques de compression de signaux.
- Connaître les limites des techniques de compression
- Concevoir, analyser, et mettre en oeuvre des méthodes d'estimation de signaux.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1
C2
C6

2EL2420 – Traitement d'images numériques

Responsables : **Elisabeth LAHALLE, Charles Soussen**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Dans de nombreux domaines tels que la santé, la vidéo-surveillance, la microscopie ou la télédétection, des systèmes simples ou sophistiqués d'acquisition d'image ont été conçus pour produire des images numériques de toutes sortes : images 2D, 3D, couleur, vidéos, images hyperspectrales. L'analyse d'image couvre un large spectre de traitements allant de la reconstruction d'images à partir de mesures indirectes (par exemple en imagerie scanner ou en IRM) à la reconstruction de scènes 3D en vision par ordinateur, au recalage d'images, à la segmentation d'objets dans des images, et à l'analyse d'images hyperspectrales en télédétection.

L'objectif du cours est double. Il s'agit d'une part de maîtriser les concepts fondamentaux du traitement d'images, incluant les analyses élémentaires pour traiter des images en niveaux de gris et des images couleurs (seuillage, histogramme, codage) et les opérations de filtrage linéaire et non-linéaire, effectuées dans le domaine spatial ou dans le domaine de Fourier. D'autre part, le cours aborde des traitements avancés permettant de dépasser les limites des approches de type filtrage. Ces traitements comprennent les méthodes de segmentation d'image utilisant des modèles géométriques pour décrire les régions et les contours d'objets, et les approches dites variationnelles, où la reconstruction d'image est formulée comme l'optimisation d'un critère en grande dimension. L'approche variationnelle est développée en détails et illustrée dans le cas du débruitage et de la déconvolution d'image.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

- Traitement du signal : convolution, transformée de Fourier
- Probabilités et statistiques
- Optimisation

Plan détaillé du cours (contenu)

Introduction:

Exemples de traitement d'images : reconnaissance de formes, recalage d'images, segmentation d'images, restauration et reconstruction d'images.

Systèmes d'acquisition d'images numériques, processus de formation de l'image et formats.

Analyse élémentaire :

Histogramme, amélioration de contraste, seuillage.

Echantillonnage, quantification et interpolation d'image.

Format d'images couleur (RGB, HSV, etc.) et traitements associés.

Filtrage :

Linéaire :

- Notion de séparabilité dans le domaine spatial.
- Filtres de lissage et de contraste : filtres moyenneur, gaussien, dérivateurs, laplacien, filtres de Prewitt et Sobel, etc.
- Filtrage dans le domaine fréquentiel.

Non linéaire : filtre médian, filtrage d'ordre.

Détection de contours et segmentation :

- Modèles géométriques pour l'image : voisinage entre pixels, connexité, notions de régions et frontières.
- Segmentation d'images : approches par partitionnement de régions, par détection de frontières, et par contours déformables (contours actifs)

Approche variationnelle (basée optimisation numérique) pour les problèmes inverses en imagerie :

- Formulation de problèmes d'optimisation pour le traitement d'images
- Régularisation de Tikhonov
- Régularisations préservant les contours
- Cas d'étude : débruitage et déconvolution d'images

Déroulement, organisation du cours

Le cours s'organise en deux parties pour présenter :

- **Les concepts fondamentaux** : 4 CM, 3 TD
- **Les traitements avancés** : 5 CM, projet long (11h)

Les étudiants seront amenés à illustrer les concepts et à mettre en œuvre les algorithmes à l'aide d'un outil de simulation et de traitement de données de type Matlab.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation consistera en :

- un partiel à mi-parcours, 35 % de la note finale
- une évaluation par mini-projet, 65 % de la note finale

Support de cours, bibliographie

- H. Maître, *Le traitement des images*, édition Hermes, 2003.
- J.-P. Cocquerez et S. Philipp, *Analyse d'images: filtrage et segmentation*, éd. Masson, 1995.
- S. Bres, J.-M. Jolion, F. Lebourgeois, *Traitement et analyse des images numériques*, éd. Hermes 2003.
- A. Trémeau, *Image numérique couleur*, éd Dunod 2004.
- H. Maitre, *Du photon au pixel*, éd Istc 2016

Moyens

Enseignants supplémentaires (un 3ème chargé de TD) pour les TD si le nombre d'étudiants excède 50 (plus de 2 groupes de 25).

Les supports de cours sont en anglais et en français. Les cours magistraux sont en français.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, l'étudiant :

1. Possèdera quelques notions sur le fonctionnement des systèmes d'acquisition d'images numériques (caméras, microscopes, ...) et le processus de formation de l'image.
2. Sera capable d'analyser le contenu d'une image numérique.
3. Sera capable de mettre en oeuvre des traitements numériques élémentaires : détection de pixels par seuillage des niveaux de gris, calcul d'histogramme, filtrage linéaire ou non linéaire, lissage et détection de contours.
4. Sera capable de mettre en oeuvre des techniques avancées de traitement d'image pour la restauration d'image.
5. Aura assimilé des notions plus avancées comme la segmentation basée sur les modèles géométriques (contours et régions) et l'analyse d'images 3D.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le partiel permet de participer à la validation des compétences C1 :

C1.2 : utiliser les modèles adaptés, les hypothèses simplificatrices pertinentes

Le projet long permet de participer à la validation des compétences C2, C6 et C8:

C8.1 : travailler en équipe/en collaboration

C6.1 : résoudre numériquement un problème

C2.2: importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines

2EL2510 – Architecture et conception des systèmes numériques

Responsables : **Erwan Libessart**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Dans une approche top-down, les élèves vont apprendre à spécifier et concevoir des systèmes de traitement numérique dédiés, dans un objectif d'intégration dans un FPGA ou un ASIC.

Le cours aboutira à la création d'une application, en l'occurrence un petit processeur de traitement, et permettra ainsi de comprendre les différents concepts utilisés dans celui-ci.

De façon globale à l'issue de ce cours, les élèves seront capables de :

- Définir et concevoir l'architecture d'une chaîne de traitement numérique
- Décrire un modèle de ce traitement en langage HDL.
- Concevoir un processeur simple et savoir le programmer

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Notions de base en Électronique Numérique

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Cours 1 : Description VHDL
2. Cours 2 : Architecture des unités de traitement : chemin de donnée et séquenceur – part. 1
3. Cours 3 : Architecture des unités de traitement : chemin de donnée et séquenceur – part. 2
4. Cours_TD 1 : Les Unités Logiques Algorithmiques part. 1
5. Cours_TD 2 : Les Unités Logiques Algorithmiques part. 2
6. Cours_TD 3 : Le jeu d'instruction et décodage d'instruction part. 1
7. Cours_TD 4 : Le jeu d'instruction et décodage d'instruction part. 2
8. Cours_TD 5 : Mémoires
9. Cours_TD 6 : Compilateur

5 séances de 3 h de projet

Homework : Les GPUs : Architectures et chemin de données

Déroulement, organisation du cours

Définition de la notion d'un Cours TD :

Il s'agit d'une interaction très forte entre un cours classique et sa mise en application quasi immédiate, bien qu'ici la démarche soit inversée : les exercices ont pour objectifs de faire réaliser où sont les points critiques sans connaître la solution pour y remédier. Une fois conscient du problème, le cours apporte la solution aux étudiants qui y sont alors beaucoup plus sensible. Cette démarche n'est possible que sous la condition qu'il n'y est pas de coupure franche entre le cours et le PC, d'où cette notion de Cours_TD.

ATTENTION: L'absence à cette partie rend quasiment impossible la bonne compréhension du sujet et de ce fait la validation du cours

Projet à réaliser partiellement en homework et en équipe:

- 10 séances de projet de 1h30 en présence d'un encadrant
- Travail à la maison nécessaire pour mener le projet à terme
- Le rendu de projet prend la forme de slides et d'une archive des codes développés.

Le département fournira à chaque élève une carte de type FPGA (DE10-Lite) qu'ils garderont jusqu'à l'examen écrit.

Organisation de l'évaluation

- Examen écrit - conception d'architecture de processeur
- Slides de présentation et codes

Ratio: 70% examen écrit - 30% Projet

La Compétence C1 sera validée si vous avez plus de 10/20 à la fois en examen et au projet

La Compétence C2 sera validée si vous avez plus de 10/20 à l'examen

La Compétence C6 sera validée si vous avez plus de 10/20 au projet

Moyens

DE10-Lite FPGA Board From Altera

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Le cours « Architecture des systèmes Numériques » apportera plus précisément aux élèves les notions nécessaires pour :

- Définir une architecture de traitement
 - Architecture des unités de traitement : chemin de donnée et séquenceur
 - Description de chacune des fonctions précédentes en langage VHDL
 - Analyse temporelle des systèmes synchrones
- Conception d'un processeur (Approche de type projet)
 - ALU, registres et pipeline
 - Construction d'un cœur de processeur
 - Jeu d'instruction
 - Décodage d'instruction, Sauts et pipeline
- Architecture des GPU : chemin de donnée

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métier

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

2EL2520 – Électronique pour les applications biomédicales

Responsables : **Emilie Avignon-Meseldzija**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est d'introduire des concepts fondamentaux d'électronique en se basant sur des applications biomédicales, plus particulièrement l'électronique d'interface (acquisition ECG, EEG, EOG), de traitement biomédical (filtrage Gm-C) ou encore de stimulation (pacemaker).

Après plusieurs cours théoriques, l'étudiant développe ses compétences en électronique sur des cas pratiques comme la mesure de l'ElectroCardioGramm ou plus théorique comme un filtrage Gm-C pour des signaux EEG. Tout au long de ce cours l'étudiant est invité à simuler ses circuits avec des données biomédicales issues de bases de données en Open Access.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

L'objectif premier de ce cours est de sensibiliser les étudiants à l'électronique au travers d'applications pas à pas. Ainsi un haut niveau théorique en électronique n'est pas requis. Néanmoins, il est utile pour suivre ce cours d'avoir les toutes premières bases de calculs de circuits (lois des nœuds, loi des mailles, loi d'ohm...). Pour les étudiants de CS avoir suivi l'électif "Systèmes électroniques" en première année est un plus.

Plan détaillé du cours (contenu)

Partie 1 : Introduction aux bases de l'électronique d'interface biomédicale (transistors, amplificateurs opérationnels, conception d'amplificateurs opérationnels), (12h00 HPE)

1.1 Introduction au cours, motivation

1.2 Le transistor MOS

1.3 Circuits de base pour interface à base de transistors MOS

1.4 Circuit à base d'opampes pour applications biomédicales : amplificateur d'instrumentation

1.5 Méthode de conception d'un amplificateur opérationnel au niveau du transistor

Partie 2 : Cas d'étude de circuits biomédicaux, (10h30 HPE)

2.1 Filtrage biomédical : Techniques Gm-C

2.2 Dispositifs biomédicaux embarqués : exemple de pacemakers, timers.

2.3 Différents circuits biomédicaux

Partie 3 : Travaux pratiques (6h00 HPE) :

3.1 Acquisition d'électrocardiogrammes (Filtres + Amplificateurs d'instrumentation)

3.2 Conception d'un filtre biomédical Gm-C

Partie 4 : Session d'entraînement (3h00 à la maison avec des heures de bureau pour les questions)

Un ensemble d'exercices et d'examens précédents est fourni avec la correction. Le professeur reste disponible pour répondre aux questions pendant les heures de bureau.

Déroulement, organisation du cours

L'électronique étant une matière pratique, l'apprentissage se fera par des démonstrations de raisonnement sur des cas typiques.

L'objectif étant que l'étudiant soit suffisamment familiarisé et entraîné pour pouvoir reproduire ces raisonnements sur d'autres cas.

Organisation de l'évaluation

La présence en TP est obligatoire car le travail fourni en séance (calculs, recherche de solutions...) constitue une partie de l'évaluation. Chaque TP compte 20% de la note finale. L'examen final de 2h00 compte pour 60% de la note finale.

La compétence C6 sera évaluée sur la base du TP/projet où il y aura des résultats à obtenir à partir de simulateur électronique. Il faudra une note supérieure à 12/20 en TP pour valider cette compétence. Les compétences C1 et C2 seront évaluées sur toutes les activités, mais il faudra une note d'examen écrit supérieure à 10/20 et une note de TP supérieure à 12/20 pour valider ces compétences.

Support de cours, bibliographie

Tony Cahn Carusone, David A. Johns, Kenneth W. Martin "Analog Integrated Circuit Design" Wiley
R. Jacob Baker « CMOS Circuit Design, Layout and Simulation" IEEE Series on Microelectronics Systems and Wiley

Moyens

L'électronique étant une matière difficile à maîtriser sans être confronté à des circuits, ce cours présente la particularité de se reposer sur des exemples pratiques pour déclencher l'apprentissage. De plus, la majorité des études de cas sont illustrées par des fichiers LtSpice que l'étudiant peut simuler en simultanéité avec les cours, PC et TP.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours les étudiants l'ayant suivi seront capables de:

- concevoir un schéma électronique réalisant une chaîne de traitement de signal pour une application biomédicale ou de communication
- analyser un schéma électronique combinant amplificateurs opérationnels, transistors et éléments passifs

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences:

C1: Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2: Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C6: Être à l'aise et innovant dans le monde du numérique

2EL2530 – Capteurs intégrés MEMS

Responsables : **Jerome Juillard**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Dans de nombreux domaines applicatifs - automobile, médecine, aéronautique et défense, télécommunications ou électronique de grande consommation (smartphone, tablettes) - le développement ou l'intégration de capteurs miniaturisés MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) constitue désormais un passage obligé du déploiement d'applications connectées. Ces dispositifs sont utilisés comme capteurs (accéléromètres, gyroscopes, capteurs de pression, microphones, etc.), actionneurs (imprimantes jet d'encre, displays optiques) ou dans la conversion d'énergie. Ils présentent de tels avantages en termes de fiabilité, de consommation, de métrologie, de dimensions et de coût, qu'ils sont rapidement devenus, depuis les années 90, des éléments essentiels (mais invisibles) de notre quotidien, et sont appelés à jouer un rôle croissant dans notre avenir.

Ce cours couvre des aspects théoriques et pratiques, du point de vue de la modélisation (modélisation multi-physique / multi-domaine, réduction d'ordre de modèle), de la physique (mécanique, électrostatique, fluide, limites métrologiques fondamentales), de la technologie (techniques de micro-fabrication, intégration, packaging), et de l'économie (rentabilité). Il a pour ambition de proposer un tour d'horizon complet du domaine, qui intéressera à la fois les étudiants amoureux de "belle physique" et de conception de systèmes complexes, ou encore ceux qui souhaitent appréhender l'industrialisation à grande échelle de dispositifs intégrés.

Des stages de césure chez des grands noms des MEMS, français et internationaux, sont proposés chaque année.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Pas de prérequis particulier.

Plan détaillé du cours (contenu)

CM = 13.5 HPE

CM 1 – Panorama des MEMS (applications : capteurs, actionneurs, transducteurs, acteurs principaux)

CM 2-3 – Capteurs Inertiels MEMS, Mécanique et modélisation

CM 4-5 – Transduction et Forces à l'échelle des MEMS

CM 6-7 – Fabrication, intégration et packaging

CM 8-9 – Industrialisation des MEMS

TDs = 6 HPE + 6 HEE

Homework - Accéléromètre pendulaire - modélisation et simulation (premiers pas avec Coventor) - 3HEE

TD papier - Magnétomètre résonant AM - 3 HPE

TD info - Gyroscopes vibrant MEMS - 3HPE (modes séparés) + 3HEE (modes dégénérés)

Projets = 9 HPE + ??? HEE

Reverse engineering d'un accéléromètre 3 axes commercial
Etude d'un accéléromètre 2 axes résonant
Optimisation d'un magnétomètre résonant FM
Modélisation de switches d'accélération MEMS
etc.

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux (13.5h), PC (6h), projets (9h)
Cours et supports en anglais. Polycopié disponible en français.

Organisation de l'évaluation

QCM sur cours magistraux / PCs (50%) Rapport de projet (50%).
Compétences C1 et C2 évaluées via QCM + note projet (hors partie simu)
Compétence C6 évaluée sur note projet (partie simu exclusivement)

Support de cours, bibliographie

Practical MEMS, V. Kaajakari, Small Gear Publishing, 2009
Inertial MEMS, principles and practice, V. Kempe, Cambridge University Press, 2011
Micro Mechanical Transducers, Pressure sensors, Accelerometers and Gyroscopes, M.-H. Bao, Elsevier, 2000
Micromachined Transducers Sourcebook, G. T. A. Kovacs, McGraw-Hill, 1998

Moyens

Logiciel MEMS+ Coventor (accès à 50 licences gratuites accordé par l'entreprise)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Connaître les principaux types de capteurs / actionneurs MEMS et leurs applications
Connaître les principaux procédés de fabrication, d'intégration et de packaging des dispositifs MEMS
Connaître les principaux phénomènes physiques mis en jeu à l'échelle micro (mécanique, transduction, dissipation, bruit)
Comprendre globalement le fonctionnement des capteurs inertiels MEMS (accéléromètres, gyroscopes), de la physique, à l'électronique et aux lois de commande.
Etre capable de dimensionner un tel système, et de le simuler à l'aide d'un outil de conception métier

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 / C2 / C6

2EL2610 – Théorie des communications

Responsables : **Sheng Yang**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

[Ce cours est enseigné en anglais]

Les technologies de communication numérique ne se limitent plus aux interactions personnelles : elles constituent aujourd'hui l'épine dorsale des systèmes intelligents dans de nombreux secteurs. Des véhicules autonomes à l'automatisation industrielle, en passant par les liaisons satellites et les villes connectées, la capacité à échanger des données de manière fiable, efficace et sécurisée transforme notre monde.

Ancré dans les travaux fondateurs de Claude Shannon sur la théorie mathématique de la communication — aujourd'hui connue sous le nom de théorie de l'information — ce cours propose les bases théoriques et les méthodes nécessaires pour modéliser, analyser, concevoir et optimiser des systèmes de communication numérique. En s'appuyant sur les notions abordées en théorie de l'information, nous approfondissons les aspects à la fois pratiques et théoriques des communications numériques.

À travers des outils mathématiques puissants — algèbre linéaire, probabilités, théorie des nombres, statistiques, optimisation — vous explorerez les limites fondamentales et les contraintes réelles des systèmes de communication modernes. Grâce à des exemples concrets et des travaux pratiques en Python, vous étudierez des problématiques clés comme l'efficacité spectrale, la correction d'erreurs, la latence réduite ou encore la consommation énergétique. Les méthodes abordées trouvent aussi des applications directes dans d'autres domaines tels que la finance, la science des données ou l'intelligence artificielle.

Ce cours s'adresse aux étudiants passionnés par les mathématiques appliquées, les défis d'ingénierie et les technologies qui façonnent la connectivité moderne.

Pourquoi suivre ce cours ?

- Rigueur mathématique : idéal pour les étudiants attirés par les mathématiques appliquées et les approches théoriques exigeantes.
- Approche concrète : chaque concept théorique est illustré par des expérimentations pratiques en Python.
- Pluridisciplinaire : les compétences acquises sont mobilisables dans les télécoms, l'aéronautique, l'IoT, l'IA, ou encore la finance quantitative.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

- Modélisation
- Traitement du Signal
- Statistiques et apprentissage
- Théorie de l'information

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Vue d'ensemble des systèmes de communication

- Composants fondamentaux d'un système de communication numérique : sources, émetteurs, canaux, récepteurs, destinataires.
- Interfaces et protocoles de communication.

2. Représentation des signaux, information et codage de source

- Représentation des signaux à temps continu, théorème de l'échantillonnage, quantification.
- Espaces de signaux, formes d'onde, séquences numériques.
- Théorie de l'information : entropie et méthodes de codage de source (Huffman, Lempel-Ziv, JPEG, MP3).

3. Modulation numérique et transmission

- Modèles de canal : bruit blanc gaussien additif (AWGN).
- Techniques de modulation numérique et critère de Nyquist.
- Représentation en bande de base et en bande passante.
- Règles de décision optimales et architecture émetteur-récepteur.
- Analyse des performances : efficacité spectrale, rapport signal/bruit, débits, probabilité d'erreur.

4. Codage de canal et modèles de communication

- Modèles de canaux à temps discret et équivalences.
- Mesures d'information : information mutuelle, capacité d'un canal (limite de Shannon).
- Codes correcteurs d'erreurs : codes en blocs linéaires, codes convolutifs, LDPC, codes polaires.
- Méthodes de décodage : décisions dures et souples, algorithme de Viterbi.
- Évaluation des performances : rendement des codes, probabilité d'erreurs résiduelles.

Travaux pratiques (avec notebooks Python)

TP1 : Compression d'image avec l'algorithme de Huffman

TP2 : Compression audio par sous-échantillonnage et analyse de Fourier

TP3 : Modulation et transmission en bande de base

TP4 : Codage et décodage de codes QR

Déroulement, organisation du cours

Cours (16,5 H)

TD (6 H)

TP (6H)

Contrôle final (2H)

Organisation de l'évaluation

Compte Rendu TP (30%) Contrôle final : examen écrit (70%)

Support de cours, bibliographie

- R.G. Gallager. Principles of digital communication. Cambridge University Press; 2008.
- A. Lapidoth. A foundation in digital communication. Cambridge University Press; 2017.
- T.M. Cover, J.A. Thomas. Elements of information theory, Wiley, 2nd edition, 2005.

Moyens

Equipe enseignante :

- Sheng Yang pour les cours magistraux
- Sheng Yang et Richard Combes pour les TD
- Sheng Yang et Richard Combes pour les TP

Taille des TD: 20 élèves par groupe (max. 3 groupes)

Outils logiciels: Python

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce cours, vous serez capable de :

- Modéliser, analyser, concevoir et optimiser les éléments clés d'un canal de communication numérique point à point.
- Construire et implémenter des techniques simples de codage de source et de canal adaptées à différents scénarios.
- Concevoir des récepteurs et détecteurs optimaux pour extraire de manière fiable l'information transmise sur un canal bruité.
- Mobiliser des outils mathématiques tels que les espaces vectoriels, la théorie des probabilités, les statistiques et la théorie des nombres pour analyser les signaux et les systèmes de communication.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C6.7 Comprendre la transmission de l'information

C1.2 Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pour traiter le problème

C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur

2EL2620 – Réseaux de communication mobiles et services

Responsables : **Mohamad Assaad**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les réseaux de communication se sont déployés à l'échelle du globe en moins d'un demi-siècle. Suite à l'émergence de nouveaux concepts et services (smart cities, industrie 4.0, internet des objets, etc.), les réseaux sont en grande (r)évolution, surtout avec le développement de la 5G, pour accompagner la transformation de nombreux secteurs dits verticaux (télécommunications, transports, énergie, santé, agriculture, industrie...). Plusieurs types de services sont ainsi transmis sur les réseaux de communication actuels.

L'objectif de ce cours est de comprendre les architectures des réseaux actuels et une vision prospective des évolutions, ainsi que le concept cellulaire et les techniques radio principales pour permettre la transmission des données dans un réseau sans fil. Ce cours présente aussi les fondements théoriques et les outils utilisés pour la conception, l'optimisation, le déploiement et la gestion des systèmes et réseaux de communication. Il aborde le dimensionnement d'un réseau et la détermination de sa couverture en pratique, ainsi que le lien entre la capacité d'un réseau et la qualité de service à offrir à chaque usager, à l'aide d'outils d'ingénierie de trafic.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction générale et architectures des réseaux mobiles
 - Normes et organismes de régulation. Allocation du spectre.
 - Services (téléphonie, VoIP, diffusion de contenus multimédia). Nouveaux services (IoT, usine du futur, etc.
 - Introduction aux réseaux cellulaires (GSM, UMTS, LTE, 5G).
- Concept Cellulaire
 - Concept Cellulaire : Modèles de propagation. Techniques d'accès radio
 - Gestion des ressources Radio: Contrôle de puissance. Gestion des interférences. Optimisation.
 - Dimensionnement de réseau, déploiement, optimisation.
- Ingénierie de trafic et Qualité de service
 - Trafic et Qualité de service. Qualité d'expérience. Qualité de la couverture et de la connectivité.
 - Modèles de trafic et dimensionnement : loi d'Erlang, modèle de file d'attente, etc.
 - Gestion de la mobilité : Transfert des communications (Handover), adressage et routage, Itinérance (Roaming).

Déroulement, organisation du cours

Déroulement, organisation du cours (séquençage CM, TD, EL/TP...) :

- Introduction générale aux réseaux sans fil : 1h30 (CM)
- Concept Cellulaire et accès radio : 4h30 (CM) – 3h (TD) – 6h (TP)
- Ingénierie de trafic et Qualité de Service : 6h (CM) – 4h30 (TD) – 3h (TP)

TP 1 : Performance des techniques d'accès radio(3h)

TP 2 : Capacité et couverture d'un réseau sans fil (3h)

TP 3 : Ingénierie de trafic et dimensionnement des réseaux (3h)

Organisation de l'évaluation

Examen écrit (évaluation des acquis 1 à 4): 2h – 70% de la note finale - TP: 30% de la note finale

Support de cours, bibliographie

- 1- Harri Holma, Antti Toskala, LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- 2- S. Stanczak, M. Wiczanowski and H. Boche, Fundamentals of Resource Allocation in Wireless Networks, Second edition, Springer 2009.
- 3- H. Holma and A. Toskala, WCDMA for UMTS, John Wiley & Sons, 2004.
- 4- R. Van Nee and R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, 2000.
- 5- T. Bonald, M. Feuillet, Network Performance Analysis, Wiley, 2011.
- 6- 3GPP Specifications.

Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Mohamad Assaad, Salah Eddine Elayoubi
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) :25
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) :

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Connaître l'architecture et les différentes fonctions des réseaux sans fil
- Modéliser un réseau cellulaire avec ses fonctions principales.
- Dimensionner un réseau cellulaire
- Connaître les principes de la gestion de réseau et de la qualité de service dans un réseau sans fil
- Implémenter des modèles de réseaux cellulaires et de gestion de réseau sous Matlab

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A l'issue de ce cours, les compétences suivantes seront validées

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

2EL2630 – Applications de la physique statistique et quantique aux sciences de l'information

Responsables : **Zeno Toffano**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours constitue une ouverture aux théories et techniques mathématiques, informationnelles et statistiques issues de la physique quantique et statistique et de la théorie de l'information.

Ces techniques sont aujourd'hui couramment appliquées dans de nombreux domaines liés au traitement de l'information, les réseaux de neurones et l'apprentissage profond, le traitement d'images, les télécommunications, le web sémantique, l'intelligence artificielle, la biologie computationnelle... Mais aussi d'une façon plus générale dans les sciences humaines et sociales avec par exemple des applications dans le traitement du langage naturel et en finance.

Un rôle central dans ces recherches est l'estimation des incertitudes et des erreurs dans les processus informationnels. Le but est de pouvoir d'estimer et de corriger les erreurs afin de disposer d'une information exploitable pour le calcul et la transmission.

Les techniques opérationnelles utilisant l'information quantique ont montré récemment leur avantage par rapport aux méthodes classiques, l'exemple emblématique étant l'ordinateur quantique.

Le cours proposé, par nature transdisciplinaire, a pour but d'établir des connexions entre la formation en mathématique et en physique et les applications technologiques de pointe, tels que les communications numériques, le traitement des données, l'estimation et la correction des erreurs, l'apprentissage algorithmique et le calcul et l'information quantique.

Il est destiné aux étudiants désireux de se familiariser au travail de recherche et d'ingénieur dans des domaines scientifiques et technologiques de pointe dans un environnement numérique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Analyse et probabilités, algèbre linéaire, physique quantique et statistique.

Notions souhaitées en théorie de l'information (cours I année), apprentissage, théorie des communications, algorithmique et théorie de la complexité.

Plan détaillé du cours (contenu)

Théorie de l'information et applications

Deuxième loi de la thermodynamique. Principe d'entropie maximale. Grandes déviations. Méthode des types. Taux d'entropie des processus stochastiques. Chaîne de Markov. Compression et transmission de données. Principaux théorèmes de codage. Codage source et canal. Codes pour corrections des erreurs

Physique statistique classique et quantique

Rappels de la physique statistique classique. Le principe de Landauer et le démon de Maxwell. Modèles d'Ising. Machines de Boltzmann. Méthodes variationnelles. Apprentissage statistique.

Calcul et information quantique

Mesures quantiques, intrication quantique et entropie quantique. Portes et circuits quantique. Algorithmes quantiques. Téléportation quantique. Communications quantiques et cryptographie. Correction d'erreur quantique. Méthodes de simulation et d'optimisation quantique. Implémentations physiques et évaluation des performances de l'informatique quantique.

Déroulement, organisation du cours

28,5 HPE de cours magistraux et cours dirigés

Organisation de l'évaluation

Examen écrit de 2h.

Travail personnel : présentation orale avec transparents et rapport écrit devant la classe d'un article scientifique récent portant sur les thématiques du cours.

Support de cours, bibliographie

Mézard M., Montanari A., "Information, Physics, and Computation", Cambridge, 2009.
Nielsen M., Chuang I., "Quantum Computation and Quantum Information", II Ed., Cambridge, 2013
Jaeger G., "Quantum Information: An Overview", Ed. Springer 2007.
Djordjevic I.B., Quantum Information Processing, Quantum Computing, and Quantum Error Correction, An Engineering Approach, II Ed., Academic Press, 2021

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours) :

Antoine Olivier BERTHET et Zeno TOFFANO

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement l'étudiant sera capable de:

- 1) Comprendre dans un contexte pluridisciplinaire l'importance et l'impact des concepts classiques ou quantiques d'information et d'entropie
- 2) Interpréter grâce à l'aide des outils mathématiques de la Physique Statistique et quantique des cas concrets par exemple dans le domaine des sciences des données, des télécommunications, de l'intelligence artificielle, de la biologie computationnelle ou de la finance.
- 3) Proposer des modèles mathématiques pour des applications innovantes tels que l'apprentissage machine, les réseaux de neurones, l'optimisation, les réseaux d'information, les ordinateurs quantiques... grâce aux moyens de la théorie de l'information, de l'inférence statistique, des critères d'optimisation, de la logique et de l'information quantique appris pendant le cours.
- 4) Implémenter les modèles mathématiques sous forme d'algorithmes dans différents environnements informatiques.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les acquis d'apprentissage 1 et 2 permettent d'atteindre le jalon 1 de la compétence C1.1, c'est à dire "Savoir faire la liste des paramètres influents sur le système étudié, la liste des éléments avec lesquels il est en relation" et "Savoir identifier les paramètres importants vis-à-vis du problème posé".

Les acquis d'apprentissage 3 et 4 permettent d'atteindre le jalon 1 de la compétence C 1.2, c'est-à-dire "Savoir utiliser un modèle présenté en cours de manière pertinente. Faire le choix d'hypothèses simplificatrices adaptées au problème étudié".

L'acquis d'apprentissage 4 permet aussi d'atteindre le jalon 2B de la compétence C 1.3, c'est-à-dire "Connaître les limitations des simulations numériques et ce qu'on peut attendre, savoir critiquer des résultats de simulations numériques".

2EL2720 – Engagement handicap - Tutorat auprès de jeunes en situation de handicap

Responsables : **Lionel Husson**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le module "engagement handicap" allie une formation théorique et pratique sur le handicap ainsi qu'une expérience de terrain auprès de personnes en situation de handicap. L'objectif est de sensibiliser et former les étudiants pour leur permettre de comprendre ce que recouvre le handicap, d'adopter les bons réflexes et les préparer aux sujets de la diversité, tout en développant plus globalement leurs capacités d'adaptation, de responsabilité et managériales. L'expérience de terrain organisée par le responsable du module est une action pédagogique et solidaire : un tutorat auprès de jeunes en situation de handicap (en collège, lycée ou université) afin de les aider à dépasser des obstacles et favoriser leur accès à la formation supérieure et à l'insertion professionnelle. Une autre expérience de terrain confrontant au handicap et constituant une situation d'apprentissage expérientiel peut être proposée et sous réserve d'être validée au préalable par le responsable du module

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Pas de prérequis

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Comprendre le handicap et ses conséquences pour des élèves et sur la conduite de leurs études, ainsi que le handicap dans le monde professionnel
2. Savoir définir le cadre et adopter la bonne posture pour engager et conduire un tutorat, et plus globalement une interaction auprès de personnes en situation de handicap
3. Réaliser, vivre et adapter le tutorat avec un ou plusieurs jeunes en situation de handicap ou conduire une action de terrain et d'engagement confrontant au handicap
4. Prendre du recul sur l'expérience vécue, formaliser les acquisitions

Déroulement, organisation du cours

Le tutorat se décline en 2 dispositifs

- Tutorat individuel : en partenariat avec Sopra-Steria. Un tuteur accompagne un jeune, sous la forme soutien scolaire. Les séances se déroulent selon les disponibilités des tuteurs-tutorés
- Tutorat collectif : en partenariat avec l'association Fédé 100% handinamique. Un groupe de tuteurs accompagne un groupe de jeunes, pour les aider à préciser leurs projets de formation, prendre confiance en soi et s'épanouir dans un groupe.

- Formation théorique et pratique :
 - a. 1 séance (3h) de formation sur le handicap
 - b. 1 séance (3 h) d'atelier de formation et de mise en situation sur la conduite de tutorat
 - c. 1 séance (3 h) d'études de cas pratiques handicap en entreprise
- Environ 10-15 séances de tutorat (1h-1h30 chacune) à réaliser au sein des établissements partenaires pendant l'année scolaire selon un rythme typiquement hebdomadaire et adapté aux besoins des tutorés - S'il s'agit une autre expérience d'engagement celle ci comprendra une volumétrie équivalente.
- Points réguliers de suivi ; journal d'expérience
- 1 séance (3h) de partage d'expériences à mi-parcours
- 1 séance de bilan et présentation des tutorats réalisés

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu (participation aux séances de formation ; réalisation des séances de tutorat et compte rendu) + évaluation finale (rapport « journal d'expérience » et présentation orale) illustrant les acquis au regard de situations rencontrées et d'une analyse réflexive

Support de cours, bibliographie

Livret du tuteur et autres ressources sur le handicap

Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Lionel HUSSON et formateurs de Sopra-Steria et de la Fédé 100% handinamique
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : non
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : non

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre ce que recouvre le handicap : types de handicap, conséquences pour les personnes et les enjeux sociétaux pour l'école et le monde professionnel.
- Être à l'aise pour interagir avec des personnes en situation de handicap
- Mobiliser des capacités pédagogiques, relationnelles et organisationnelles pour structurer et conduire une activité de travail efficace avec une ou plusieurs personnes
 - En travaillant sur la relation à l'autre. Comprendre les besoins et les attentes de ses interlocuteurs. En tenir compte de façon évolutive. Susciter des interactions. Créer un climat de confiance
 - En travaillant sur soi. Être à l'aise. Se montrer convaincu. Manifester l'empathie. Gérer ses émotions.
- Penser et agir en professionnel éthique responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.
 - Agir de façon inclusive face à des questions de diversité : identifier et comprendre des situations exigeant des actions d'intégration et participer à une action inclusive dans une démarche précise

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Ce module est contributif à l'acquisition des compétences suivantes :

C9 : Penser et agir en professionnel éthique responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales.

C9.4 : Agir de façon inclusive face à des questions de diversité : identifier et comprendre des situations exigeant des actions d'intégration et participer à une action inclusive dans une démarche précise

C7 : Savoir convaincre

C7.1 : sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

C7.2 : sur la relation à l'autre : Comprendre de façon évolutive les besoins et attentes de ses interlocuteurs. Susciter des interactions, être pédagogue et créer un climat de confiance.

C7.3 : sur soi : Être à l'aise et se montrer convaincu, manifester de l'empathie et gérer ses émotions

C7.4 : sur les techniques de communication : Maîtriser le langage parlé, écrit et corporel, et maîtriser les techniques de base de communication

C5 : Evoluer et agir dans un environnement international, interculturel et de diversité

C5.2 : Écouter, se faire comprendre et travailler avec des acteurs de diversités, cultures, codes, formations, disciplines, etc. variés

2EL2730 – Electif associatif

Responsables : Ludovic-Alexandre VIDAL, Guillaume Mainbourg, Géraldine Carbonel

Département de rattachement : DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR

Langues d'enseignement :

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 60

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 30,50

Catégorie d'électif : Sciences de l'entreprise

Niveau avancé : Non

Présentation, objectifs généraux du cours

L'électif associatif a cinq parcours historiques distincts :

EA1 - Mettre en place une démarche de créativité dans son association

EA2 - Structurer son association : création de valeurs, processus et gestion des parties prenantes

EA3 - Mettre en place une démarche de management des risques dans son association

EA4 - Gestion de projets informatiques

EA5 : Lancer une démarche de définition de plan de communication au sein de votre association

D'autres documents pourraient amenés à être rajoutés à terme en fonction des problématiques rencontrées par les associations, sachant que la mission d'électif associatif doit permettre de monter en compétences et connaissances ingénieurs (méthodes, outils, process,...) que vous pourrez utiliser / transposer lors de futures missions.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Appartenance à une association / à un projet associatif précis.

Plan détaillé du cours (contenu)

Travail sur la maîtrise de ces compétences / connaissances via l'établissement de livrables concrets définis dans le cadre du parcours EAx, ceux-ci devant permettre de bien évaluer l'acquisition de compétences.

Déroulement, organisation du cours

Spécifique à chaque parcours EAx.

Organisation de l'évaluation

Etablissement d'objectifs, livrables, rapport final et vidéo finale.

Moyens

Equivalent de 3 amphis de 1h d'acquis fondamentaux (au minimum selon votre mission) plus livrables à rendre sur la période du cours, avec un rapport final et une vidéo finale.

Accompagnement méthodologique.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Spécifique à chaque parcours EAx.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Spécifique à chaque mission, mais les compétences C4, C6, C7, C8 et C9 sont a priori validables dans cet électif.

2EL2740 – Enjeux, actualités et opportunités du secteur public

Responsables : Jean-Guillaume MESSMER, Guillaume-Alexandre Collin, Philippe HELLEISEN, Jean-Marc Camelin

Département de rattachement : DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR

Langues d'enseignement : FRANCAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 60

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 30,50

Catégorie d'électif : Sciences de l'entreprise

Niveau avancé : Non

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours a pour objectifs :

- De permettre aux étudiants d'acquérir une compréhension du fonctionnement et des enjeux du secteur public en France ;
- De travailler sur des sujets d'actualité à forts enjeux, en élaborant des propositions qui feront l'objet d'une note à l'attention du Ministre chargé du dossier ;
- De discerner des opportunités pour les ingénieurs CentraleSupélec.

Il est conçu et animé par :

- Philippe HELLEISEN, Alumni et Administrateur de l'Etat
- Guillaume-Alexandre COLLIN, Alumni, et consultant dans le secteur public
- Jean-Guillaume MESSMER, Alumni, et consultant dans le secteur public

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

- Un intérêt pour le secteur public.
- Participation active / présence obligatoire (séances avec des intervenants, travaux en équipe...).

Plan détaillé du cours (contenu)

A / Introduction (séance n°1)

Séance n°1 :

- Collecte des attentes
- Présentation du plan de cours
- Présentation des études de cas et répartition des travaux
- Actualités (ex. : feuille de route du Gouvernement, programme de travail de la Commission européenne...)

B/ Tronc commun : les administrations publiques (séances n°2 à 5)

Contexte : les administrations publiques jouent un rôle important dans la vie économique et sociale (les dépenses publiques représentent 57% du produit intérieur brut (PIB) en France en 2024). La multiplicité des institutions soulève des enjeux de bonne articulation des structures (séance n°2) ; la complexité juridique soulève des enjeux de simplification (séance n°3), la dette soulève des enjeux d'amélioration de la gestion publique (séance n°4) ; l'emploi public soulève des enjeux de recrutement/carrière dans le secteur public (séance n°5).

Séance n°2 : « qui fait quoi ? », la multiplicité des institutions et les enjeux de bonne articulation des structures

-Problématique : Etat, collectivités locales, sécurité sociale, Europe, organisations internationales... Qui fait quoi ? Et où les ingénieurs sont-ils utiles ?

Séance n°3 : la hiérarchie normes, la complexité juridique et les enjeux de simplification

-Problématique : quel l'équilibre entre les besoins de sécurité juridique et d'agilité ?

-Etudes de cas envisagées : les indicateurs de suivi de l'activité normative et le rôle du Secrétariat général du Gouvernement (SGG) ; les dispositifs « France Simplification » et « France Expérimentation ».

Séance n°4 : les finances publiques, la dette et les enjeux d'amélioration de la gestion publique

-Problématique : Quels sont les objectifs et les moyens consacrés aux politiques publiques et comment mesurer leur performance ? Quels sont les grands principes fiscaux et les principaux impôts ?

-Etudes de cas envisagées : les dispositifs d'évaluation des politiques publiques ; le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) et le programme « France 2030 ».

Séance n°5 : l'emploi public et les enjeux de recrutement/carrière dans le secteur public + les marchés publics (enjeux et droit de la commande publique)

-Problématique : quel avenir pour la fonction public et quelles opportunités de carrière ?

-Etudes de cas envisagées : les défis concernant l'encadrement supérieur et le rôle la Délégation interministérielle à l'encadrement supérieur de l'Etat (DIESE) ; l'observatoire économique de la commande publique (OECB).

C/ Au choix : Parcours « défis de l'action publique » ou Parcours « politiques publiques » (séances n°6 à 9)

C.1/ Parcours « défis de l'action publique » (séances n°6 à 9)

Contexte : la transformation de l'action publique fait l'objet d'un pilotage renforcé au niveau gouvernemental depuis plus d'une vingtaine d'années (séance n°6). L'action publique doit aujourd'hui faire face à trois principaux défis : la révolution numérique (séance n°7), la transition écologique (séance n°8) et les tensions géopolitiques (séance n°9). *NB : L'ordre des séances est indicatif.*

Séance n°6 : La transformation de l'action publique

-Etudes de cas envisagées : la feuille de route de la Direction interministérielle de l'action publique (DITP) ; un exemple emblématique de transformation publique, la modernisation de l'impôt sur le revenu (télédéclaration et prélèvement à la source) par la Direction générale des finances publiques (DGFiP).

Séance n°7 : Le digital et l'intelligence artificielle

-Etudes de cas envisagées : la Direction interministérielle du numérique (DINUM) ; la plateforme des données publiques françaises data.gouv.fr.

Séance n°8 : La planification écologique

-Etudes de cas envisagées : le Secrétariat général à la planification écologique (SGPE) et le programme « France Nation Verte » ; le label bas carbone (LBC) et les développements de l'économie du carbone.

Séance n°9 : Géopolitique et souveraineté

-Etudes de cas envisagées : la Délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques (DIAMMS) ; le contrôle des investissements étrangers en France par la DG Trésor.

C.2/ Parcours « politiques publiques » (séances n°6 à 9)

Contexte : les grands enjeux de l'action publique (transition écologique, révolution, numérique, souveraineté) déclinent dans chacune des grandes politiques publiques, en particulier en ce qui concerne la politique industrielle (séance n°6), la mobilité (séance n°7), le logement (séance n°8) et la santé (séance n°9). *NB : L'ordre des séances est indicatif.*

Séance n°6 : La politique industrielle

-Etudes de cas envisagées : les agences européennes de financement de l'innovation ; la production et la consommation d'énergie en France.

Séance n°7 : La mobilité

-Etudes de cas envisagées : les services express régionaux métropolitains (SERM) ; la décarbonation de la mobilité.

Séance n°8 : Le logement

-Etudes de cas envisagées : l'Agence nationale pour l'habitat (ANAH) ; le logement social et rôle des offices HLM.

Séance n°9 : La santé

-Etudes de cas envisagées : la lutte contre les déserts médicaux ; les Agences régionales de santé (ARS).

D / Conclusion (séance n°10)

Séance n°10 :

-Synthèse des travaux.

-Echanges sur les opportunités dans le secteur public : où les ingénieurs sont-ils utiles ? Comment rejoindre le secteur public (préparer les concours, négocier un contrat...) ?

-Bonus : « Savoir comment préparer les concours de la fonction publique en 1h00 »

Déroulement, organisation du cours

- 1 séance introduction de 1h30
- 9 séances de 3h00 incluant une présentation, des points d'actualité politico-institutionnels et des études de cas présentées par les étudiants.
- 1 séance de 2h d'évaluation

Organisation de l'évaluation

La note sera composée des trois éléments suivants :

- Participation active aux séances (questions/interventions, participation aux points d'actualité politico-institutionnels sur une des séances 2 à 10 ...) : 20%
- Etude de cas en équipe de 3 étudiants (historique du sujet, analyses des enjeux et défis, contacts avec acteurs du sujet, propositions + rédaction d'une note pour le Ministre chargé du sujet) : 40%
- Examen final en 1h30 (quiz + mini-étude de cas) : 40%

Moyens

Le cours est conçu et animé par :

- Philippe HELLEISEN, Alumni et Administrateur de l'Etat
- Guillaume-Alexandre COLLIN, Alumni, et consultant dans le secteur public
- Jean-Guillaume MESSMER, Alumni, et consultant dans le secteur public

Il s'appuie sur l'intervention de responsables de haut niveau du secteur public et pourra proposer des visites de sites.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre les bases du fonctionnement et les grands enjeux du secteur public en France.
- Relier les sujets d'actualités aux enjeux du secteur public.
- Transformer l'analyse des problématiques publiques en propositions et notes de synthèse.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 création de valeur : Prise au sens de créer de la valeur spécifiquement pour la communauté, l'Etat, les citoyens.
- C5 multiculturel : Evoluer et agir dans un environnement international, interculturel et de diversité dont la diversité territoriale.
- C7 convaincre : Savoir convaincre.
- C9 éthique soutenabilité : Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales, voire politique de son action.

2EL6020 – Architecture des ordinateurs

Responsables : **Ruben Salvador Perea**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif est ouvert à tous les étudiants qui le souhaitent et il est également obligatoire pour le parcours InfoSec.

Les microprocesseurs sont omniprésents dans la société actuelle. Toutefois, leur conception, implémentation et construction restent un défi à relever qui a un impact majeur sur les performances et la sécurité globale des systèmes informatiques.

L'objectif principal de ce cours est de donner aux étudiants toutes les connaissances de base nécessaires pour comprendre le fonctionnement des processeurs modernes. Nous aborderons les différents concepts et techniques fondamentaux permettant de s'initier à l'architecture des ordinateurs, en mettant l'accent sur l'interface matériel/logiciel ainsi que sur l'approche de conception "bottom-up" pour comprendre comment les microprocesseurs fonctionnent et comment ils peuvent être réellement conçus.

Ce cours s'inspire largement de livre de Patterson et Hennessy « Computer Organization and Design, The Hardware/Software interface, RISC-V Edition, Morgan Kaufmann, 2018 ». Ce livre sera utilisé comme ouvrage de référence dans le cadre de cet électif. Les deux auteurs ont fait un travail pionnier en matière d'architecture des ordinateurs, notamment dans les architectures « Reduced Instruction Set Computer » (RISC). David Patterson a conçu le terme RISC, alors que John L. Hennessy a été l'inventeur du microprocesseur MIPS. Ces deux auteurs ont reçu le prix « 2017 Turing Award » pour leurs excellent travail de recherche sur les architectures RISC.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Ce cours s'appuie sur les concepts fondamentaux de :

- 1CC1000 – Systèmes d'Information et Programmation
- 1EL8000 – Systèmes Electroniques (particulièrement la partie "électronique numérique")

Certaines notions d'algorithmique & complexité sont également intéressantes.

Plan détaillé du cours (contenu)

Conception de circuits numériques à partir d'un langage de description du matériel (Hardware Description Language, HDL) (4,5h CM + 6h TD)

- Conception de circuits logiques combinatoires
- Conception de circuits logiques séquentiels, machines à états finis (FSM, Finite State Machine), analyse temporelle
- Circuits reconfigurables : le Field-Programmable Gate Array (FPGA)
- Flot de conception en HDL pour les FPGA (description HDL, simulation, synthèse)

Architecture des ordinateurs et RISC-V (10,5h CM + 12h TP)

- Le modèle Von Neumann des architectures de processeurs
- Les paradigmes d'architecture RISC/CISC
- Architecture du jeu d'instructions RISC-V (Instruction Set Architecture, ISA), modes d'adressage
- Les éléments de base d'un processeur : chemin de données, registres, unité arithmétique et logique (ALU), unité de commande, mémoire, périphériques
- Interruptions et exceptions
- Performances : pipeline, hiérarchie mémoire et caches, prédiction de branchement, exécution dans le désordre
- Notions sur la sécurité de l'architecture des ordinateurs

TD et TP

- Flot de conception en VHDL pour les FPGA
- Programmation en assembleur RISC-V
- Conception d'une sous-partie d'un processeur RISC-V en VHDL

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux : 15h

TD : 6h

TP : 12h

Organisation de l'évaluation

Contrôle final (écrit ou oral) : 40%

Examen de laboratoire (réalisation technique, démonstration et oral de présentation du projet) : 40%

Devoirs de cours (exercices, lectures...) : 20%

Support de cours, bibliographie

Polycopié mis à disposition des élèves

- **Ouvrages principaux pour le cours** : Il y a quelques exemplaires de ces livres à la bibliothèque et ils sont également disponibles sur la plateforme ebook de l'école à : <https://www.vlebooks-com.ezproxy.universite-paris-saclay.fr/>
 - D. A. Paterson, J. L. Hennessy, Computer Organization and Design : The Hardware/Software Interface, RISC-V Edition, Morgan Kaufmann, 2018. [AO]
 - S. L. Harris, D. M. Harris, Digital Design and Computer Architecture (MIPS ou ARM Edition), Morgan Kaufmann. [CNAO]
- **Autres ouvrages**
 - W. J. Dally, R. C. Harting, T. M. Aamodt, Digital Design Using VHDL : A Systems Approach, First Edition, Cambridge University Press, 2016 [CN]
 - B. J. LaMeres, Introduction to Logic Circuits & Logic Design with VHDL, Second Edition, Springer, 2019 [CN]
 - M. M. Mano, C. R. Kime, T. Martin, Logic and Computer Design Fundamentals, Fifth edition, Pearson, 2015 [CNAO]
 - P. J. Ashenden, J. Lewis, The Designer's Guide to VHDL, Third Edition, Morgan Kaufmann, 2008 [CN]
- **PDFs disponibles librement**
 - B. Mealy, F. Tappero, Free Range VHDL : <http://www.freerangefactory.org> [CN]
 - P. J. Ashenden, The VHDL Cookbook : <https://tams.informatik.uni-hamburg.de/vhdl/doc/cookbook/VHDL-Cookbook.pdf> [CN]

Légende :

[AO] : Architecture des ordinateurs

[CN] : Conception de systèmes numérique

[CNAO] : Conception de systèmes numériques et architecture des ordinateurs

Moyens

Equipe enseignante : Rubén Salvador, Guillaume Hiet

- Taille des TD : 25
- Outils logiciels : Xilinx Vivado
- Carte Xilinx Pynq-Z1
- Salles de TP : Campus de Rennes Niveau 5, 25 étudiants

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'étudiant sera capable de :

- Expliquer les principes fondamentaux de la conception d'architecture des microprocesseurs modernes
- Concevoir des blocs d'un microprocesseur simple correspondant à un jeu d'instruction RISC-V
- Simuler et synthétiser ce microprocesseur sur un FPGA
- Développer des programmes en langage d'assembleur en utilisant le jeu d'instruction RISC-V

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.4 - Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

2EL6030 – Systèmes d'exploitation

Responsables : **Pierre Wilke**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif fait partie du parcours InfoSec. L'objectif de cet électif est de donner les connaissances et les compétences afin de réaliser un système d'exploitation multitâche gérant la mémoire des différents processus, gérant des interruptions et capable de réaliser des entrées-sorties.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Les prérequis pour ce cours sont les suivants :

- Bonne maîtrise du langage C (par exemple en ayant suivi le cours de compilation du parcours Infosec)
- Un plus serait utile de connaître l'assembleur RISC-V (par exemple en ayant suivi le cours d'architecture des ordinateurs du parcours Infosec)

Plan détaillé du cours (contenu)

Les différents cours sont organisés de la manière suivante :

I Cours 1 :

- Histoire des systèmes d'exploitation

II Cours 2 :

- Démarrage du système d'exploitation
- Programmation des registres de contrôle
- Niveaux de privilège
- Gestion des interruptions
- Appels système

III Cours 3 :

- Ordonnancement des processus
- Algorithmes d'ordonnancement
- Changement de contexte

IV Cours 4 :

- Primitives de synchronisation en espace noyau et utilisateur
- Problème de concurrence
- Concurrency réelle et pseudo-concurrency

V Cours 5 :

- Gestion de la mémoire virtuelle
- Segmentation
- Pagination
- Protection mémoire
- Chargement de binaire
- Algorithme d'allocation mémoire

Déroulement, organisation du cours

CM 15h
TP 18h

Organisation de l'évaluation

Contrôle final : oral sur un sujet

Évaluations obligatoires : Comptes-rendus de TP n°1 et 2, incluant le code produit pour répondre aux questions, et le nombre de tests fonctionnels passés par le code.

$NF = 0.5 CF + 0.5 EO$

La compétence C2.1 est validée au jalon 2 par la validation de ce cours.

La compétence C6.2 est validée au jalon 2 après avoir validé les TP (avoir la moyenne sur les 2 TPs)

La compétence C7.1 est validée au jalon 2 sur la performance lors de la présentation orale.

Support de cours, bibliographie

- Andrew Tanenbaum, "Systèmes d'exploitation", 3ème Edition, Pearson.
- Russinovich, Mark, Solomon, David, Ionescu, Alex, "Windows Internals", 6ème édition, Microsoft Press.
- Daniel Bovet, Marco Cesati, "Understanding the Linux Kernel", 2nd Edition, O'Reilly.
- Love, Robert, "Linux Kernel Development: A thorough guide to the design and implementation of the Linux kernel (Developer's Library)", Addison-Wesley.

Moyens

Enseignants : Frédéric Tronel et Pierre Wilke

Matériel nécessaire : un ordinateur équipé d'un système d'exploitation Linux.

Logiciels nécessaires : chaîne de cross-compilation gcc pour RISC-V, qemu-riscv64, docker (Un guide d'installation de ces différents outils sera fourni en introduction du cours)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Comprendre les concepts mis en oeuvre lors de la conception d'un système d'exploitation.

Comprendre l'impact des services offerts par un système d'exploitation sur les performances et la sécurité des applications.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C6.2 Concevoir un logiciel

C7.1 Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

2EL6040 – Programmation système sous linux et windows

Responsables : **Pierre-François Gimenez**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif fait partie du parcours InfoSec, mais est pour autant accessible à tout étudiant de deuxième année le souhaitant.

Le langage C reste un des langages les plus utilisés pour programmer des applications dans les couches basses du logiciel telles que des systèmes d'exploitation ou des applications proches de celui-ci. En particulier, il est encore très largement utilisé pour programmer les services tournant en tâche de fond dans les systèmes GNU/Linux et Microsoft Windows (serveurs Web, serveurs de bases de données, serveur de messagerie électronique, serveurs de fichiers, etc.). Bien que de conception très ancienne (années 70), cet état de fait s'explique par les performances inégalées des programmes écrits dans ce langage grâce aux progrès constants des chaînes de compilation disponibles actuellement. Les inconvénients d'écrire dans un langage peu abstrait sont donc (partiellement) compensés par des performances quasiment optimales au prix d'un effort substantiel lors de la mise au point des programmes.

Ce cours s'adresse donc à des étudiants désireux d'approfondir leur pratique de la programmation au travers de l'apprentissage du langage C, en écrivant des applications proches du système d'exploitation en utilisant les interfaces standards d'un système Unix (norme POSIX, gestion des entrées-sorties, communications interprocessus, programmation multiprocessus et multithreads, gestion des signaux systèmes, déverminage et mise au point d'une application) et leurs équivalents pour l'API Win32/Win64 de Microsoft Windows.

Ce cours sera aussi l'occasion de se rendre compte des difficultés inhérentes à la programmation en langage C (notamment la gestion explicite de la mémoire et les conséquences de choix de conception discutables sur l'implémentation des tableaux et des chaînes de caractères) et des problèmes de fiabilité et de sécurité qu'elles engendrent.

Nous profiterons de cette expérience pour introduire un nouveau langage de programmation (Rust) qui permet de garantir à la fois plus de sécurité et de fiabilité par la conception même du langage (qui fait usage des derniers progrès en matière de système de typage) et qui dans le même temps permet d'obtenir les mêmes performances qu'un programme écrit en langage C. À notre connaissance, c'est la première fois que cette synthèse est assurée par un langage de programmation (les autres tentatives butant toujours sur soit des problèmes de performances à l'exécution, soit des erreurs durant le fonctionnement aboutissant généralement à des mises en défaut de la sécurité de l'application pouvant se répercuter sur celle de la plateforme qui l'exécute). Le langage Rust est déjà actuellement utilisé par les équipes de Mozilla pour refondre entièrement le code de leur navigateur Web Firefox. L'électif permettra aux étudiants de mettre en pratique les connaissances acquises au cours de travaux de laboratoires, qui consisteront en la programmation de services systèmes sous Unix et Windows en C.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

Systèmes d'information et programmation, Algorithmique & Complexité, réalisation préalable d'un projet de développement logiciel (1A)

Plan détaillé du cours (contenu)

Part 1 : Le langage C

Part 2 : The Rust language

Part 3 : APIs Système Unix et Windows, standard POSIX

Déroulement, organisation du cours

50% cours magistraux, 50% TP, mini-projet

Organisation de l'évaluation

Examen Final (présentation orale du projet): 33%

Examen de la réalisation : 33%

TP noté : 33%

Support de cours, bibliographie

- Le langage C - 2e édition - Norme ANSI (August 20, 2014) , Brian W. Kernighan and Dennis M. Ritchie.
- The Rust Programming Language, May 2018, Steve Klabnik and Carol Nichols.
- Programming Rust (August 2016), Jim Blandy.
- La norme POSIX.
- Windows System Programming, (4th Edition) (Addison-Wesley Microsoft Technology) by Johnson M. Hart (2015-10-01).

Moyens

Un environnement Linux et Windows

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Créer des programmes efficaces en C et Rust sur les plateformes Linux et Windows.
Sélectionner et utiliser les fonctions du noyau d'un système d'exploitation et ses API.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 - Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C6 - Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel

C7 - Convaincre

2EL6110 – Réseaux informatiques avancés

Responsables : **Alessandro PALUMBO, Jean-Francois Lalande**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

1CC1000 – Systèmes d'Information et Programmation

1EL6000 – Réseaux et Sécurité

2EL6130 – Systèmes embarqués et internet des objets

Responsables : **Ruben Salvador Perea**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet électif fait partie du parcours InfoSec, mais est pour autant accessible à tout étudiant de deuxième année le souhaitant qui maîtrise la programmation en langage C. Il a pour objectif de découvrir les spécificités du développement d'applications sur des systèmes embarqués et des objets connectés de différentes natures.

Les contraintes pour développer ces objets connectés sont variées : limite énergétique, capacités de calcul, connectivité réseau, déluge de données, temps réel, etc. Ainsi, l'électif s'attachera dans un premier temps à dégager les grands principes qui sont communs à ces objets connectés, par exemple, le déport des données dans le cloud, l'économie des traitements logiciels, la gestion de la connectivité réseau par intermittence, la programmation en temps réel, ou l'utilisation de services fournis par des systèmes d'exploitation embarqués et en temps réel.

Dans un second temps, l'électif illustrera ces principes en choisissant certains systèmes embarqués pour lesquels on approfondira le développement logiciel. En particulier, nous détaillerons l'écosystème informatique qui est propre à chacun de ces systèmes embarqués. L'objectif de cet écosystème informatique est de répondre à des contraintes spécifiques et de faciliter le développement d'applications. Ainsi, du point de vue du langage, il s'agira d'utiliser un langage très proche du système d'exploitation, comme le C ; et du point de vue des services du système d'exploitation, il s'agira d'utiliser des exemples connus comme FreeRTOS.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG8

Prérequis

- Savoir programmer en langage C
- Avoir des connaissances de base en ligne de commande Linux

Plan détaillé du cours (contenu)

CM 1-2 Introduction aux systèmes embarqués et à l'IoT

CM 3-4 Systèmes temps-réels

CM 5-6 RIOT et réseaux IoT

CM 7-8 Prise en main de RIOT

CM 9-10 Prise en main de FreeRTOS

TP 11-14 RIOT

TP 15-18 FreeRTOS

Déroulement, organisation du cours

- 15h de cours
- 12h de TP

Organisation de l'évaluation

- Contrôle continu : Evaluation des TP (0.5)
- Contrôle continu : Exposés d'approfondissement (0.5)

Moyens

- Cartes à microcontrôleurs STM32 (ou émulateurs si besoin)
- Plateforme IoT labs

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Connaître les spécificités et contraintes des systèmes embarqués et objets connectés
- Programmer des logiciels sur de tels systèmes

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C6.3 Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel

2EL6210 – Géopolitique des ressources et des objets

Responsables : **Raphael Danino-Perraud**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Dans leurs futures carrières d'ingénieurs, les élèves de CentraleSupélec seront amenés à inscrire leurs pratiques dans des mondes économiques et politiques globalisés. Ceux-ci se caractérisent par une interconnexion des différentes parties du globe et une intensification des flux de capitaux, de biens et de services à l'échelle mondiale, notamment permises par le développement des moyens de transports et des technologies de l'information et de la communication. Si les réseaux de production et d'échanges mondialisés paraissent s'affranchir de toute contrainte matérielle, ils demeurent pourtant fortement dépendants de ressources naturelles et d'objets techniques.

Depuis la fin du XXe siècle, les activités humaines et leurs impacts (urbanisation, changements climatiques et environnementaux) contribuent à accentuer la pression sur les ressources et leur disponibilité. La géopolitique des ressources et des objets influence les rapports de force internationaux et soulève des enjeux de pouvoir à diverses échelles (locale, nationale, régionale, mondiale).

Comprendre les enjeux de notre système politico-économique globalisé nécessite donc d'adopter une lecture critique des techniques et des ressources. Pour cela, nous adoptons une perspective centrée sur un certain nombre de ressources (minières, agricoles et énergétiques, mais aussi les déchets) et d'infrastructures (pipeline, réseau électrique, barrage hydroélectrique). C'est à partir de ces thématiques géopolitiques que les élèves seront amenés à identifier des rapports de force entre acteurs et les enjeux économiques qui y sont associés.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Plan détaillé du cours (contenu) : 11 séances de 3h, 1 examen de 1h30

Séance 1 – Introduction : une brève épistémologie des ressources – Raphaël Danino-Perraud et Angélique Palle (TD)

Séance 2 – Une infrastructure transnationale de transport énergétique comme objet géopolitique – Noémie Rebière (CM)

Séance 3 – Méthodologie de la cartographie géopolitique – Léa Gobin et Noémie Rebière (TP)

Séance 4 – Impacts géopolitiques induits par la transition énergétique : risques sur les objets et circulations des ressources – Angélique Palle (CM)

Séance 5 – Accompagnement de projets – Raphael Danino-Perraud et David Juilien (TP)

Séance 6 – Exercice appliqué : jeu de rôle – Wahel Rashid et David Juilien (TP)

Séance 7 - Produire et se nourrir : conflictualités sur les ressources – Matthieu Brun (CM)

Séance 8 - Les barrages hydroélectriques, un objet géopolitique – David Juilien et Wahel Rashid (TD)

Séance 9 – Les matières premières minérales, des ressources mondialisées : l'exemple du lithium – Audrey Sérandour (CM)
Séance 10 – Le déchet, un objet géopolitique – Wahel Rashid et Raphaël Danino-Perraud (TD)
Séance 11 – L'application contrastée du devoir de vigilance pour les ressources et conclusion du cours – Raphaël Danino-Perraud (CM)
Séance 12 – Devoir sur table (1h30)

Organisation de l'évaluation

Les acquis des étudiants seront évalués selon deux modalités :

1. Un dossier d'analyse cartographique, réalisé en groupe (de 3-4 étudiants) équivalent à 50 % de la note.
Tout au long de la séquence, les étudiants devront construire une réflexion géopolitique autour d'une ressource ou d'un objet mondialisé. Ils devront identifier les principaux acteurs et enjeux soulevés par cette ressource ou cet objet, porter un regard critique sur la matérialité des ressources et techniques étudiées (aucune technologie n'est neutre) et construire une réflexion à différentes échelles (mondiale, régionale, nationale, locale).
À partir d'une recherche bibliographique, les étudiants devront réaliser deux cartes analytiques présentant un raisonnement géopolitique autour d'une ressource ou d'un objet mondialisé. Au moins l'une des deux cartes devra être réalisée à l'échelle mondiale. L'encadrement de ce travail débutera lors de la séance sur la méthodologie de la cartographie géopolitique (séance 3), puis nous aurons une séance dédiée à l'accompagnement de projets (séance 5).
La restitution prendra la forme d'un dossier écrit, comprenant les deux cartes, une description de la légende problématisée (en 1 page) et une analyse des cartes (en 5 pages maximum). C'est ce dossier écrit qui sera noté. Des moments de suivis du projet seront organisés au cours du semestre à travers des exposés d'état des lieux (non notés).
2. Un devoir sur table, réalisé en séance 12 (durée : 1h30) équivalent à 50 % de la note.
Il s'agira de faire un commentaire de documents (corpus composé d'extraits d'articles, d'une carte et d'un graphique). Le corpus présentera un cas d'étude, qu'il s'agira d'analyser en mobilisant les concepts étudiés en cours.

Support de cours, bibliographie

ABIS Sébastien, BRUN Matthieu (2020), « Géopolitique de l'agriculture européenne », Études, 2020/2 (Février), pp. 17-28.
• LACOSTE Yves (2008), « La géographie, la géopolitique et le raisonnement géographique », Hérodote, 2008/3, n°130, pp.17-42. [En ligne] URL : <https://www.cairn.info/revue-herodote-2008-3-page-17.htm>
• PITRON Guillaume (2018), La guerre des métaux rares : la face cachée de la transition énergétique et numérique, Paris, Éditions Les liens qui libèrent, 296 pages.
• REBIERE Noémie, « Énergie et géopolitique régionale : quel avenir pour le hub turc ? », Orient Stratégiques (n°6), L'Harmattan, Paris, 01/2018, pp.1-15.
• ROTILLON Gilles (2010), Économie des ressources naturelles. Collection Repères, Paris, Édition La Découverte, Collection Repères, 128 pages.

Moyens

Equipe enseignante : Raphaël DANINO-PERRAUD (docteur en économie, ministère des Armées), David JUILIEN, Wahel RASHID, Audrey SÉRANDOUR, Matthieu BRUN, Léa GOBIN, Angélique PALLE, Noémie REBIERE

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- D'adopter un regard critique sur les ressources, de discuter les enjeux d'accès, de répartition et de contrôle de ces ressources, de problématiser les enjeux soulevés par leur exploitation et leur circulation ;
- Disposer de connaissances factuelles sur une variété de cas d'études, situés sur plusieurs continents (Europe, Asie, Amérique latine) et analysés à diverses échelles (mondiale, régionale, nationale, locale) ;
- Maîtriser les bases de la méthode d'analyse géopolitique et ses concepts clés (acteurs, rapports de pouvoirs, représentations, territoires). Il saura identifier les acteurs pertinents et décoder les rapports de force cristallisés autour d'une ressource ou d'un objet, à diverses échelles ;
- Lire une carte et l'appréhender dans une perspective géopolitique et critique. Il aura également acquis les bases de la réalisation cartographique à main levée.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.1 : Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.
- C2.2 : Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines
- C5.3 : Analyser les enjeux globaux et/ou locaux à l'international et adapter des projets ou solutions à ceux-ci

COURS SEQUENCE THEMATIQUE 5

ST5 – 51 – PILOTAGE ET CONTROLE DE VOL DANS LE TRANSPORT AERONAUTIQUE ET SPATIAL

Dominante : GSI (Grands Systèmes en Interaction) et CVT (Construction, Ville et Transports)

Langue d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Cette séquence aborde la problématique de la conception de lois de pilotage et du contrôle dynamique de vol de véhicules (avion, satellite et lanceur). Elle vise à donner aux élèves les notions de base associées à la conception de systèmes de contrôle d'un objet volant autour de ses 6 degrés de liberté afin de garantir une stabilité de fonctionnement et les performances requises. Les technologies dans les domaines de l'aéronautique et du spatial étant en constante évolution (propulsion, structure, matériaux, etc.), les lois de pilotage doivent s'adapter pour garantir les meilleures performances tout en tenant compte des nouvelles contraintes, notamment réglementaires, environnementales et économiques.

L'enseignement d'intégration permet de mettre en œuvre les compétences et connaissances acquises dans le cas d'un avion, d'un nanosatellite et/ou d'un lanceur. Ces véhicules connaissent un engouement ces dernières années du fait de la réduction du coût associé à la construction et au fonctionnement. Cependant, il soulève de nouvelles problématiques notamment pour le contrôle d'attitude et des performances dus à la miniaturisation des composants et donc de la réduction de leurs capacités d'action et leur efficacité.

L'intervention d'industriels du secteur de l'aéronautique et du spatial dans cette séquence permet de mieux appréhender les enjeux associés à la conception et l'exploitation de systèmes de plus en plus contraints.

Prérequis conseillés

Deux grandes thématiques sont abordées dans cette séquence : la modélisation d'objets indéformables et la modélisation de systèmes linéaires (fonctions de transfert, représentation d'état, équations différentielles) pour le contrôle. Ces prérequis conseillés font partie du cours commun de Modélisation (ST2) et du cours de SPI de Mécanique et milieux continus. Le reste des compétences nécessaires s'appuie sur une capitalisation des connaissances de CPGE et l'autoformation.

Modules contexte et enjeux :

L'introduction de la séquence s'organise autour de trois demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire les enjeux des différents secteurs du spatial et de l'aéronautique. Différentes actions seront proposées, par exemple :

- Présentation de la séquence thématique et introduction aux enseignements d'intégration
- Conférences sur le secteur aéronautique civil et militaire : de la conception des avions de ligne jusqu'à l'exploitation et la gestion du trafic (exemples d'intervenants : Air France, Dassault aviation).
- Conférences sur les applications et les usages dans le spatial (exemple d'intervenants : CNES, Thalès Alinea Space)
- Conférence d'introduction au Droit des activités spatiales (intervenant : Institut du Droit de l'Espace et des Télécommunications, IDEST). Conférence d'introduction à la surveillance de l'espace (intervenant : ArianeGroup). Conférence sur l'économie dans le spatial (intervenant : CNES).
- Conférence concernant le développement durable dans l'aéronautique et le spatial (exemples d'intervenants : Safran, Parrot, ESA).

Cours spécifique (60 HEE) :

Performances et trajectoires de vol

Brève description : Le cours spécifique de la séquence a pour objectifs de :

- Modéliser le comportement d'un engin en vol dans le cadre de la mécanique des corps rigides,
- Décrire la dynamique des véhicules dans le cas de vols dans et hors de l'atmosphère (trajectoire, modes propres, instabilités),
- Choisir et déployer des stratégies de contrôle et pilotage.

Il est organisé en deux temps. Premièrement, en s'appuyant sur le cours de mécanique proposé en première année, la mécanique de corps rigides est introduite pour donner les outils nécessaires à la construction de modèles d'avion, de lanceur, satellites, drone... Pour cela, deux cours permettront de donner les notions de base en mécanique du vol et en mécanique spatiale. Dans un deuxième temps, le cours décrira la dynamique et les stratégies de contrôle d'un avion, d'un satellite et d'un lanceur. Ces trois phases de cours feront intervenir plusieurs acteurs des secteurs de l'aéronautique et du spatial. Les séances permettent de comprendre les modèles utilisés et les stratégies de contrôle à utiliser. Les étudiants prendront en main les outils de contrôle sur un système spécifique et pourront mettre en place une stratégie de pilotage dans une phase d'avant-projet lors de l'enseignement d'intégration.

Enseignement d'intégration :

Préambule : Les trois enseignements d'intégration sont construits de la même façon et couvrent les mêmes objectifs d'apprentissage. Il s'agit de partir d'un cahier des charges de performances pour un avion, un nanosatellite ou un lanceur et d'opérer des choix d'architecture et de pilotage pour assurer les performances attendues. Les objectifs communs sont donc :

- Comprendre les contraintes des systèmes volants, et les différents niveaux de modélisation du comportement dynamique
- Choisir les solutions techniques pertinentes pour le contrôle de trajectoire, de stabilité et d'orientation (capteurs/actionneurs...)
- Concevoir un système complet par modélisation, y compris des actionneurs et des capteurs, dimensionnement des actionneurs, génération d'énergie et capacité de calcul de CPU
- Implémentation d'une loi de commande optimale, avec prise en compte des aspects économiques
- Validation de la loi de commande sur un modèle réaliste

Enseignement d'intégration n°1 : Stratégie de contrôle d'un nanosatellite

- **Partenaire associé :** Thalès Alenia Space via le Centre spatial de CentraleSupélec
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** Cet enseignement d'intégration se fera en lien avec Thalès Alenia Space. L'objectif est de concevoir un nanosatellite (Cubesat). Pour une mission spécifique définie par un cahier de charges, les participants proposeront une orbite, choisiront les composants du satellite, concevront les modes d'opération et développeront une loi de commande.

Enseignement d'intégration n°2 : Définition et conception de mission d'un lanceur

- **Partenaire associé :** CNES Direction des Lanceurs
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** Cet enseignement d'intégration a pour objectif d'amener les élèves, au travers d'un projet de conception de lanceur spatial, à faire l'expérience d'une boucle de dimensionnement multi-disciplinaire. A cette fin, le projet est articulé en modules reflétant le déroulement d'une boucle de conception, des ingénieurs du CNES DLA (Direction des Lanceurs) accompagnant les élèves au cours de chacun de ces modules.

Enseignement d'intégration n°3 : Conception et pilotage d'un avion d'affaires

- **Partenaire associé :** Dassault Aviation
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** L'objectif de cet enseignement d'intégration est de faire découvrir les différentes étapes du processus de conception d'un avion d'affaires, à la fois d'un point de vue théorique et d'un point de vue pratique. L'étude s'intéressera à la conception de l'avion et amélioration de ses performances, au développement d'une loi de pilotage, et l'analyse de risque et certification associées à la solution développée.

2SC5110 – Performances et trajectoires de vol

Responsables : **Sihem Tebbani**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours spécifique de la séquence thématique 5 « Pilotage et contrôle de vol dans le transport aéronautique et spatial » permet d'acquérir les compétences et connaissances nécessaires pour la modélisation et commande d'un engin en vol (dans et hors de l'atmosphère) en vue d'améliorer les performances du système. Il est divisé en deux parties.

La première partie de ce cours est un tronc commun dont les objectifs sont d'apporter un socle commun de connaissances et de compétences nécessaires pour cette séquence thématique. Ce tronc commun est organisé en trois temps. Premièrement, en s'appuyant sur le cours de mécanique proposé en première année, la mécanique du solide est introduite pour donner les outils nécessaires à la construction de modèles d'avion, de lanceur, satellites, drone... Dans un deuxième temps, le cours décrira la dynamique et les stratégies de contrôle d'un avion. Enfin la mécanique spatiale est introduite pour donner les outils nécessaires à la description du mouvement, des perturbations et des manœuvres hors atmosphère.

La seconde partie du cours correspond aux cours d'introduction aux enseignements d'intégration. Dans cette partie, chaque partenaire industriel intervient auprès des élèves qui auront choisis son enseignement d'intégration. Les objectifs sont d'apporter de nouvelles connaissances et compétences nécessaires pour réussir la semaine d'intégration mais également de renforcer des notions vues dans le tronc commun de ce cours. Ces cours seront axés sur la conception et pilotage de trois systèmes : un avion, un lanceur et un satellite.

Plusieurs experts des secteurs aéronautique et spatial interviendront dans ce cours.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique

Plan détaillé du cours (contenu)

Tronc commun :

- **Mécanique générale :**

Cette partie du cours propose de donner les notions de base en mécanique du solide. Elle abordera les points suivants :

1. Mouvement de solide indéformable (éléments « succincts » de cinématique et de dynamique pour un solide indéformable, théorèmes fondamentaux de la dynamique pour un solide indéformable).
2. TD 1 : Mesure des paramètres d'inertie d'un microsatellite
3. Liaisons entre solides indéformables (composition des mouvements, efforts de liaison).
4. TD 2 : mouvement de Cubli
5. Actionneurs dans le domaine aérospatial (stabilité de la rotation autour d'un axe principal d'inertie, effet gyroscopique, application aux actionneurs gyroscopiques, roues de réaction).
6. TD 3 : attitude d'un satellite

- **Mécanique du vol :**

Cette partie du cours propose d'illustrer la notion de stabilité dynamique à travers l'étude de stabilité d'un avion en vol. L'objectif est d'identifier les mouvements induits par de petites perturbations autour d'un état d'équilibre et de déterminer l'amortissement ou l'amplification de ces mouvements en fonction des propriétés de l'avion. La partie en cours magistral donne tous les outils mathématiques de modélisation pour aborder l'étude de stabilisation. Il abordera les points suivants :

1. Définition des angles d'Euler
2. Formulation matricielle
3. Équations linéarisées dynamiques du mouvement
4. Résolution des équations linéarisées
5. Présentation de mouvements caractéristiques : phugoïde, oscillation d'incidence, roulis hollandais, roulis pur et spirale.

Les séances de TD serviront à mettre en pratique la démarche et à réaliser une étude de stabilité dynamique exhaustive.

- **Mécanique spatiale :**

L'objectif de cette partie est d'appréhender le mouvement libre d'un corps dans un champ gravitationnel, de concevoir des manœuvres orbitales permettant de mener à bien une mission donnée, et de modéliser l'influence de différentes perturbations orbitales sur le mouvement d'un corps. Il abordera les points suivants :

- Mouvement d'un corps dans un champ de pesanteur
- Notion d'orbite képlérienne. Cas des orbites elliptiques
- Perturbations orbitales
- Manœuvres orbitales

Cours électif (un au choix en fonction de l'enseignement d'intégration choisi)

Dans la deuxième partie, trois cours seront proposés, et correspondant à des cours d'introduction des enseignements d'intégration.

- **Pilotage d'un avion**

Ce cours a pour objectif de détailler la modélisation et pilotage d'un avion. Il abordera les points suivants :

- Présentation d'un cahier des charges pour les performances en vol d'un avion
- Modélisation des forces (dont poussée, portance et traînée)
- Coefficients et ratio pour l'étude des performances des trajectoires.

- **Pilotage d'un lanceur**

Le cours de pilotage des lanceurs vise à aborder les fondamentaux du contrôle d'attitude d'un lanceur, en phases propulsées et balistiques. Les exigences à respecter par la fonction pilotage ainsi que les perturbations physiques à gérer au cours du vol seront abordées. Des principes de synthèse de commande seront présentés, ainsi que des aspects relatifs aux actionneurs.

- **Pilotage d'un satellite**

Ce cours a pour objectif de détailler la modélisation et pilotage d'un satellite. Il abordera les points suivants :

- Architecture d'un système SCAO,
- Missions typiques, familles de SCAO, types d'orbites, couples perturbateurs,
- Capteurs et actionneurs pour un satellite
- Modes et algorithmes de contrôle, contribution du SCAO dans les trade-offs
- Cahier des charges pour un système de SCAO (stabilité, performances, robustesses, différents contrôleurs,
- Exemples d'application

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux et travaux dirigés.

Plusieurs exemples de systèmes aéronautiques et spatiaux réels seront présentés.

Pour le cours de mécanique générale, la pédagogie est de type classe inversée. Les cours sont sous forme de vidéos à étudier avant la séance en présentiel qui est une mise en pratique (via un TD).

Organisation de l'évaluation

Le cours spécifique sera évalué individuellement par un examen final d'une durée de 2H. Cette évaluation se fera par QCM.

Support de cours, bibliographie

- Techniques et technologies des véhicules spatiaux , CNES, Cépaduès Editions, 1998.
- Trajectoires spatiales , O. Zarrouati, Cépaduès Editions, 1987.
- Orbital Mechanics for Engineering Students, H. D. Curtis, Butterworth-Heinemann. 2013.
- Practical Methods for Aircraft and Rotorcraft Flight Control Design: An Optimization-Based Approach, Mark B. Tischler, Tom Berger, Christina M. Ivler, Mohammadreza H. Mansur, Kenny K. Cheung and Jonathan Y. Soong. ISBN: 978-1-62410-443-5.
- Advances In Aircraft Flight Control, M B Tischler, CRC Press, 28 jun. 1996.
- Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems Brian L. Stevens, Frank L. Lewis, Eric N. Johnson, John Wiley & Sons, 2 oct. 2015 - 768 pages
- Performance, Stability, Dynamics and Control of Airplanes, Third Edition 2015, Bandu N. Pamadi, ISBN: 978-1-62410-274-5.

Moyens

- Equipe enseignante : F. Gatti, E. Bourgeois, Ch. Betrancourt, intervenant du CNES, TAS et Dassault Aviation, S. Tebbani (coordination)
- Taille des TD : 35 élèves
- Outils logiciels : Matlab

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les objectifs sont d'acquérir les connaissances et compétences pour :

- Modéliser le comportement d'un engin en vol dans le cadre de la mécanique du solide, de la mécanique du vol et de la mécanique spatiale.
- Décrire la dynamique des véhicules dans le cas de vols dans et hors de l'atmosphère (trajectoire, modes propres, instabilités).
- Choisir et déployer des stratégies de contrôle et pilotage.

Ce cours permettra également d'acquérir une vision globale des systèmes de pilotage pour les véhicules en vol et des exigences en termes de performance et des contraintes associées.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A l'issue du cours, les élèves auront une compréhension opérationnelle des outils de conception d'un véhicule en vol via l'acquisition :

1. Des notions de base en mécanique du solide, la mécanique du vol et la mécanique spatiale
2. D'une bonne connaissance des exigences et contraintes du système de pilotage de véhicule en vol
3. D'une bonne connaissance de différents systèmes et véhicules en vol (avion, drone, satellite, lanceur).

Ils seront capables de :

- Modéliser des véhicules dans le cas de vols dans et hors de l'atmosphère (trajectoire, modes propres, instabilités).
- Choisir et déployer des stratégies de contrôle et pilotage.
- Évaluer les performances du vol d'un véhicule en vol et proposer des solutions efficaces et économiques pour les améliorer.

Plus spécifiquement, les compétences validées sont :

- Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).
- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

L'évaluation de ces compétences est prise en compte dans l'évaluation des compétences de l'enseignement d'intégration

2SC5191 – Stratégie de contrôle d'un nanosatellite

Responsables : **Giorgio Valmorbida**

Département de rattachement : **DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement d'intégration se fera en lien avec Thalès Alenia Space. L'objectif est de concevoir un nanosatellite (Cubesat). Pour une mission spécifique définie par un cahier de charges les participants proposeront une orbite, choisiront les composants du satellite, concevront les modes d'opération et développeront une loi de commande.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours "Conception et pilotage d'un satellite: Systèmes de contrôle d'attitude et d'orbite" du cours spécifique "performances et trajectoires de vol".

Plan détaillé du cours (contenu)

Définition des méthodes pour le suivi et la validation du projet : construction de la matrice de traçabilité. Définition du scénario de la mission, définitions des modes possibles pendant la mission, sélection du type d'équipement. Allocation du budget de pointage. Sélection de l'orbite. Évaluation du couple perturbateur. Dimensionnement, sélection et aménagement des capteurs et actionneurs. Modélisation de la dynamique du système et simulation avec couples perturbateurs. Définition des budgets de pointage, de masse et de puissance. Rédaction de la note technique.

Déroulement, organisation du cours

L'EI se fera sous forme de travail en groupe, avec une répartition des sous-problèmes à traiter et tâches à réaliser. Chaque groupe devra proposer une solution pertinente au cahier des charges proposé, avec validation régulière de l'état d'avancement du projet et des solutions proposées.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sous la forme d'un livrable (rapport, logiciel et soutenance) par équipe de travail (5 élèves). Une note de contrôle continu sera également attribuée. Le contrôle continu se fera à partir des présentations courtes à la fin de chaque séance pendant laquelle les groupes présenteront les résultats de la journée.

Support de cours, bibliographie

Moyens

- Cahier des charges dans un format industriel
- Logiciels pour simulation de trajectoire et logiciel d'instrumentation de satellite.
- Encadrement par des Ingénieurs de Thalès Alenia Space et enseignants-chercheurs de CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les objectifs généraux sont :

- Comprendre les contraintes d'un NanoSatellite et les différents niveaux de modélisation et de son comportement dynamique
- Choisir l'orbite du satellite en fonction de sa mission
- Concevoir le satellite dans sa construction physique, avec le choix et dimensionnement d'actionneurs et capteurs et des générateurs d'énergie
- Concevoir le satellite dans ses aspects logiciel : proposition des modes d'opération, développement des modes d'opération et de lois de commande pour répondre aux cahiers de charges en termes de performance.

La validation de chaque étape se fera à l'aide des simulateurs : on utilisera les simulateurs d'orbite pour valider les choix des capteurs pour la mission et des simulateurs de systèmes dynamiques pour l'étude et validation des lois de commande proposées (GMAT, VTS Timeloop, Matlab/Simulink).

À la fin de ce module les participants auront acquis les connaissances sur les étapes de la conception d'un satellite, sur les choix d'orbite, le choix de matériel et architecture du satellite ainsi que le projet et validation de lois de commande.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).

- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (C4).
- Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

2SC5192 – Définition et conception de mission d'un lanceur

Responsables : **Sihem Tebbani**

Département de rattachement : **DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement d'intégration a pour objectif d'amener les élèves, au travers d'un projet de conception de lanceur spatial, à faire l'expérience d'une boucle de dimensionnement multi-disciplinaire. Il s'agit ainsi d'appréhender les interactions entre les différentes disciplines techniques impliquées, et de développer une logique de travail permettant d'assurer le bon déroulement des itérations associées.

Un autre enjeu est également d'appréhender les enjeux techniques propres à chaque discipline, et d'acquérir des méthodes de dimensionnement adaptées à une boucle préliminaire de conception.

A cette fin, le projet est articulé en modules reflétant le déroulement d'une boucle de conception, des ingénieurs du CNES DLA (Direction des Lanceurs) accompagnant les élèves au cours de chacun de ces modules. Ce projet comporte notamment un module "pilotage des lanceurs" mettant en œuvre l'enseignement académique délivré dans le cours spécifique "Performances et trajectoires de vol", et qui permettra aux élèves d'apprécier dans quelle mesure l'élaboration de la fonction pilotage est en lien étroit avec les besoins de la mission, les enjeux physiques associés, et les performances du lanceur spatial.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours "Pilotage d'un lanceur" du cours spécifique "performances et trajectoires de vol".

Plan détaillé du cours (contenu)

Cet enseignement d'intégration s'articulera autour des modules suivants :

- Analyse de mission – étagement
- Trajectoire
- Propulsion liquide
- Propulsion solide
- Aérodynamique et charges mécaniques
- Dimensionnement de structures
- Pilotage des lanceurs

Chaque module fera l'objet d'une séance (une demi-journée par module) dédiée au cours de laquelle les élèves, répartis en binôme, devront concevoir et consolider un projet de lanceur spatial répondant à un cahier des charges spécifique.

Déroulement, organisation du cours

Les intervenants CNES DLA encadreront ces travaux au travers d'un ensemble de questions posées aux élèves visant à les amener à faire des choix de conception, tout en s'assurant de la bonne compréhension des enjeux (techniques, programmatiques) et des problèmes physiques afférents. Des outils analytiques et numériques devront être mis en œuvre par les élèves afin de répondre aux problèmes soulevés. Les hypothèses et données considérées devront être questionnées afin notamment de bien appréhender les enjeux d'une boucle de conception multi-disciplinaire ; ces éléments amèneront notamment les élèves à devoir itérer sur leurs choix de conception afin d'obtenir des solutions techniques pertinentes.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sous la forme d'un livrable (rapport final, notes d'état d'avancement du projet à l'issue de chaque module).

Support de cours, bibliographie

- Enoncé (format papier) structurant les développements à mener par les étudiants.
- Outils de dimensionnement préliminaires simplifiés (sous WINDOWS 10).

Moyens

1. Cahier des charges et énoncé structurant les développements à mener par les élèves.
2. Outils informatiques de dimensionnement préliminaires simplifié
3. Encadrement : Ingénieurs du CNES Direction des Lanceurs.
4. Travail en binôme.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet, les élèves auront une compréhension opérationnelle des outils de conception d'un lanceur via l'acquisition :

- D'une bonne connaissance des exigences et contraintes pour la conception d'un lanceur
- D'une bonne connaissance de différents systèmes constituant un lanceur
- D'appréhender les interactions entre les différentes disciplines techniques impliquée dans la conception d'un lanceur et les enjeux associés
-

Ils seront capables de :

- Modéliser la trajectoire d'un lanceur et mettre en œuvre des méthodes de dimensionnement de lanceur
- Choisir et déployer des stratégies de pilotage d'un lanceur
- Évaluer les performances du vol du lanceur et proposer des solutions efficaces et économiques pour les améliorer.
- Savoir répondre aux exigences de la boucle de conception multi-disciplinaire d'un lanceur

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).
- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (C4).
- Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

2SC5193 – Conception et pilotage d'un avion d'affaire

Responsables : **Christopher Betrancourt**

Département de rattachement : **DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est de faire découvrir les différentes étapes du processus de conception d'un avion, à la fois d'un point de vue théorique et d'un point de vue pratique. Les méthodes types utilisées dans les bureaux d'étude seront présentées puis appliquées à la conception d'un avion choisi par l'étudiant.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Avoir suivi le cours électif « Pilotage d'un avion » du cours spécifique « Performances et trajectoires de vol ».

Plan détaillé du cours (contenu)

Lorsqu'une équipe s'engage à dessiner un nouvel avion ou à modifier un avion existant, elle le fait toujours suivant le même schéma. Le processus commence par une analyse des produits existants. Viennent ensuite les phases d'étude conceptuelle, d'étude préliminaire et d'étude de détail. Les plans de réalisation sont ensuite envoyés à l'atelier qui réalise le prototype. Plusieurs itérations sont bien sûr nécessaires à chaque étape avant de passer à l'étape suivante. Le cours commence par une approche du design plus ou moins globale ou synthétique avant d'entrer plus avant dans les détails. Nous irons du concept de base jusqu'à l'optimisation complète, en commençant par utiliser des paramètres issus de données statistiques simples pour aller progressivement vers l'utilisation d'algorithmes sophistiqués.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera lors de la dernière journée de cours. Elle consistera dans un premier temps à une présentation orale de 5 minutes pour présenter le projet suivi par une séance de questions/réponses.

Moyens

Enseignant : partenaire industriel.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les étudiants apprennent dans ce cours à :

- Définir la configuration générale du nouvel appareil.
- Estimer le poids à vide et le poids maximal au décollage.
- Evaluer les performances aérodynamiques de l'appareil.

- Estimer les performances (décollage, montée, croisière, atterrissage).
- Analyser la stabilité et le contrôle sur les 3 axes de l'appareil.
- Estimer les coûts (design, production, opérations).

Il est à préciser que les concepts généraux présentés dans ce cours s'appliquent non seulement à la conception des avions, mais aussi à la conception et au développement de nombreux autres produits ou services.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques (C1).

- Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers (C2).
- Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients (C4).
- Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique (C6).
- Savoir convaincre (C7).

ST5- COMMANDE DE BIOPROCEDES POUR L'ENVIRONNEMENT ET LES BIOFABRICATIONS

Dominante : VSE (Vivant-Santé-Environnement) et GSI (Grands Systèmes en Interaction)

Langage : Français

Campus : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Le développement soutenable tient une place grandissante dans la consolidation et l'évolution des différents secteurs industriels. Des solutions de modernisation et de transformation des moyens de production sont à l'étude afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre, notamment en proposant des alternatives aux énergies fossiles. Parmi les solutions étudiées, cette séquence thématique s'intéresse aux bioprocédés, performants et respectueux de l'environnement, comme technologie de substitution.

Les bioprocédés sont l'un des piliers de la transition vers une économie soutenable. Leur développement, basé sur l'utilisation de systèmes vivants ou de leurs constituants pour la production des biens et des services, requiert la mise en œuvre de connaissances pluridisciplinaires, notamment pour l'optimisation de leur fonctionnement, à savoir la maximisation de la productivité et/ou de la dégradation de polluants.

Cette séquence thématique se propose de donner des éléments de réponse pour la mise au point de bioprocédés à travers la conception de systèmes automatiques pour répondre aux problématiques de :

- Énergie (ex. production de biocarburants),
- Traitement de pollutions (ex. traitement des eaux usées),
- Contrôle de gaz à effets serre (ex. captage de CO₂),
- Production de molécules à haute valeur ajoutée (ex. production de médicaments, cosmétiques).

Dans cet enseignement, le dimensionnement de bioprocédés est abordé ainsi que la conception de systèmes automatisés pour maintenir le bioprocédé dans des conditions opératoires optimales afin de maximiser sa productivité. La démarche peut s'étendre à d'autres applications de bioprocédés non traitées dans la ST dans le secteur des biotechnologies (par exemple la culture de cellules souches pour des applications médicales). Les concepts présentés peuvent également être appliqués à des secteurs d'application élargie, tels que pharmaceutique, génie génétique, cosmétique, agroalimentaire, etc.

L'intervention d'industriels du secteur permet de mieux comprendre les enjeux associés à l'utilisation et optimisation des bioprocédés dans un contexte de développement soutenable.

Prérequis conseillés

Non obligatoires mais fortement conseillés : Thermodynamique, Sciences des transferts.

Module contexte et enjeux

Cette partie s'organise autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence thématique, les enseignements d'intégration et à introduire les enjeux associés aux bioprocédés en lien avec développement soutenable. Les activités suivantes sont proposées :

- Conférence d'introduction aux biotechnologies, donnant un aperçu de l'évolution des biotechnologies et des besoins actuels et futurs de ce secteur.
- Conférence sur le lien entre les biotechnologies et le développement soutenable.
- Conférence sur les applications énergétiques portant sur l'intérêt et le rôle des bioprocédés dans la production et le stockage de biocarburants, ainsi que des enjeux associés.
- Conférence sur les applications environnementales, évoquant différentes problématiques (raréfaction des ressources, la pollution et entre les risques sanitaires, etc.) et mettant en évidence l'intérêt et le rôle des bioprocédés dans la valorisation des déchets et la conversion de la biomasse en produits à valeur ajoutée.
-
- Conférence sur la bioéthique, montrant que l'utilisation des bioprocédés fait ressurgir des questions sur l'éthique des solutions proposées, par exemple lorsque ces solutions font appel à la conception d'organismes dont le génome est modifié. Cette conférence est une introduction aux

questionnements liés à l'utilisation du vivant et, plus généralement, à la place de l'Homme dans la biosphère et au respect de la nature et de l'environnement.

Cours spécifique (60 HEE)

Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrications ; Chemical Engineering : application to environment and biomanufacturing.

Brève description : Le Génie des Procédés moderne consiste à concevoir, mettre en œuvre et optimiser des procédés, destinés à l'élaboration de produits et services variés dans de nombreux secteurs industriels et de l'environnement (pharmacie, chimie fine, agroalimentaire, cosmétique, traitement de l'eau et des déchets, matériaux, biotechnologies, etc.) ainsi qu'à la production d'énergies traditionnelles, décarbonées et renouvelables.

Ce cours est une introduction au Génie des Procédés et des Bioprocédés et à ses méthodologies. Les fondamentaux enseignés permettent aux élèves d'acquérir des outils généralistes, transposables aisément à de multiples domaines.

Les bioprocédés connaissent un fort déploiement et constituent un outil de choix dans la stratégie de développement soutenable, pour deux raisons : (i) l'emploi du vivant grâce aux fonctionnalités métaboliques pour transformer la matière et épurer des systèmes pollués, et (ii) l'emploi de biomasse renouvelable en remplacement de ressources fossiles. Il n'en demeure pas moins que certaines technologies associées doivent encore être optimisées et/ou intensifiées, afin de réduire leur impact environnemental et énergétique. Les défis sont multiples et incluent : réduction de coûts, de risques et de déchets, minimisation de la consommation en énergie et en matières premières.

Ce cours s'appuie sur des études de cas concrètes (simplifiées afin de les rendre accessibles), pour permettre aux étudiants d'appliquer et de s'approprier les fondamentaux du cours, tout en s'intéressant à des procédés orientés vers le développement soutenable.

Le bioprocédé est étudié à l'échelle du bioréacteur. La description et compréhension détaillées des processus biologiques (métabolisme, maintenance, etc.) à l'échelle de la cellule ne sont pas abordées. Les agents biologiques sont donc considérés comme des catalyseurs cellulaires transformant des matières premières en des produits selon de lois cinétiques fournies, dont l'application ne nécessite aucun prérequis en biologie.

Enseignement d'intégration : Les trois enseignements d'intégration couvrent les mêmes objectifs d'apprentissage et possèdent une structure similaire. Il s'agit de partir d'un cahier des charges de performances pour un bioprocédé donné, d'effectuer des choix conception du bioprocédé et de loi de commande pour assurer les performances attendues et pour maximiser la productivité du système ainsi conçu.

Enseignement d'intégration n°1 : Traitement biologique optimisé des eaux résiduaires urbaines

- **Partenaire associé :** VEOLIA
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** Dans les stations de traitement des eaux résiduaires urbaines, les procédés biologiques sont destinés à l'élimination de la pollution carbonée et azotée, sous l'action de microorganismes qui se développent de manière spontanée en milieu aérobie ou anaérobie.
 - Les polluants éliminés sont concentrés sous forme de suspensions aqueuses de biomasse ou boues, constituant des déchets volumineux avec des matières fermentescibles et toxiques. Le traitement des boues constitue donc une phase importante des systèmes d'épuration devant assurer la réduction de leur volume et des nuisances olfactives. Un des procédés les plus répandus pour ce traitement est la digestion anaérobie, laquelle produit des liquides à forte concentration en azote qui doivent être à nouveau traités. La quantité d'azote contenue dans ces effluents peut représenter jusqu'à 20% d'augmentation de la charge d'azote à éliminer par la station. Deux solutions s'offrent à cette problématique : (1) une dite classique, dans lequel ces effluents concentrés sont directement renvoyés en tête de station ou (2) le procédé d'oxydation anaérobie d'ammonium, ou Anammox, une alternative innovante aux procédés de nitrification/dénitrification traditionnels, permettant la transformation directe de nitrite et d'ammonium en diazote gazeux.
 - L'objectif de cet EI est de proposer des stratégies de contrôle pour les deux solutions mentionnées afin de respecter les exigences épuratoires minimales des eaux traitées et de comparer leur performance en matière de coûts d'exploitation et de production de biogaz comme vecteur de valorisation énergétique des boues

Enseignement d'intégration n°2 : Système de support de vie pour le spatial.

- **Partenaire associé** : Agence Spatiale Européenne (ESA)
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : L'ESA développe un système de support de vie biorégénératif permettant aux astronautes de vivre de façon autonome, sans ravitaillement de la Terre, lors de missions spatiales de longue durée. Cet enseignement d'intégration porte sur le bioprocédé qui permet de régénérer l'atmosphère de l'habitable. Il s'agit d'un photobioréacteur mettant en œuvre des microalgues qui consomment le CO₂, produisent O₂ et des compléments nutritifs.
- L'objectif est de modéliser et dimensionner le photobioréacteur pour 5 astronautes en autonomie totale pendant 1000 jours, assurer le contrôle de la production en O₂ via le transfert de lumière pour des critères de performance raisonnables. Ces critères sont en lien avec la fiabilité de fonctionnement, la sécurité et les risques pour l'équipage, le taux et l'efficacité du recyclage, les activités requises pour l'équipage, la consommation d'énergie, l'encombrement et la masse du système.

Enseignement d'intégration n°3 : *Supervision avancée d'un procédé pour la production de bio-plastique à partir d'effluents industriels*

- **Partenaire associé** : BioEnTech
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : La digestion anaérobie est un procédé naturel de dégradation de substances organiques par des micro-organismes (bactéries et archaea) en l'absence d'oxygène (conditions anaérobies). Ce procédé permet de récupérer une fraction de l'énergie contenue dans les déchets sous forme de biogaz, mélange de méthane et de CO₂. La généralisation de ces technologies permettrait de réduire considérablement la demande énergétique nécessaire pour traiter les déchets (10% de l'énergie utilisée sur la planète) mais pourrait à terme constituer une source d'énergie. Le procédé de digestion anaérobie est toutefois complexe, et implique plusieurs centaines d'espèces de microorganismes. Par ailleurs, il est instable, et des composés intermédiaire (acides gras volatils) peuvent, dans certaines conditions s'accumuler et conduire à l'arrêt total du réacteur. Pour éviter ce type d'accident, un suivi très précis et coûteux est nécessaire. L'objectif de l'EI est de proposer et développer des stratégies de supervision et de contrôle pour réduire le risque d'acidification du réacteur et pour optimiser la production d'énergie à partir des déchets.

2SC5210 – Génie des procédés : application à l'environnement et aux biofabrifications

Responsables : **Cristian-Felipe Puentes Mancipe**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le Génie des Procédés moderne consiste à concevoir, mettre en œuvre et optimiser des procédés, destinés à l'élaboration de produits et services variés dans de nombreux secteurs industriels et de l'environnement (pharmacie, chimie fine, agroalimentaire, cosmétique, traitement de l'eau et des déchets, matériaux, biotechnologies, etc.) ainsi qu'à la production d'énergies traditionnelles, décarbonées et renouvelables. Ce cours est une introduction au Génie des Procédés et des Bioprocédés et à ses méthodologies. Les fondamentaux enseignés permettent aux élèves d'acquérir des outils généralistes, transposables aisément à de multiples domaines.

Les bioprocédés connaissent un fort déploiement et constituent un outil de choix dans la stratégie de développement durable, pour deux raisons : (i) l'emploi du vivant grâce aux fonctionnalités métaboliques pour transformer la matière et épurer des systèmes pollués, et (ii) l'emploi de biomasse renouvelable en remplacement de ressources fossiles. Il n'en demeure pas moins que certaines technologies associées doivent encore être optimisées et/ou intensifiées, afin de réduire leur impact environnemental et énergétique. Les défis sont multiples et incluent : réduction de coûts, de risques et de déchets, minimisation de la consommation en énergie et en matières premières.

Ce cours s'appuie sur des études de cas concrètes (simplifiées afin de les rendre accessibles), pour permettre aux étudiants d'appliquer et de s'approprier les fondamentaux du cours, tout en s'intéressant à des procédés orientés vers le développement durable.

Le bioprocédé est étudié à l'échelle macroscopique du bioréacteur. La description et compréhension détaillées des processus biologiques (métabolisme, maintenance, etc.) à l'échelle de la cellule ne sont pas abordées. Les agents biologiques sont donc considérés comme des catalyseurs cellulaires transformant des matières premières en des produits selon des lois cinétiques fournies, dont l'application ne nécessite aucun prérequis en biologie.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Prérequis non obligatoires mais fortement conseillés : Thermodynamique, Sciences des transferts. Les études de cas traitées impliquent des réactions biochimiques ou chimiques. Pour autant, aucune connaissance préalable en biochimie ou biologie n'est requise.

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Introduction au génie des procédés ; Bilan matière
Étude de cas : Procédé de production de bioéthanol (conversion des matières premières renouvelables par biotechnologie industrielle)
2. Modèles de réacteur idéaux (parfaitement agité et piston)
Étude de cas : Dimensionnement de bassins de traitement biologique d'une station d'épuration des eaux usées urbaines (bioprocédé pour l'environnement)
3. Bilan énergie thermique

Étude de cas : Dimensionnement d'un bioréacteur pour la production de levure de boulanger en mode batch (production de biomasse par biotechnologie industrielle)

4. Équilibres liquide-vapeur, distillation simple

Exercice d'application : Distillation simple du mélange éthanol-eau (purification de biocarburant, alternative aux carburants fossiles)

5. Distillation multi-étagée

Étude de cas : Distillation multi-étagée de bioéthanol (purification de biocarburant, alternative aux carburants fossiles)

6. Transfert de Matière : Diffusion et Convection

Étude de cas : biofiltration réactive d'un effluent industriel (procédé pour l'environnement)

7. Transfert de Matière : technologie à contact permanent

Étude de cas : Traitement d'un effluent gazeux avec élimination d'un polluant (procédé pour l'environnement)

8. Contrôle continu.

Étude de cas : modélisation et simulation d'un bioprocédé de production de polymère (production de molécules à valeur ajoutée par biotechnologie industrielle)

Déroulement, organisation du cours

Le module est organisé en cours magistraux (10.5 h), pour introduire les connaissances et outils méthodologiques, et en TD (10.5 h) afin d'appliquer les acquis dans le cadre d'études de cas.

Organisation de l'évaluation

- Étude de cas noté en groupe : Solution d'une étude de cas de modélisation et simulation d'un bioprocédé. Rédaction d'un rapport écrit incluant le code informatique et une analyse des résultats (6h) (40 % de la note).
- Contrôle final individuel écrit, sur table : Questions de cours + étude de cas (2h) (60 % de la note).

Support de cours, bibliographie

- **Diaporamas**
- **Techniques de l'ingénieur :**
 - Charpentier J., Génie des procédés, développement durable et innovation – Enjeux et perspectives, 2013
 - Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Méthodologie, 2000
 - Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Isambert A., Transfert de matière – Distillation compartimentée idéale, 2001
 - Moulin J.P., Pareau D., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Autres opérations compartimentées, 2002
 - Buch A., Rakib M., Stambouli M., Transfert de matière – Cinétique du transfert de matière entre deux phases, 2008
 - Sun L.M., Thonneller J.Y., Perméation gazeuse, 2004
 - Vuillermans J., Réacteurs chimiques – Principes, 1994
 - Boulinguez B., Le Cloirec P., Purification de biogaz – Élimination des COV et des siloxanes, 2011
- **Ouvrages généraux :** Perry Chemical Engineer's Handbook, 8th edition, 2007, McGraw-Hill, New York
- **Ouvrages spécifiques :**
 - Génie des réacteurs et bioréacteurs
 - + Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 3A: Chemical and Biochemical Reactors and Reaction Engineering, 4th Edition, 2017, Elsevier, Oxford
 - + Fogler H.S., Elements of chemical reaction engineering, 5th Edition, 2016, Pearson Education, Englewood Cliffs
 - + Levenspiel O., Chemical Reaction Engineering, 3rd edition, 1999, John Wiley and Sons, New York
 - + Villadsen J., Nielsen J., Lidén G., Bioreaction Engineering Principles, 3rd Edition, 2011, Springer, New York
 - Transferts de chaleur et de matière
 - + Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt F., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition, 2011, John Wiley and Sons, New York
 - + Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Volume 1B: Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Application, 7th Edition, 2018, Elsevier, Oxford
 - + Cussler E.L., Diffusion Mass Transfer in Fluid systems, 3rd Edition, 2009, Cambridge University Press, Cambridge
 - + Treybal R., Mass Transfer Operations, 4th Edition, 1982, McGraw Hill, New York

Moyens

- Équipe enseignante : Cristian PUENTES, François PUEL - Enseignants-chercheurs du laboratoire LGPM
- Taille des TD : 30 à 35 étudiants
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaires : Excel, MATLAB (ou Python)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

- Lister les modes de transfert de matière,
- Identifier les différents modes de transfert de matière (diffusion / convection) à l'œuvre dans une configuration donnée et les éventuels couplages entre transferts de matière et thermique,
- Écrire les bilans de matière, en prenant en compte, si nécessaire, des cinétiques réactionnelles chimiques ou biochimiques,
- Simplifier un problème en apparence compliqué, où plusieurs phénomènes de transfert coexistent, en ne retenant que les modes de transfert significatifs (qui ont un impact),
- Traduire les phénomènes en équations en utilisant les bilans fondamentaux,
- Dimensionner des technologies de conversion chimique/biochimique et de séparation, sur la base de considérations thermodynamiques et cinétiques.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1.2 : Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes. Jalon 2.
- C1.3 : Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation. Jalon 2.

L'évaluation de ces compétences est prise en compte dans l'évaluation des compétences de l'enseignement d'intégration

2SC5291 – Traitement biologique optimisé des eaux résiduaires urbaines

Responsables : **Cristian-Felipe Puentes Mancipe**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Dans les stations de traitement des eaux résiduaires urbaines, les procédés biologiques sont destinés à l'élimination de la pollution carbonée et azotée, sous l'action de microorganismes qui se développent de manière spontanée en milieu aérobie ou anaérobie.

Les polluants éliminés sont concentrés sous forme de suspensions aqueuses ou de boues, constituant des déchets volumineux avec des matières fermentes cibles et toxiques. Le traitement des boues constitue donc une phase importante des systèmes d'épuration devant assurer la réduction de leur volume et des nuisances olfactives. Un des procédés les plus répandus pour ce traitement est la digestion anaérobie, laquelle produit des liquides à forte concentration en azote qui doivent être traités avant leur rejet en milieu naturel. La quantité d'azote contenue dans ces effluents peut représenter jusqu'à 20% d'augmentation de la charge d'azote à éliminer par la station. Deux solutions s'offrent à cette problématique : (1) une dite classique, dans lequel ces effluents concentrés sont directement renvoyés en tête de station ou (2) le procédé d'oxydation anaérobie d'ammonium, ou Anammox, une alternative innovante aux procédés de nitrification/dénitrification traditionnels, permettant la transformation directe de nitrite et d'ammonium en diazote gazeux.

L'objectif de cet EI est de proposer des stratégies de contrôle pour les deux solutions mentionnées afin de respecter les exigences épuratoires minimales des eaux traitées et de comparer leur performance en matière de coûts d'exploitation et de production de biogaz comme vecteur de valorisation énergétique des boues.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction sur la pollution, les technologies de traitement des eaux et des boues résiduaires.
- Modélisation, analyse de stabilité et commande de la filière principale à boues activées
- Simulation du procédé conventionnel à débit d'alimentation constant et variable. Compréhension du fonctionnement des procédés unitaires, impact des paramètres opératoires sur la composition de l'effluent, dynamique des populations microbiennes.
- Simulation du procédé Anammox à débit d'alimentation constant et variable. Compréhension du fonctionnement des procédés unitaires, impact des paramètres opératoires sur la composition de l'effluent, dynamique des populations microbiennes.
- Régulation PID des deux procédés afin de respecter le cahier de charges de dépollution imposé. Ajustement des paramètres des régulateurs PID par une méthode empirique d'identification essai-erreur. Evaluation de la qualité des régulations (erreur statique, temps de réponse, dépassement, absorption des perturbations).

- Comparaison des deux procédés, sur la base des coûts d'exploitation (apport supplémentaire de carbone et consommation d'électricité pour les besoins en aération), production de boues et production de biogaz par digestion anaérobie.

Déroulement, organisation du cours

L'équipe pédagogique et l'industrielle réaliseront une première séance d'introduction à la problématique. Une présentation sur l'approche de modélisation des ouvrages de traitement d'eau sera proposée avec un focus sur les réacteurs de traitement biologique. Ensuite, les étudiants seront répartis en équipes. Toutes les équipes travailleront sur le même cahier de charges, afin qu'ils puissent traiter les aspects génie des procédés et automatique de l'enseignement. Des articles scientifiques et de la documentation technique sera mise à disposition des élèves pour approfondissement des notions traitées. Des procédures écrites sur l'utilisation des logiciels SUMO et MATLAB/SIMULINK (pour construction et paramétrage des simulations, identification des paramètres PID, construction de modèles SIMULINK à l'aide de S-fonctions) seront également fournies. Finalement, chaque équipe fera une proposition de contrôle-commande PID au partenaire, comportant la comparaison et l'analyse critique des deux filières.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se base sur : un rapport écrit, une présentation orale et un contrôle continu avec des échanges courts avec le partenaire industriel.

Support de cours, bibliographie

Supports pdf de l'équipe enseignante et du partenaire industriel

Techniques de l'ingénieur :

- BOEGLIN J.C., Traitement biologique des eaux résiduaires, Techniques de l'Ingénieur, J3942 V1, Décembre 1998.
- BOEGLIN J.C., Traitements et dispositions finales de boues résiduaires, Techniques de l'Ingénieur, J3944 V1, Septembre 2000.
- GAÏD A., Traitement des eaux résiduaires, Techniques de l'Ingénieur, C5220 V1, Février 2008.
- SPERANDIO M., HERAN M., GUILLOT S., Modélisation biologique des procédés biologiques de traitement des eaux, Techniques de l'Ingénieur, W6500 V1, Août 2007.

Ouvrages de références en automatique de bioréacteurs :

- Bastin G., Dochain D., On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors, Elsevier, 1990.
- D. Dochain (éditeur). Automatic Control of Bioprocesses, Wiley-ISTE, 2008.

Références sur la théorie de contrôle-commande :

- R. Bourdais, A. Chaillet, J. L. Collette, G. Duc, D. Dumur, E. Godoy, M. Makarova, C. Maniu, H. Siguerdidjane, S. Tebbani, and C. Vlad. Commande des Systèmes Dynamiques Gif sur Yvette, France. CentraleSupélec, 2022.
- H. L. Hazen. Theory of servo-mechanisms in: J. Franklin Inst. 218.3 (1934), 279–331 doi: 10.1016/S0016-0032(34)90254-4.
- N. Minorsky. Directional stability of automatically steered bodies in: J. Amer. Soc. Naval Engrg. 34.2 (1922), 280–309 doi: 10.1111/j.1559-3584.1922.tb04958.x.

Articles procédés Anammox :

- NSENGA KUMWIMBA M., LOTTI T., SENEL E., LI X., SUANON F. Anammox-based processes: How far have we come and what work remains? A review by bibliometric analysis, Chemosphere 238 (2020) 1-17.
- VAN DER STAR W.R.L., ABMA W.R., BLOMMERS D., MULDER J.W., TOKUTOMI T., STROUS M., PICIOREANU C., VAN LOOSDRECHT M.C.M., Startup of reactor for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam, Water Research 41 (2007) 4149–4163.
- TAO C., HAMOUDA M.A., Steady-state modeling and evaluation of partial nitrification-anammox (PNA) for moving bed biofilm reactor and integrated fixed-film activated sludge processes treating municipal wastewater, Journal of Water Process Engineering 31 (2019) 1-9.
- LACKNER S., GILBERT E.M., VLAEMINCK S.E., JOSS A., HORN H., VAN LOOSDRECHT M.C.M., Full-scale partial nitritation/anammox experiences – An application survey, Water Research 55 (2014) 292-303.
- BIASE A., KOWALSKI M.S., DEVLIN T.R., OLESZKIEWICZ J.A., Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review, Journal of Environmental Management 247 (2019) 849–866.

– VEUILLET F., LACROIX S., BAUSSEYRON A., GONIDEC E., OCHOA J., CHRISTENSSON M., LEMAIRE R.
Integrated fixed-film activated sludge ANITATMMox process – a new perspective for advanced nitrogen removal,
Water Science and Technology 69.5 (2014), 915-922.

Moyens

- Outils logiciels : SUMO - simulateur commercial des procédés conventionnel et Anammox (filère principale et secondaire) , MATLAB/SIMULINK - outil pour simulation et commande de la filère principale des procédés
- Documentation décrivant les procédés unitaires de traitement (eaux résiduaires et boues)
- Encadrement :
 - Enseignants : Cristian Puentes (enseignant-chercheur, CS, LGPM), Sette Diop (chercheur, L2S), Giovany Rubio (PhD student, CS, LGPM)
 - Partenaire industriel : Adèle Lazuka et Domingo Fernandez (VEOLIA)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Simuler une station d'épuration d'eaux résiduaires urbaines avec traitement des effluents secondaires ou boues.
- Comprendre le fonctionnement du procédé Anammox comme alternative au traitement traditionnel de la pollution azotée.
- Concevoir des boucles de régulation pour maintenir le système à des conditions souhaitées de fonctionnement (exigences réglementaires sur la concentration d'azote et carbone).
- Déterminer et analyser de manière critique la meilleure solution au traitement des effluents à forte concentration en ammoniacale en matière de coûts d'exploitation et de valorisation énergétique des boues.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C.1.1 Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.
Jalon 1 : Analyser les aspects scientifiques du comportement global d'un système à envergure limitée (par exemple partie isolée d'un système complexe), incluant l'identification des facteurs qui influencent son comportement
- C.2.3 Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires
Jalon 2 : Assimiler les nouvelles connaissances au sein d'outils ou méthodes opérationnels et efficaces pour le problème donné
- C.4.2 Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions. Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles
Jalon 1 : Définir et présenter une ou des solutions qui répondent au besoin (re)formulé en qualifiant et quantifiant la valeur créée
- C.6.1 Résoudre numériquement un problème
Jalon 1 : formaliser un problème, appliquer des techniques algorithmiques classiques en utilisant une structure de données appropriée, développer un esprit critique pour évaluer la qualité de différentes solutions algorithmiques en fonction de leur champ d'application.
- C.7.1 Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)
Jalon 2 : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).
- C.7.2 Sur la relation à l'autre : Comprendre de façon évolutive les besoins et attentes de ses interlocuteurs. Susciter des interactions, être pédagogue et créer un climat de confiance.
Jalon 2 : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution (maîtrise du sujet des interlocuteurs, valeurs, engagements, disponibilité, attention, etc.).

2SC5292 – Système de support de vie pour le spatial

Responsables : **Hervé Duval**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'enseignement Système de support de vie pour le spatial est l'un des 3 Enseignements d'Intégration (EI) qui concluent la Séquence Thématique n°5 (ST5) Commande de bioprocédés pour l'environnement et les biofabrifications.

L'Agence spatiale Européenne (ESA) développe un système de support de vie biorégénératif permettant aux astronautes de vivre de façon autonome, sans ravitaillement de la Terre, lors de missions spatiales de longue durée. Cet enseignement d'intégration porte sur le bioprocédé qui permet de régénérer l'atmosphère de l'habitable. Il s'agit d'un photobioréacteur mettant en œuvre des microalgues qui consomment le CO₂, produisent O₂ et des compléments nutritifs.

L'objectif est de modéliser et dimensionner le photobioréacteur pour 5 astronautes en autonomie totale pendant 1000 jours, assurer le contrôle de la production en O₂ via le transfert de lumière pour des critères ALISSE raisonnables (en lien avec la fiabilité de fonctionnement, la sécurité et les risques pour l'équipage, le taux et l'efficacité du recyclage, les activités requises pour l'équipage, la consommation d'énergie, l'encombrement et la masse du système).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique.

Plan détaillé du cours (contenu)

- Suivi de culture de microalgues et caractérisation de la cinétique de croissance
- Prédimensionnement du photobioréacteur
- Modélisation multi-physique du photobioréacteur
- Implémentation du modèle sur Simulink
- Implémentation du couplage physique entre le photobioréacteur et l'habitable
- Stratégie de commande du photobioréacteur
- Implémentation de régulation sur Simulink
- Tests de robustesse
- Optimisation du dimensionnement et de la régulation

Déroulement, organisation du cours

Cette activité pédagogique est de type Problem solving. Elle permet de se confronter au caractère multiphysique des bioprocédés, en mettant en œuvre les concepts introduits dans le cours spécifique de génie des procédés et dans le cours commun d'automatique.

L'enseignement est programmé sur une semaine "bloquée". Il commence par une demi-journée de lancement de projet. Pendant la semaine, les étudiants travaillent par groupes de 4, encadrés par une équipe d'enseignants-chercheurs des laboratoires LGPM (génie des procédés) et L2S (automatique). Chaque groupe aborde les différentes facettes de la démarche de modélisation et de contrôle d'un bioprocédé et se familiarise avec la culture cellulaire dans le cadre de travaux pratiques.

Des points d'avancement seront réalisés quotidiennement : mise en commun des informations, apport méthodologique, compléments de cours. La semaine se termine par une séance de restitution l'après-midi du dernier jour devant des ingénieurs de l'ESA.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation prendra en compte : l'assiduité individuelle, l'implication du groupe, la pertinence du modèle multiphysique, la stratégie de contrôle-commande, le dimensionnement optimal proposé, la présentation orale, le rapport.

Support de cours, bibliographie

Diapositives des différentes présentations, articles scientifiques et techniques seront fournis lors du cours.

Moyens

Equipe enseignante : H. Duval (PR, CS, Département MEP, LGPM), S. Tebbani (PR, CS, Département MEP, L2S), B. Taidi (PR, CS, Département MEP, LGPM)

Taille de l'effectif : 30

Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab Simulink (30)

Salles de TP (département et capacité d'accueil) : salle de culture cellulaire (LGPM)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue du cours, les étudiants seront capables de :

- Dimensionner un bioréacteur ;
- Établir un modèle multiphysique en agrégeant des connaissances provenant de champs disciplinaires différents (biologie, génie des procédés, science des transferts) ;
- Établir une stratégie de commande de bioréacteur ;
- Avoir un regard critique sur un modèle et tester sa robustesse ;
- Déterminer expérimentalement la vitesse de prolifération d'une souche de microorganismes ;
- Présenter de façon structurée et argumentée une démarche complète d'automatique intégrant modélisation, observation et contrôle-commande.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1. Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2. Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C4. Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6. Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7. Savoir convaincre

2SC5293 – Supervision avancée d'un procédé pour la production de bio-plastique à partir d'effluents industriels

Responsables : **Julien Colin**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les cyanobactéries sont des bactéries photosynthétiques qui ont joué un rôle fondamental dans l'apparition de la vie sur terre : elles sont majoritairement à l'origine de la production de l'oxygène nécessaire à la vie (il y a environ 2,45 milliards d'années). Ces mêmes micro-organismes peuvent être aujourd'hui utilisés dans des photobioréacteurs à l'échelle industrielle pour en extraire divers produits d'intérêt, tels que des compléments alimentaires ou des polymères biosourcés (bio-plastiques). Ces procédés permettent en outre de valoriser et d'épurer des effluents industriels, liquides et gazeux. L'un des bio-plastiques pouvant être produit par les cyanobactéries est le polyhydroxybutyrate (PHB), un polymère renouvelable, biodégradable et non toxique, ayant des caractéristiques compatibles avec les applications médicales, notamment pour la production de sutures internes. Il s'agit donc d'un matériau à haute valeur ajoutée, ce qui favorise les développements industriels. Il n'en demeure pas moins que la soutenabilité économique de cette production est délicate, en raison d'un coût de production élevé.

En effet, la conduite de ce bio-procédé est complexe et instable, par exemple en matière de contrôle de l'apport lumineux. Il existe une plage d'intensité lumineuse favorisant la croissance des micro-organismes et la productivité de PHB, encadrée par des plages dominées respectivement par une photo-inhibition et un auto-ombrage des cyanobactéries. Et les bornes de ces plages dépendent fortement de la concentration en micro-organismes, elle-même variable au cours du temps. Le couplage de l'ensemble des phénomènes explique la complexité du contrôle des tels bio-procédés. Ainsi, ils sont usuellement conduits avec des paramètres de fonctionnement fixes et robustes, qui permettent certes d'éviter les phénomènes d'inhibition mais sont loin d'être optimaux à chaque étape de la culture.

L'objectif de l'EI est de proposer et développer des stratégies de supervision et de contrôle du bio-procédé pour optimiser la production de PHB à partir des d'effluents industriels tout en maîtrisant les risques d'inhibition.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Il n'y a pas de prérequis spécifique.

Plan détaillé du cours (contenu)

Les étudiants devront tout d'abord comprendre un modèle de photobioréacteur (raceway) qui sera fourni et écrire un code de simulation. Celui-ci doit permettre de simuler la croissance des cyanobactéries dans diverses conditions, par exemple en fonction de l'intensité lumineuse incidente. Le simulateur, basé sur un modèle simple, sera ensuite utilisé pour les besoins de la mise en œuvre des lois de commande et d'estimation. Dans un second temps, les étudiants devront développer des observateurs pour évaluer certains paramètres physiques et chimiques du bioréacteur, qui sont inaccessible vis-à-vis de la mesure directe.

Enfin, les étudiants utiliseront les modèles pour développer des stratégies de commande. Différentes approches seront mises en œuvre (par exemple PID, commande par retour d'état).

Au final, un superviseur sera proposé en associant un (ou des) observateur(s) à une loi de commande. Les performances des différents superviseurs seront comparées pour différents scénarii de fonctionnement du réacteur.

Déroulement, organisation du cours

Les étudiants seront répartis en groupe. Le projet sera réalisé en organisant le travail en interne de chaque groupe afin d'aborder les différentes thématiques du cahier des charges.

Des outils analytiques et numériques devront être mis en œuvre par les élèves afin de répondre aux problèmes soulevés.

Les hypothèses et données considérées devront être questionnées ; ces éléments amèneront notamment les élèves à devoir itérer sur leurs choix de conception afin d'obtenir des solutions pertinentes.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera à partir d'un contrôle continu, rapport et d'une évaluation orale.

Support de cours, bibliographie

- Kinetic modelling of starch and lipid formation during mixotrophic, nutrient-limited microalgal growth, Gonzalo M. Figueroa-Torres, Jon K. Pittman, Constantinos Theodoropoulos, Bioresource Technology, Volume 241, 2017
- Production of lipid-based fuels and chemicals from microalgae : An integrated experimental and model-based optimization study, M. Bekirogullari, I.S. Fragkopoulos, J.K. Pittman, C. Theodoropoulos, Algal Research, Volume 23, 2017
- Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel production, Olivier Bernard, Journal of Process Control, Volume 21, 2011
- Modelling neutral lipid production by the microalga *Isochrysis aff. galbana* under nitrogen limitation, Francis Mairet, Olivier Bernard, Pierre Masci, Thomas Lacour, Antoine Sciandra, Bioresource Technology, Volume 102, 2011
- Modelling of microalgal growth and lipid production in *Dunaliella tertiolecta* using nitrogen-phosphorus-potassium fertilizer medium in sintered disk chromatographic glass bubble column, Anup Kumar, Chandan, G. Chitres, Arunangshu Chakraborty, A.K. Pathak, Bioresource Technology, Volume 218, 2016
- Oxy-fuel combustion characteristics and kinetics of microalgae *Chlorella vulgaris* by thermogravimetric analysis, Chunxiang Chen, Ziguang Lu, Xiaoqian Ma, Jun Long, Yuning Peng, Likun Hu, Quan Lu, Bioresource Technology, Volume 144, 2013

Moyens

- État de l'art et documentation décrivant le bioprocédé.
- Encadrement : chercheurs de l'INRIA (Sophia-Antipolis), Enseignants-chercheurs de l'École.
- Travail en groupe.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de cet enseignement, les élèves seront capables de :

- Modéliser un bioprocédé de culture d'un micro-organisme pour des applications économique et environnementale
- Concevoir des capteurs logiciels pour reconstruire les variables non disponibles en temps réel
- Concevoir des lois de commande pour maintenir le système à des conditions souhaitées de fonctionnement, afin de maximiser la productivité du bioprocédé
- Analyser la solution proposée (y compris analyse économique et empreinte écologique) et être critique vis-à-vis des résultats obtenus.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C.1.1 Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc. (Jalon 1)

C.1.2 Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes. (Jalon 2)

C.2.3 Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires. (Jalon 2)

C.4.2 Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions.

Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles. (Jalon 2)

C.6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C.7.1 Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée). (Jalon2)

C.7.2 Sur la relation à l'autre : Comprendre de façon évolutive les besoins et attentes de ses interlocuteurs. Susciter des interactions, être pédagogue et créer un climat de confiance. (Jalon 2)

ST5- VEHICULE AUTONOME ET CONNECTE

Dominante : SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)

Language: Français

Campus: Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Le véhicule autonome et connecté représente une avancée technologique majeure dans le domaine du transport. Grâce à l'intégration de technologies telles que l'intelligence artificielle, les capteurs de haute précision (lidars, radars, caméras, GNSS, etc.), ainsi que la connectivité à haut débit et en temps réel, ce système est conçu pour se déplacer sans intervention humaine. La modélisation de l'environnement et la gestion des décisions en temps réel reposent sur des algorithmes avancés de gestion et de fusion de données, en lien avec une connectivité permanente avec son environnement (infrastructures, autres véhicules, cloud). Cette révolution technologique soulève des enjeux majeurs. Sur le plan technique, garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes embarqués constitue un défi crucial. En effet, il est essentiel que ces systèmes soient capables de réagir de manière fiable dans des conditions variées, tout en minimisant les risques d'erreurs. Sur le plan éthique et réglementaire, des questions sensibles se posent concernant la protection des données personnelles collectées par les véhicules et la responsabilité en cas d'accident. L'impact économique est également considérable, avec une redéfinition du marché automobile, l'émergence de nouveaux acteurs et des transformations dans les modèles d'affaires. Par ailleurs, d'un point de vue environnemental, les véhicules autonomes doivent contribuer à une mobilité plus durable, en réduisant les émissions polluantes et en optimisant des flux de transport. L'optimisation des trajets et la gestion dynamique des véhicules peuvent en effet avoir un impact significatif sur la réduction des embouteillages et des consommations d'énergie. Face à ces défis multiples, l'ingénieur joue un rôle clé. Il doit concevoir, tester et valider des systèmes complexes garantissant à la fois performance, sécurité et conformité réglementaire. Ces compétences techniques, éthiques et réglementaires sont essentielles pour le succès de cette technologie.

Cette séquence thématique apportera aux élèves des compétences multidisciplinaires nécessaires à la conception d'un véhicule autonome. Tout d'abord, ils bénéficieront d'une sensibilisation au contexte global et aux enjeux technologiques, éthiques, réglementaires et environnementaux. Ils prendront ainsi conscience des défis que ces technologies posent à la société. Ensuite, un volet spécifique du cours les formera aux méthodes de développement, aux architectures électriques et électroniques, ainsi qu'aux technologies clés actuellement utilisées dans l'industrie. Une autre partie du programme se concentrera sur la préparation des élèves à l'implémentation qu'ils réaliseront lors de la semaine d'intégration. Dans ce cadre, ils y acquerront des compétences pratiques sur des briques technologiques nécessaires à la mise en œuvre d'un système autonome dans un contexte à échelle réduite. Enfin, l'enseignement d'intégration, basé sur un cahier des charges précis et d'une plateforme physique composée de robots roulants motorisés et équipés de divers capteurs, consistera à élaborer une stratégie et à développer une solution fonctionnelle. Cette approche permettra aux élèves de tester et de valider leurs acquis dans un environnement concret, tout en renforçant leur autonomie dans la gestion de projets complexes.

Prérequis conseillés

Il est conseillé d'avoir suivi le cours de SPI de Systèmes Électroniques et le cours de SPI de Réseaux et Sécurité.

Module contexte et enjeux : Une conférence introductive, présentée par Renault, offre un état de l'art et un panorama de la situation actuelle du véhicule autonome connecté face à ses principaux enjeux. Elle est suivie d'une table ronde réunissant divers acteurs du secteur, qu'il s'agisse d'opérateurs, d'équipementiers, de constructeurs automobiles ou encore d'opérateurs de mobilité, afin de croiser les points de vue et d'éclairer les défis à relever. D'autres conférences viennent compléter cet apport en approfondissant les enjeux technologiques et les futurs usages du véhicule autonome, offrant ainsi une vision globale et prospective du domaine.

Cours spécifique (60 HEE) : Architecture et technologie du véhicule autonome

- **Brève description :**

Une première partie du cours s'attache à définir un système de mobilité pour le véhicule autonome, en mettant tout d'abord l'accent sur son architecture fonctionnelle (perception, compréhension/décision, communication, actionnement, propulsion et conversion d'énergie). Le cours se concentre ensuite sur l'architecture électrique et électronique du véhicule, abordant le réseau d'alimentation, les calculateurs, les bus de communication et les capteurs embarqués. Une attention particulière est portée aux contraintes physiques et environnementales qui influencent l'électronique embarquée, ainsi qu'aux enjeux de sûreté de fonctionnement, traitement en temps réel et consommation énergétique. Une partie de ces concepts est approfondie au travers d'un atelier en petits groupes, basé sur l'étude de cas d'un véhicule autonome de niveau 4. Par ailleurs, le cours aborde les méthodes de développement et de validation des systèmes de conduite autonome et d'aide à la conduite (AD/ADAS), reposant sur le cycle en V, la simulation et des techniques avancées de vérification et de validation.

Une deuxième partie est consacrée aux traitements embarqués. Elle couvre les lois de contrôle spécifiques aux véhicules autonomes. Parallèlement, les techniques d'intelligence artificielle appliquées au véhicule autonome sont explorées, notamment l'apprentissage supervisé et les approches connexionnistes. Cette partie intègre plusieurs séances de travaux pratiques. Une première séance est dédiée à l'étude et à l'implémentation d'une loi de commande pour le parking automatique. Une deuxième séance permet d'explorer les techniques fondamentales de traitement d'image, essentielles à la perception du véhicule. Une troisième séance s'intéresse aux algorithmes de deep learning appliqués à l'environnement automobile. Enfin, les élèves bénéficient d'une formation spécifique à la génération automatique de code à partir de modèles, permettant un prototypage rapide sur cartes électroniques et facilitant la transition entre conception théorique et implémentation sur système embarqué.

Une troisième partie est consacrée aux technologies de communication véhiculaires, avec une analyse comparative des différents moyens de communication existants. L'accent est mis sur l'évaluation des performances des réseaux de communication dédiés aux véhicules, incluant l'étude du bilan de liaison pour évaluer la couverture, ainsi qu'une analyse approfondie des mécanismes d'accès au canal tels que Aloha, Slotted-Aloha et CSMA/CA. Cette partie intègre également une séance de travaux pratiques, au cours de laquelle les élèves pourront simuler et expérimenter les concepts étudiés.

Enseignement d'intégration : Conception d'un système de livraison urbaine "dernier kilomètre" par véhicules autonomes et connectés

- Partenaires associés : Renault, Mathworks
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** Les enjeux du véhicule autonome et connecté ne concernent pas uniquement le secteur de l'automobile. L'enseignement d'intégration proposé ici vous permet d'appréhender d'une part la démarche de conception d'un système complexe et critique, et d'autre part la pluralité des problématiques du véhicule autonome et connecté, au travers d'un scénario industriel dans un contexte adapté. Le scénario retenu est celui d'une livraison dite "dernier kilomètre". Le coût et le délai de livraison d'un colis par transporteur est fortement impacté par le dernier kilomètre, notamment en milieu urbain. En raison des embouteillages et du stationnement, les camions de livraison pourraient avantageusement être relayés à l'entrée des grandes villes par des moyens de transport plus légers et adaptés à l'environnement urbain. L'utilisation de vélos s'avère trop coûteuse ; les transporteurs envisagent à court terme une livraison entièrement automatisée sur le dernier kilomètre. La solution consiste en la gestion d'une flotte de robots autonomes et connectés effectuant les trajets de livraison en fonction des arrivages, des adresses de livraison et des caractéristiques des robots. Vous travaillez dans une équipe en charge de concevoir un tel système de livraison. Dans ce cadre, vous suivez une démarche d'ingénierie système orientée modèle pour spécifier les fonctionnalités du système. Vous adoptez une méthodologie de modélisation pour développer les algorithmes nécessaires (contrôle/commande, fusion de capteurs, fusion de données, prise de décision et télécommunications) pour répondre aux spécifications. Une plateforme de test à échelle réduite vous permet d'évaluer la qualité du système de livraison obtenu et perfectionner les algorithmes.

2SC5310 – Architecture et technologie du véhicule autonome

Responsables : **Caroline Lelandais Perrault**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTISME**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le véhicule autonome et connecté représente une avancée technologique majeure dans le domaine du transport. Grâce à l'intégration de technologies telles que l'intelligence artificielle, les capteurs de haute précision (lidars, radars, caméras, GNSS, etc.), ainsi que la connectivité à haut débit et en temps réel, ce système est conçu pour se déplacer sans intervention humaine. La modélisation de l'environnement et la gestion des décisions en temps réel reposent sur des algorithmes avancés de gestion et de fusion de données, en lien avec une connectivité permanente avec son environnement (infrastructures, autres véhicules, cloud). Cette révolution technologique soulève des enjeux majeurs. Sur le plan technique, garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes embarqués constitue un défi crucial. En effet, il est essentiel que ces systèmes soient capables de réagir de manière fiable dans des conditions variées, tout en minimisant les risques d'erreurs. Sur le plan éthique et réglementaire, des questions sensibles se posent concernant la protection des données personnelles collectées par les véhicules et la responsabilité en cas d'accident. L'impact économique est également considérable, avec une redéfinition du marché automobile, l'émergence de nouveaux acteurs et des transformations dans les modèles d'affaires. Par ailleurs, d'un point de vue environnemental, les véhicules autonomes doivent contribuer à une mobilité plus durable, en réduisant les émissions polluantes et en optimisant des flux de transport. L'optimisation des trajets et la gestion dynamique des véhicules peuvent en effet avoir un impact significatif sur la réduction des embouteillages et des consommations d'énergie. Face à ces défis multiples, l'ingénieur joue un rôle clé. Il doit concevoir, tester et valider des systèmes complexes garantissant à la fois performance, sécurité et conformité réglementaire. Ces compétences techniques, éthiques et réglementaires sont essentielles pour le succès de cette technologie.

Cette séquence thématique apportera aux élèves des compétences multidisciplinaires nécessaires à la conception d'un véhicule autonome. Tout d'abord, ils bénéficieront d'une sensibilisation au contexte global et aux enjeux technologiques, éthiques, réglementaires et environnementaux. Ils prendront ainsi conscience des défis que ces technologies posent à la société. Ensuite, un volet spécifique du cours les formera aux méthodes de développement, aux architectures électriques et électroniques, ainsi qu'aux technologies clés actuellement utilisées dans l'industrie. Une autre partie du programme se concentrera sur la préparation des élèves à l'implémentation qu'ils réaliseront lors de la semaine d'intégration. Dans ce cadre, ils y acquerront des compétences pratiques sur des briques technologiques nécessaires à la mise en œuvre d'un système autonome dans un contexte à échelle réduite. Enfin, l'enseignement d'intégration, basé sur un cahier des charges précis et d'une plateforme physique composée de robots roulants motorisés et équipés de divers capteurs, consistera à élaborer une stratégie et à développer une solution fonctionnelle. Cette approche permettra aux élèves de tester et de valider leurs acquis dans un environnement concret, tout en renforçant leur autonomie dans la gestion de projets complexes.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Pour suivre cette séquence thématique, il est recommandé d'avoir suivi un des cours de sciences pour l'ingénieur Systèmes Electroniques (deux occurrences en SG1 et deux occurrences en SG3) et un des cours de sciences pour l'ingénieur de Réseaux et Sécurité (une occurrence en SG1 et deux occurrences en SG3). Le cours de Modélisation donné en ST2 est également un prérequis.

Plan détaillé du cours (contenu)

I Système de mobilité et électronique embarquée

- Définition du système de mobilité (infrastructure/ véhicule) et architecture du véhicule autonome et connecté (perception, traitement, communication, actionnement mais aussi propulsion et conversion d'énergie).
- Processus de développement des AD/ADAS
- Architecture électrique et électronique du véhicule (réseau d'alimentation, calculateurs, bus de communications).
- Spécificités « hardware » en électronique automobile (environnement physico-chimique, CEM, fiabilité, procédé de fabrication des cartes, sûreté de fonctionnement)

II Algorithmes et traitement embarqués

- Traitement d'images
- Développement embarqué sur cartes
- Lois de contrôle pour le véhicule autonome (LQR, filtrage de Kalman, réseaux de neurones, logique floue...)
- Intelligence artificielle pour véhicules autonomes

III Communication du véhicule avec son environnement

- Technologies V2X
- Accès au canal, trafic et performances

Remarque : ce plan ne reflète pas systématiquement la chronologie du cours

Déroulement, organisation du cours

Ce cours est constitué pour moitié de cours magistraux et pour moitié de travaux pratiques

Organisation de l'évaluation

L'examen final du cours spécifique est un examen écrit de deux heures. La compétence C1 est validée si la note obtenue, combinant l'examen écrit et les travaux pratiques notés, est supérieure à 10. La compétence C6 est validée si toutes les formations sur les outils numériques, réalisées en autonomie, sont validées.

Moyens

Les cours seront enseignés par des professeurs de CentraleSupélec et par des industriels experts exerçant pour des constructeurs automobiles ou pour des acteurs de l'électronique automobile.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de comprendre l'architecture électrique et électronique d'un véhicule autonome et connecté, les contraintes physiques auxquelles le véhicule doit faire face, les technologies de communication entre le véhicule et son environnement et la méthodologie de développement de tels systèmes. Il sera capable de modéliser et simuler des fonctions du véhicule autonome et connecté dans un contexte simplifié, en particulier au niveau des fonctions de perception, de contrôle et de communication. Il sera capable d'implémenter et tester un algorithme de détection sur un système physique de cartes électroniques.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

L'évaluation de ces compétences est prise en compte dans l'évaluation des compétences de l'enseignement d'intégration

2SC5390 – Conception d'un système de livraison urbaine "dernier kilomètre" par véhicules autonomes et connectés

Responsables : **Morgan Roger, Erwan Libessart**

Département de rattachement : **DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les enjeux du véhicule autonome et connecté ne concernent pas uniquement le secteur de l'automobile. L'enseignement d'intégration proposé ici vous permet d'appréhender d'une part la démarche de conception d'un système complexe et critique, et d'autre part la pluralité des problématiques du véhicule autonome et connecté, au travers d'un scénario industriel dans un contexte adapté.

Le scénario retenu est celui d'une livraison dite "dernier kilomètre". Le coût et le délai de livraison d'un colis par transporteur est fortement impacté par le dernier kilomètre, notamment en milieu urbain. En raison des embouteillages et du stationnement, les camions de livraison pourraient avantageusement être relayés à l'entrée des grandes villes par des moyens de transport plus légers et adaptés à l'environnement urbain.

L'utilisation de vélos s'avère trop coûteuse ; les transporteurs envisagent à court terme une livraison entièrement automatisée sur le dernier kilomètre. La solution consiste en la gestion d'une flotte de robots autonomes et connectés effectuant les trajets de livraison en fonction des arrivages, des adresses de livraison et des caractéristiques des robots.

Vous travaillez dans une équipe en charge de concevoir un tel système de livraison. Dans ce cadre, vous suivez une démarche d'ingénierie système orientée modèle pour spécifier les fonctionnalités du système. Vous adoptez une méthodologie de modélisation pour développer les algorithmes nécessaires (contrôle/commande, fusion de capteurs, fusion de données, prise de décision et télécommunications) pour répondre aux spécifications. Une plateforme de test à échelle réduite vous permet d'évaluer la qualité du système de livraison obtenu et perfectionner les algorithmes.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours de sciences pour l'ingénieur 1A "Systèmes électroniques" conseillé

Cours de sciences pour l'ingénieur 1A "Réseaux et sécurité" conseillé

Cours spécifique de la ST "Architecture et technologies pour le véhicule intelligent et communicant"

Plan détaillé du cours (contenu)

Les aspects techniques suivants sont mis en œuvre dans cet enseignement d'intégration :

- Analyse fonctionnelle du besoin, spécifications système
- Modélisation système
- Machines d'état
- Loi de commande
- Télécommunications
- Protocole de communications
- Traitement d'image
- Fusion de capteurs
- Traitement embarqué et temps réel
- Répartition calculatoire hardware/software

Déroulement, organisation du cours

L'objectif est de réaliser une preuve de concept technique sur une plateforme à échelle réduite constituée de robots roulant sur un support adapté représentant schématiquement l'environnement urbain. Les équipes de 5 ou 6 étudiants sont constituées au préalable de façon à présenter un large spectre de compétences. Après une première analyse fonctionnelle du système basée sur un *brainstorming*, les équipes décident de leur organisation interne afin de traiter en parallèle et avec cohérence les différents aspects : matériel, modélisation, intelligence embarquée, connectivité. Chaque équipe se voit confier un robot et peut accéder aux salles de test afin de valider en situation réelle le comportement du système et affiner ses fonctionnalités. La dernière journée de la semaine est consacrée à la préparation de l'évaluation et à l'évaluation en elle-même.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation est faite par des points d'avancement réguliers avec l'équipe d'encadrement pendant la semaine (un par demi-journée), ainsi que lors d'une évaluation en fin de projet constituée d'une présentation orale décrivant les choix de conception et les innovations du système, et de démonstrations des performances obtenues à la fois en simulation et en situation réelle sur la plateforme de test, devant un panel d'enseignants et d'experts industriels.

Elle se base sur l'ensemble des critères suivants : maîtrise technique, conformité des résultats aux attentes, qualité de la communication, originalité du travail et sérieux du travail.

Moyens

Moyens humains : une équipe d'enseignants spécialistes des différents domaines d'ingénierie concernés (électronique, télécommunications, modélisation, traitement du signal) présents 100% du temps ; des experts industriels du domaine automobile (Renault) et de la modélisation (Mathworks) en visite pendant la semaine et présents pour l'évaluation.

Moyens logistiques : salles de travail pour les équipes d'étudiants, salles d'envergure pour les plateformes de test et d'évaluation, un QG enseignant.

Moyens matériels : robots roulants (incluant 4 roues motrices, une carte Arduino, un nano-ordinateur Raspberry Pi, une caméra et plusieurs autres capteurs embarqués, batteries).

Moyens logiciels : Matlab/Simulink, Linux, Python, C++, OpenCV, ...

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences suivantes seront évaluées lors de cet enseignement : C2, C4 et C7. L'évaluation de ces compétences sera basée à la fois sur les points d'avancement avec l'équipe d'encadrants (un par demi-journée), sur la démonstration des performances du système, et sur la soutenance finale.

ST5- L'ECO-QUARTIER, UN SYSTEME COMPLEXE. AMENAGEMENT DURABLE & MANAGEMENT DE PROJET COMPLEXE

Dominante : CVT (Construction, Ville, Transport) et GSI (Grands Systèmes en Interaction)

Langue d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

L'écoquartier est un cas intéressant de système complexe. Il nécessite une approche pluridisciplinaire en combinant l'immobilier et la construction, les mobilités (flux et infrastructures), les réseaux urbains, les problématiques de consommation des ressources naturelles (eaux, énergies, déchets) mais aussi la géographie, la sociologie et l'histoire des lieux et des gens. Il implique une mise en œuvre à des échelles variées depuis les décisions politiques nécessaires à son émergence et à sa réalisation, en passant par l'inscription géographique dans le territoire, jusqu'au choix des modes de chauffage et d'éclairage de chaque logement.

Le marché de l'aménagement est en pleine transformation, les aménageurs publics cèdent du terrain aux aménageurs privés qui émergent chez les différents promoteurs immobiliers.

La problématique d'ingénieur de ce sujet de séquence thématique est la suivante : comment aborder de front l'ensemble des études nécessaires à la fabrication d'un écoquartier afin de prendre un ensemble cohérent de décisions ?

Les différentes activités pédagogiques permettront aux étudiants d'acquérir différentes compétences techniques et managériales :

- Savoir concevoir ou transformer les systèmes complexes que sont les écoquartiers en intégrant les nombreuses parties prenantes ayant des rôles et intérêts différents, voire divergents,
- Prendre en compte des paramètres de développement durable pour garantir d'aller vers la notion d'écoquartier
- Savoir concevoir et planifier de grands projets complexes, qui peuvent être considérés comme de multiples projets interdépendants les uns des autres

Prérequis nécessaires

Niveau de français suffisant pour pouvoir lire et comprendre des textes / articles en français et suivre des cours délivrés en français sans traduction simultanée et sans support écrit

Modules contexte et enjeux : cette partie implique des acteurs majeurs du domaine qui partageront leur vision et leur feuille de route. Elle comporte la présentation du projet d'aménagement du plateau de Saclay par l'EPA Paris Saclay, la visite d'un projet d'aménagement réalisé / en cours de réalisation en Ile de France (et si possible à Paris).

Cours spécifique (60 HEE) : Aménagement et urbanisme durable

- Le cours spécifique permet d'aborder les principales disciplines qui constituent le projet urbain, et de préparer la réalisation des différents livrables du projet développé dans le cadre de l'EI.
- Disciplines : Initiation au jeu d'acteurs et à la chaîne de valeur de l'immobilier, ville durable, agriculture urbaine et péri-urbaine, enjeux de l'énergie, Grand Paris Express et mobilité, planification urbaine et référentiel écoquartier, coordination de décisions interdépendantes (scénario).
- Modalités pédagogiques : les cours disciplinaires sont le plus souvent organisés avec une séance de TD qui permet d'approfondir les concepts vus en cours, et de mettre en pratique des outils spécifiques à chaque discipline : cartographie, formalisation de scénarii, analyse territoriale.

Enseignement d'intégration : Projet de conception d'un écoquartier – le cas de Corbeville

- **Partenaire associé :** -
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay – visite de site obligatoire
- **Brève description :** Comment construire la ville ? La ville est constituée de différents ouvrages : les rues et les espaces publics, les réseaux urbains et l'énergie en particulier, les transports en commun et individuels, les immeubles et équipements... Des outils de management de projets complexes sont ici appliqués pour décortiquer le jeu d'acteurs qui permet la transformation de la ville et aborder de front l'ensemble des disciplines et des échelles de territoires permettant de réaliser ces grands projets.
 - La mise en situation correspond à un ou plusieurs scénario(s) imaginaire(s) modifiant de façon significative le scénario développé par l'EPA Paris Saclay à Corbeville. Un concours de maîtrise d'œuvre urbaine est lancé pour prendre en compte cette modification fondamentale.
 - Les objectifs pédagogiques sont les suivants :
 - Acquérir un premier ensemble de connaissances relatif aux champs sectoriels de la planification urbaine, du montage immobilier, des smart grids et autres réseaux urbains, des mobilités (intermodalité et infrastructures notamment).
 - Manipuler sur un cas concret les principaux concepts, méthodes et outils liés à un projet complexe d'aménagement et de construction durable. Le caractère générique et réutilisable à d'autres contextes sera également important.
 - Au terme de l'EI, les étudiant(e)s auront expérimenté les systèmes de décision propres aux projets d'aménagement urbain en ayant analysé les étapes clés de spécification, conception et planification de tels projets.
- **Livrables :** Diagnostic du territoire, modélisation et exploration d'alternatives, bilan économique de l'aménagement et de promotion immobilière, convergence de multiples décisions coordonnées, schématisation / représentation, scénarisation de situations d'usage, macro-plan.

2SC5410 – Aménagement et urbanisme durable

Responsables : **Franck MARLE, Frédérique Delmas-Jaubert**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le cours spécifique intitulé Aménagement et Urbanisme Durable – AMUD - apportera les connaissances de base relatives à la fabrique du territoire : diagnostic territorial dans les dimensions environnementales, sociales et économiques, analyse du jeu d'acteurs de la chaîne de valeur de l'aménagement et de la construction, référentiels de ville durable et construction durable, cadre réglementaire et administratif, gouvernance. Le cours s'efforce de mettre en évidence l'impact du changement climatique sur les territoires et sur la planification territoriale.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Niveau de français suffisant pour pouvoir lire et comprendre des textes / articles en français et suivre des cours délivrés en français sans traduction simultanée et sans support écrit

Plan détaillé du cours (contenu)

La planification territoriale à la française est pluridisciplinaire. Elle ménage l'intérêt général et les intérêts privés de la filière économique immobilière en produisant espaces publics de qualité et constructions variées, avec une grande attention aux services apportés, tant publics que privés.

Le changement climatique fait évoluer la notion de construction durable, le regard porté sur le sol et ses différentes épaisseurs, qui peuvent avoir d'autres vertus que de porter du développement immobilier. La notion de territoire pose aussi la question de l'indépendance et de l'autonomie énergétique, alimentaire, économique, et ses interactions avec ses voisins proches et lointains. Les flux vivants et logistiques, les transports s'infléchissent en conséquence du changement climatique.

Le cours aborde les points suivants :

- Le référentiel Ecoquartier, porté par le ministère de la Transition écologique
- La place de l'agriculture sur le plateau de Saclay et le rôle de l'association Terre et Cité
- Le sol et le vivant
- Les bilans économiques d'une opération d'aménagement et de promotion immobilière, mise en lumière du jeu d'acteurs
- Les transports, vecteur puissant d'aménagement du territoire et consommateur majeur d'énergie
- Management des systèmes complexes : des outils pour construire des scénarios comprenant des décisions interdépendantes
- Construction durable et architecture bioclimatique. Peut-on encore construire connaissant l'état des ressources ?
- L'énergie

Déroulement, organisation du cours

Cet enseignement comprend :

- Des cours magistraux, délivrés par des enseignants de l'école et des vacataires sur le campus de Gif
- Des cours in situ, dans le cadre de visites, sur les thématiques de morphologie urbaine, typologies des espaces publics, frontières entre espaces publics et espaces privés
- Des TD par classe de 25 pour approfondir un sujet

Organisation de l'évaluation

- Rédaction et soutenance en petit groupe d'un diagnostic territorial, en s'appuyant sur les séances de TD (noté sur 9 points)
- Examen final : exercices et rédaction, QCM (noté sur 11 points) durée de l'examen final : 2h

Support de cours, bibliographie

<http://www.modeleseconomiquesurbains.com/>

<https://www.iau-idf.fr/>

<https://www.apur.org/fr>

<https://www.societedugrandparis.fr/sgp>

<https://www.epaps.fr/>

<https://www.ibicity.fr/blog/>

Moyens

Les cours sont dispensés par des enseignants, architectes, urbanistes et ingénieurs.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Ce cours est une courte introduction aux enjeux urbains d'un écoquartier : il donne à réfléchir à la façon dont on décide d'un projet urbain et de ses conséquences à l'échelle territoriale. Il permet notamment de manipuler la notion de système complexe et décision multi-acteurs (compétence C1), de découvrir les disciplines hors des sciences de l'ingénieur qui sont utiles au projet urbain (C2), de collaborer pour réaliser un diagnostic élargi et reflétant plusieurs points de vue (C8).

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin du cours, l'élève sera capable de :

C1 : analyser un projet urbain dans sa globalité, décrire et analyser le jeu d'acteurs, caractériser les interactions internes et externes

C2 : bâtir et suivre une démarche scientifique et technique d'investigation pour le diagnostic territorial et la restituer sous forme de soutenance

C4 : formuler une hypothèse de création de valeur pour le territoire face au changement climatique

2SC5490 – Projet de conception d'un éco-quartier

Responsables : **Frédérique Delmas-Jaubert, Franck MARLE**

Département de rattachement : **DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'enseignement d'intégration a pour objet la conception préliminaire d'un écoquartier.

Les projets sont menés principalement en sous-groupes de 6 à 8 étudiants, et un projet "Ecoquartier" est un assemblage de plusieurs sous-groupes.

Chaque sous-groupe doit trouver des solutions pour satisfaire un certain nombre d'objectifs (relatifs au référentiel écoquartier) tout en garantissant la cohérence et la compatibilité avec les autres sous-groupes.

Certains objectifs sont à l'échelle du quartier et donc du groupe complet (forme urbaine, équilibre économique, etc.).

Différents livrables sont attendus au long de la semaine, au niveau individuel, des sous-groupes et du groupe entier.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours spécifique Aménagement et Urbanisme Durables de la ST5

Plan détaillé du cours (contenu)

(Sous réserve de confirmation du cas)

La ZAC de Corbeville : quel avenir à court, moyen et long terme pour l'espace autour de l'échangeur de la N118 sur le plateau du Moulon ? Un projet de ZAC a été soumis par l'EPAPS à enquête publique au printemps 2019. Pour les besoins du cas d'étude, nous modifierons un ou plusieurs paramètres majeurs des études déjà réalisées (orientation politique, solutions de mobilité, ambition de densité, ...) et il vous est demandé de reformuler une proposition complète en accord avec ces changements.

Données d'entrée :

- Photo aériennes historiques
- Cartes disponibles sur géoportail (notamment IGN avec topographie, cours d'eau, et bâti existant)
- Données insee disponibles en ligne
- Programme et plan guide EPAPS du quartier de Moulon

Déroulement, organisation du cours

Fonctionnement à base de sprints de 2 ou 3 1/2 journées.

Auto-organisation pendant le sprint, équipes interconnectées entre elles à l'intérieur du groupe, réunion de fin de sprint avec l'encadrant référent dédié au groupe.

Possibilité de recourir à des expertises spécifiques pendant certaines séances.

Livrables à rendre au fur et à mesure de l'EI (calendrier donné le 1er jour).

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu, basé sur les livrables des sous-groupes et du groupe. Un livrable individuel récapitulatif est également évalué.

Moyens

Encadrement et expertise par une équipe d'enseignants, architectes, urbanistes, ingénieurs, chercheurs, ...

Franck Marle, Frédérique Delmas, Ulisse Vizzardi, Arnaud Lafont, Louis Massonnet, Delphine Picard ...

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de l'enseignement d'intégration, les élèves auront progressé sur :

- La manipulation de connaissances techniques, sociales et économiques pour concevoir et valider un tel système.
- L'utilisation d'une approche trans-disciplinaire de la conception, notamment au niveau des prises de décision.
- Le travail en mode collaboratif multi-échelles pour arriver au résultat annoncé sur un projet d'une telle complexité.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

C2.3 Détecter et acquérir de manière autonome les nouvelles connaissances et savoir-faire nécessaires, dans son domaine d'ingénieur, pour le problème traité

C4.2 identifier l'impact des choix de conception sur les acteurs, après avoir soigneusement choisi ces acteurs

C7.1 Pendant l'EI, et dans les livrables finaux : Adapter le fond et son argumentation en fonction d'interlocuteurs ou de contextes élargis, « avoir du répondant » pour défendre sa solution

C7.2 pendant l'EI, se comporter de façon adéquate avec ses pairs et avec les encadrants, notamment pour susciter des échanges et des temps collectifs de travail et de décision

ST5- LUMIERE ET MATIERE: DEVELOPPEMENT D'INSTRUMENTS DE HAUTE TECHNOLOGIE

Dominante : PNT (Physique & NanoTechnologie)

Langue d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

La physique moderne trouve de nombreux débouchés à travers la maîtrise des propriétés de la matière et son ingénierie fonctionnelle. Dans cette ST il s'agira notamment de confronter les étudiants à la problématique d'innovation et développement produit lorsque celui-ci est un instrument de haute technologie mettant en œuvre la physique, développé en petit série pour la recherche ou la R&D. En particulier les étudiants répondront à :

- Comment qualifier et répondre à un besoin client dans ce contexte ?
- Quelle approche de conception, réalisation et évolution mettre en œuvre ?
- Comment concevoir une solution pour un client intermédiaire qui lui-même a des clients aux besoins variés ?

Les enseignements d'intégration concernent des dispositifs à la pointe de la physique nécessitant une réelle approche d'ingénierie puisque les concepts théoriques sont appliqués à des dispositifs réels qui doivent intégrer des éléments de faisabilité à la fois technique et économique.

Prérequis conseillés

Il est conseillé d'avoir suivi le cours de SPI de physique des Ondes ou de Sciences des transferts.

Modules contexte et enjeux : cette partie s'articule autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, les enseignements d'intégration et à introduire la thématique. Ainsi seront organisées les conférences/présentations suivantes :

- Présentation de la thématique et de ses enjeux
- Table-ronde métiers : C'est quoi un ingénieur physicien ?
- Visite d'une entreprise
- Présentation des EI

Cours spécifique (60 HEE) : Physique de la matière

Brève description : Le cours donnera aux élèves les connaissances de base de la physique de la matière à l'état solide. On y abordera la cristallographie et la diffraction des ondes (notamment rayons X), les vibrations du réseau (phonons, effets thermiques), les états électroniques (modèle de Sommerfeld, théorie des bandes), ainsi que des sujets spécifiques : les semi-conducteurs, les défauts, la supraconductivité. Le but est de montrer aux élèves que la compréhension et la maîtrise des propriétés des matériaux passe par des études à l'échelle microscopique.

Enseignement d'intégration n°1 : Synchrotron Beamline Design

- **Partenaire associé :** European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, Grenoble), synchrotron SOLEIL (Gif-sur-Yvette), synchrotron NSLS (Brookhaven, USA)
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** les objectifs visés sont les suivants :
 - Dimensionner un dispositif à l'aide de notions de physique (moderne) de base et en faire la modélisation fonctionnelle.
 - Identifier les transferts thermiques pertinents, les modéliser, et dimensionner ces systèmes.
 - Connaître les points clés d'une étude d'avant-projet dans un contexte multidisciplinaire

- Avoir des ordres de grandeurs réalistes sur les propriétés mécaniques et physiques standards des matériaux « courants ».
- Réaliser un avant-projet de conception des instruments scientifiques étudiés en justifiant les choix opérés.
- Travailler en équipe, connaître et pouvoir identifier les différents rôles des membres d'une équipe, animer, coordonner un groupe de travail, collecter et partager l'information, mettre en forme et exposer le travail réalisé (s'exprimer devant un auditoire / soutenance)

2SC5510 – Physique de la matière

Responsables : **Hichem Dammak**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif du cours est de permettre aux élèves d'acquérir les connaissances de base de la physique des solides. Il s'agira, en s'appuyant sur des exemples spécifiques dans des secteurs de pointe comme les nanosciences ou l'opto-électronique :

- De les initier à ce vaste et riche domaine de la physique
- De leur donner les outils qui leur permettront de se confronter avec aisance aux nombreux enjeux qu'ouvre ce domaine dans les applications de demain.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Physique Quantique

Physique Statistique

Electromagnétisme dans le vide

Plan détaillé du cours (contenu)

Plan du cours :

- L'ordre dans les solides : le réseau cristallin.
- Diffusion d'une onde électromagnétique par la matière – Diffraction.
- Métaux et conductivité : modèles de Drude et de Sommerfeld.
- Structure de bandes – Electrons dans les solides massifs et dans les nanomatériaux.
- Semiconducteurs – Puits quantiques : applications à l'opto-électronique.
- Jonction P-N (diode)
- Vibrations des solides – Phonons – Propriétés thermiques.

Déroulement, organisation du cours

Cours magistraux (13,5 heures), travaux dirigés (15 heures)

Organisation de l'évaluation

Contrôle final (CF) : Contrôle écrit (1h30) sans documents avec formulaire fourni.

Soit n le nombre du Quiz où la note est supérieure à celle du CF, et CC la note moyenne de ces Quiz.

Note Session 1 : $N1 = 0.12 \cdot n \cdot CC + (1 - n \cdot 0.12) \cdot CF$

Validation de la compétence C1 : Note brute à l'un des deux exercices indiqués du contrôle final est supérieure ou égale à 50%.

Validation de la compétence C2 : Note de la session 1 est supérieure ou égale à 50%.

Session 2 :

Contrôle écrit (2h) sans documents avec un formulaire fourni. Les notes du CC ne seront pas pris en compte.

Support de cours, bibliographie

Polycopié

Physique de l'état solide, Ashcroft et Mermin

Physique du l'état solide, Kittel

Moyens

Equipe enseignante : H. Dammak, B. Dkhil, J.M. Gillet, C. Milesi-Brault

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du cours les élèves sont censés savoir :

- 1) Déterminer le système cristallin et le réseau de Bravais d'un cristal et préciser la multiplicité de la maille choisie à partir de données géométriques d'un réseau d'atomes.
- 2) Exprimer les distances inter-réticulaires à l'aide des indices de Miller.
- 3) Appliquer la loi de Bragg pour interpréter les résultats d'une expérience de diffraction de rayonnement (X, neutron, électrons).
- 4) Identifier, parmi les courbes de relations de dispersion de phonons suivant une direction du réseau réciproque, les branches optiques, acoustique longitudinale et acoustique transversale ainsi que sa dégénérescence.
- 5) Appliquer le modèle des électrons libres pour déterminer les états électroniques dans un puits quantique en 1D ou 2D.
- 6) Appliquer le modèle des électrons libres pour calculer la densité des états électroniques et l'énergie de Fermi.
- 7) Appliquer le modèle des électrons libres pour déterminer la contribution des électrons à la chaleur spécifique.
- 8) Identifier, à partir des relations de dispersion d'énergie électronique, le caractère métallique, isolant ou semi-conducteur d'un cristal.
- 9) Déterminer la densité des porteurs dans un semi-conducteur intrinsèque ou dopé à partir d'un modèle des courbes de densités électroniques des bandes de valence et de conduction.
- 10) Décrire l'équilibre d'une jonction P-N (diode).
- 11) Déterminer la densité des états de phonons dans le modèle de Debye que ce soit en 1D, 2D ou 3D.
- 12) Calculer la contribution des phonons à la chaleur spécifique en utilisant le modèle de Debye.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 : Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes (acquis 5-9)

C1.3 : Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation (acquis 1-4,10-12)

C2.1 : Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique

L'évaluation de ces compétences est prise en compte dans l'évaluation des compétences de l'enseignement d'intégration

2SC5591 – Conception d'un faisceau Synchrotron

Responsables : **Pierre-Eymeric Janolin**

Département de rattachement : **DOMINANTE - PHYSIQUE ET NANOTECHNOLOGIES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours pluridisciplinaire est construit sur trois équipes d'une vingtaine d'élèves en charge de comprendre, concevoir et dimensionner les aspects physique, mécanique, thermique et matériaux des éléments technologiques clés d'une ligne de lumière synchrotron. L'utilisation d'outils de CAO est encouragée et une formation pourra être dispensée aux élèves qui ne seraient pas familiers avec ces outils.

Les équipes seront accompagnées par des experts travaillant dans des synchrotrons français et européen sous la forme d'entretiens par vidéoconférence ou sur site.

Une équipe concevra une ligne de lumière permettant de réaliser une angiographie sur un patient humain, une autre concevra une ligne de lumière permettant de détecter un isotope cancérogène du chrome dans des cellules ovariennes de grenouille et la troisième équipe concevra une ligne de lumière permettant de résilier de la diffraction du rayonnement synchrotron sur des panneaux solaires à base de pérovskites hybrides.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Connaissances de base en physique moderne et transferts thermiques. Notions de mécanique.

Plan détaillé du cours (contenu)

- Cristallographie, rayonnement d'une particule accélérée, fluorescence, absorption des rayonnements, diffusion, diffraction
- Transferts thermiques : convection, rayonnement, conduction, stationnaire et instationnaire, mécanique des fluides
- Conception Assistée par Ordinateur (CAO), maquette numérique, avant-projet de conception, prédimensionnement de systèmes mécaniques
- Choix des matériaux, propriétés mécaniques standards, résistance en milieu extrême, état de surface, méthodes d'élaboration et de mise en forme
- Travail en équipe dans le cadre d'une conduite de projet, animation de réunion, expression orale

Déroulement, organisation du cours

Les élèves travailleront en mode projet pendant la semaine réservée.

Les élèves inscrits à ce cours doivent être présents à la soutenance finale, qui se fait habituellement au synchrotron SOLEIL dont une visite est prévue.

Organisation de l'évaluation

45% travail de la semaine (évaluation des enseignants et des autres élèves de la ligne) et évaluation des compétences C1, C2, C4, C6

25% présentation (un membre du groupe présente et tous les membres du groupe ont la même note) et évaluation de la compétence C7

30% sur Executive Summaries (notes individuelles) et rapport final (note commune à toute la ligne), évaluation de la compétence C7

Support de cours, bibliographie

Ouvrages de référence et bases de données informatiques seront mises à disposition lors de la semaine.

Moyens

L'utilisation d'outils de CAO sera encouragée et pourra être valorisée lors de l'activité synchrotron :

- Les élèves ayant déjà des connaissances en CAO (SPACECLAIM, SOLIDWORKS ...) pourront utiliser un de ces outils comme support à leur démarche de conception et de modélisation. Une formation sera dispensée sur un logiciel avec une interface web sera proposée pour les élèves qui n'ont pas de telles connaissances.

Il est à noter que des moyens alternatifs à la CAO et tout aussi pertinents pourront être utilisés pour modéliser les systèmes étudiés (dessins, maquettes ...). Cela sera le cas notamment pour certains éléments des lignes considérées.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Dimensionner à l'aide de notions de physique (moderne) de base
- Identifier des transferts thermiques pertinents, modéliser, dimensionner des systèmes
- Connaître les points clés d'une étude d'avant-projet dans un contexte multidisciplinaire
- Ordres de grandeurs réalistes sur les propriétés mécaniques et physiques standards des matériaux « courants ».
- Travailler en équipe, connaître et pouvoir identifier les différents rôles des membres d'une équipe, animer, coordonner un groupe de travail, collecter et partager l'information, mettre en forme et exposer le travail réalisé (s'exprimer devant un auditoire / soutenance)

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

ST5- SYSTEMES MULTI-ENERGIES

Dominante : ENE (Energie) et GSI (Grands Systèmes en Interaction)

Langue d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Les objectifs de réduction de la consommation d'énergie et des émissions polluantes rendent nécessaire l'utilisation de systèmes énergétiques faisant appel à des sources dont les rendements et les caractéristiques sont complémentaires. Il en va ainsi des systèmes de production d'électricité où l'essor de la production renouvelable intermittente nécessite plus de flexibilité de la part des moyens de production classiques, et aussi du secteur des transports où les motorisations électrique et thermique se complètent avantageusement. Ces systèmes multi énergie requièrent des modes de commande avancés pour tirer parti de la complémentarité des sources d'énergies, et satisfaire les besoins des usagers et les contraintes économiques, techniques et environnementales.

Prérequis conseillés

Il est fortement conseillé d'avoir suivi au moins un des cours de SPI Sciences des Transferts ou Energie Electrique.

Modules contexte et enjeux : cette partie s'organise autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire les enjeux et verrous associés, en particulier sous les aspects économiques et liés à l'environnement social et géopolitique de la thématique.

Cours spécifique (60 HEE) : Conversion et régulation d'énergie

- **Brève description :** le cours se structure en deux parties :
 - Conversion d'énergie mécanique
 - Approche générale de la conversion d'énergie entre les formes mécanique, thermique et chimique ; éléments de thermodynamique, mécanique des fluides et combustion
 - Systèmes techniques : moteurs à piston, éolienne, turbine hydraulique, turbine à gaz
 - Conversion d'énergie électrique
 - Éléments d'introduction sur la production d'énergie électrique, le stockage d'énergie et les machines alternatives
 - Modélisation et régulation des systèmes DC/DC : exemple d'un système photovoltaïque/hacheur/batterie
 - Modélisation et régulation des systèmes DC/AC : exemple d'un système éolienne/onduleur/réseau

Enseignement d'intégration n°1 : Régulation et commande de systèmes de production et de conversion d'énergie

- **Partenaire associé :** EDF, GE Converteam
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** les objectifs visés sont :
 - Être capable de modéliser un système physique industriel pour un objectif de commande
 - Comprendre l'impact de la régulation d'une installation sur le fonctionnement global du système électrique
 - Faire la modélisation fonctionnelle pour déterminer la stratégie de commande d'un système
 - Être en mesure de développer une loi de commande satisfaisant le cahier des charges
 - Prendre en compte les spécificités des éléments de conversion pour les associer et créer un système

Enseignement d'intégration n°2 : Groupe motopropulseur hybride

- **Partenaire associé** : Valeo
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : les objectifs visés sont :
 - Mettre en œuvre un modèle systémique de la chaîne de traction hybride
 - Mettre en œuvre les outils de traitement numérique sous Matlab/Simulink
 - Mettre en œuvre une démarche de contrôle de l'ensemble de la chaîne hybride du conducteur aux roues
 - Introduction au dimensionnement sur cycle : complexité du système et contradiction de plusieurs objectifs à atteindre

Enseignement d'intégration n°3 : Propulsion aéronautique hybride

- **Partenaire associé** : Safran Tech
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : l'enseignement d'intégration traite de la gestion de la puissance dans le cadre d'un petit avion monomoteur doté d'une architecture énergétique hybride batteries/pile à combustible. L'avion est propulsé par une hélice alimentée par un moteur électrique et l'électricité est soit directement puisée dans des batteries soit générée par la combinaison de H_2 et O_2 dans une pile à combustible. Les objectifs sont les suivants :
 - Réaliser une partie puis assembler l'ensemble du modèle systémique de l'architecture énergétique de l'avion hybride considéré
 - Mettre en œuvre les outils de résolution numérique via Simulink et analyser les données recueillies
 - Elaborer la stratégie de régulation du système en fonction de contraintes données
 - Critiquer le modèle utilisé par rapport à l'état de l'art

2SC5610 – Conversion et régulation d'énergie

Responsables : **Antoine Renaud, Adrien Voldoire**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les objectifs de réduction de la consommation d'énergie et des émissions polluantes rendent nécessaire l'utilisation de systèmes énergétiques faisant appel à des sources dont les rendements et les caractéristiques sont complémentaires. Il en va ainsi des systèmes de production d'électricité où l'essor de la production renouvelable intermittente nécessite plus de flexibilité de la part des moyens de production classiques, et aussi du secteur des transports où les motorisations électrique et thermique se complètent avantageusement. Ces systèmes multi énergie requièrent des modes de commande avancés pour tirer parti de la complémentarité des sources d'énergies, et satisfaire les besoins des usagers et les contraintes économiques, techniques et environnementales.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Sciences des Transferts, Thermodynamique, Energie Electrique : cours de sciences pour l'ingénieur conseillés

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Conversion d'énergie mécanique

Approche générale de la conversion d'énergie entre les formes mécaniques, thermiques et chimique

Éléments de thermodynamique, de mécanique des fluides et de combustion

Systèmes techniques: moteurs à piston, éolienne, turbine hydraulique, turbine à gaz

2. Conversion d'énergie électrique

Éléments d'introduction sur la production d'énergie électrique, le stockage d'énergie et les machines alternatives

Modélisation et régulation des systèmes DC/DC : exemple d'un système photovoltaïque/hacheur/batterie

Modélisation et régulation des systèmes DC/AC : exemple d'un système éolienne/onduleur/réseau

Déroulement, organisation du cours

Conversion d'énergie thermique, séances 1 à 9

Conversion d'énergie électrique, séances 10 à 19

CM : Cours Magistral durée 3h

TD : Travaux Dirigés durée 1h30

Organisation de l'évaluation

Contrôle des connaissances de 2 heures à la fin du cours. (75%)

Compte-rendu de TP numérique sur la partie électrique (25%) qui est de l'évaluation obligatoire (EO)

Support de cours, bibliographie

Supports en ligne sur Edunao

Moyens

- Équipe enseignante : Antoine Renaud, Adrien Voldoire
- Taille des TD : 30
- TD en salle classique et salle informatique

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de ce cours, les élèves seront capables de

Avoir une vue d'ensemble des questions scientifiques liées à la conversion et à la régulation de l'énergie

Connaitre différents moyens de conversion entre énergie mécanique, thermique et chimique.

Identifier les atouts et contraintes de ces différents modes de production d'énergie ainsi que de proposer des premiers éléments de pré-dimensionnement.

Proposer une modélisation rapide des machines synchrones et des convertisseurs en vue de la régulation des systèmes électriques

Identifier quelques systèmes machines/convertisseurs pour des applications d'hybridation.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le cours spécifique n'évalue pas de compétences

2SC5691 – Régulation et commande de systèmes de production et de conversion d'énergie

Responsables : **Jing Dai**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet Enseignement d'Intégration "Production et conversion d'énergie" se propose d'aborder la régulation de diverses installations de production d'énergie électrique raccordées au réseau de distribution et de transport. Les systèmes d'étude proposés aux étudiants seront constitués par exemple (liste à affiner en fonction des sujets proposés) d'une installation de production hydroélectrique, d'une ferme éolienne, d'une cogénération, ou encore d'une installation de production photovoltaïque.

Le travail demandé comportera les étapes principales suivantes :

- Développement d'un modèle de l'installation de production d'énergie à partir de documents et données fournis
- Calcul d'une loi de commande pour l'installation en réponse à un cahier des charges adapté à la problématique particulière de l'installation de production considérée
- Validation en simulation des performances de régulation

Les travaux seront réalisés en partie en partenariat avec EDF, notamment le Centre d'Ingénierie Hydraulique situé au Bourget-du-Lac.

Selon les cas, il s'agira de reproduire en simulation le comportement observé sur l'installation, d'en améliorer le fonctionnement, ou bien d'investiguer une stratégie de commande innovante pour l'installation.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

- Commande des systèmes dynamiques (cours commun de séquence 5)
- Introduction à la production d'énergie (cours spécifique à la ST5 "Systèmes Multi-Energies")

Plan détaillé du cours (contenu)

Déroulé de l'Enseignement d'Intégration :

- Première demi-journée : présentation et répartition des sujets d'étude
- Demi-journées 2 à 8 : réalisation du projet
 - a. Prise en main de la problématique et des données fournies
 - b. Réalisation d'un simulateur non linéaire de l'installation en boucle ouverte
 - c. Détermination d'un modèle exploitable pour la commande
 - d. Calcul de la loi de commande en fonction du cahier des charges de l'installation considérée
 - e. Définition, si possible, d'une stratégie de commande innovante
 - f. Validation sur le simulateur non linéaire
 - g. Dernière demi-journée : restitution, présentation orale des résultats
- La demi-journée n°4 sera réalisée en autonomie par les étudiants

Déroulement, organisation du cours

Fonctionnement en mode projet par groupe de 4 ou 5 étudiants.
Encadrement par les enseignants de l'école.

Organisation de l'évaluation

Chaque groupe de 4 ou 5 étudiants devra fournir :

- Un simulateur complet du travail effectué, incluant un simulateur non linéaire du système, la loi de commande et les fichiers de validation ;
- Un rapport exposant l'approche proposée et en particulier le mode d'emploi pour utiliser le simulateur et les codes ;
- Une présentation orale de l'étude.

Support de cours, bibliographie

N. Gionfra, H. Siguerdidjane, G. Sandou, D. Faille, and P. Loevenbruck. Combined Feedback Linearization and MPC for Wind Turbine Power Tracking. 2016 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, International Conference on Control Applications, Buenos Aires, Argentina, September 19th-22nd, 2016.

Boubekeur Boukhezzar and Houria Siguerdidjane. Nonlinear Control of a Variable-Speed Wind Turbine Using a Two-Mass Model. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 1, Mars 2011.

Morten Hartvig Hansen and Lars Christian Henriksen. Basic DTU Wind Energy controller. DTU Wind Energy E-0018. January 2013.

Gérard Robert, Frédéric Michaud. Reduced Models for Grid Connected Hydro Power Plant Application to Generation Control. International Conference on Communications, Computing and Control Applications. 3-5 March 2011. Hammamet, Tunisia

Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 20, No. 4, July 2005

Rae-Young Kim, and Jih-Sheng Lai. Seamless Mode Transfer Maximum Power Point Tracking Controller For Thermoelectric Generator Applications. IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 23, no. 5, September 2008

Moyens

- Équipe d'enseignants du Département Automatique et du Département Energie ;
- Contacts avec des ingénieurs de recherche d'EDF ;
- Mise à disposition de documents et de données sur les installations de production d'énergie électrique ;
- Utilisation des PCs des étudiants

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce module, les étudiants seront capables de

- Modéliser un système physique industriel pour un objectif de commande ;
- Comprendre l'impact de la régulation d'une installation sur le fonctionnement global du système électrique
- Modéliser d'un point de vue fonctionnel le système afin d'en déterminer la stratégie de commande ;
- Développer une loi de commande satisfaisant un cahier des charges ;
- Prendre en compte les spécificités des unités de conversion d'énergie ;
- Valider le comportement d'un système régulé de production d'énergie électrique.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 - complexité : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes

Comprendre la problématique du contrôle d'un véhicule électrique et hybride

C2 - métier ingénieur : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier

Renforcer son expertise sur la commande des machines électriques et les conséquences énergétiques associées

C4 - création de valeur : avoir le sens de la création de valeur pour l'entreprise et ses clients

Échanger avec les encadrants, définir le problème et mettre en avant les solutions

C6 - digital : être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

Maîtrise de l'outil Matlab/Simulink pour répondre à la problématique attendue

C7 - convaincre : savoir convaincre

Prestation lors la soutenance et lors de la semaine

2SC5692 – Groupe motopropulseur hybride

Responsables : **Adrien Voldoire**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de cet EI est de proposer un modèle et une régulation d'une chaîne de traction hybride (électrique et thermique) pour véhicule routier.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Energie électrique (1A) : cours de sciences pour l'ingénieur conseillé

Cours spécifique sur la modélisation et la commande des systèmes électriques de la ST5

Plan détaillé du cours (contenu)

1. Présentation des différents éléments de la chaîne de traction hybride :

Introduction aux contraintes environnementales, économiques

Présentation des moyens pour augmenter le rendement global du groupe motopropulseur et la structure d'une chaîne de traction hybride

Présentation moteur thermique, structure de l'industrie automobile

Commande d'une machine synchrone, pour l'intégration dans un modèle système

2. Application et mise au point d'un modèle numérique :

Présentation du modèle système hybride sous Simulink :

Mise en place des différents du schéma bloc : modèle voiture, moteur thermique, boîte de vitesse, couplage moteur électrique, batteries.

Présentation d'une stratégie de gestion de flux sur cycle de consommation WLTP.

Déroulement, organisation du cours

Projet par groupe de 4 ou 5 étudiants

Organisation de l'évaluation

Soutenance finale et rapport

Support de cours, bibliographie

Supports donnés en cours et durant l'enseignement

Moyens

Modélisation sur Matlab/Simulink

Articles scientifiques

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Mettre en œuvre un modèle systémique de la chaîne de traction électrique puis une chaîne de traction hybride
- Mettre en œuvre les outils de traitement numérique sous Matlab/Simulink
- Mettre en œuvre une démarche de contrôle de l'ensemble de la chaîne de traction
- Introduction au dimensionnement sur cycle : complexité du système et contradiction de plusieurs objectifs à atteindre

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 - complexité : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes
Comprendre la problématique du contrôle d'un véhicule électrique et hybride

C2 - métier ingénieur : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier
Renforcer son expertise sur la commande des machines électriques et les conséquences énergétiques associées

C4 - création de valeur : avoir le sens de la création de valeur pour l'entreprise et ses clients
Échanger avec les encadrants, définir le problème et mettre en avant les solutions

C6 - digital : être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
Maîtrise de l'outil Matlab/Simulink pour répondre à la problématique attendue

C7 - convaincre : savoir convaincre
Prestation lors la soutenance et lors de la semaine

2SC5693 – Propulsion aéronautique hybride

Responsables : **Antoine Renaud**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'électrification de l'aviation est un sujet d'actualité, compte tenu des enjeux de réduction des émissions polluantes auxquelles la communauté du transport aérien s'est engagée : d'ici la moitié du 21^e siècle, il s'agit de diminuer par deux les émissions de CO₂ de l'ensemble du trafic aérien alors que dans le même temps on estime que le volume de passagers transportés va pratiquement doubler.

Dans ce contexte, il est légitime de s'intéresser à des avions à propulsion électrique ce qui pose le problème du stockage de l'énergie : les batteries sont encore très lourdes et suffisent à peine à mouvoir des appareils légers de deux passagers sur quelques centaines de kilomètres.

Dans le cadre de cet enseignement d'intégration, nous allons nous intéresser à un avion léger de la classe ULM haut de gamme. Pour cette catégorie d'aéronefs on peut envisager dès aujourd'hui une électrification de la propulsion avec les technologies existantes. Nous considérerons en outre une architecture hybride associant une batterie à une pile à combustible à hydrogène.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours de sciences pour l'ingénieur conseillé : Sciences des Transferts ou Energie électrique

Plan détaillé du cours (contenu)

Un template Simulink général du modèle sera fourni, avec un certain nombre de sous-modèles vierges qu'il s'agira de compléter. Il faudra ensuite procéder aux tests de validation de chacun des sous-systèmes.

1. Pile à combustible
 - Electrochimie du cœur de pile
 - Management thermique
 - Logique de séquençement
2. Distribution électrique et motorisation
 - Moteur et sa régulation
 - Batterie et son système de management
 - Régulation de la puissance
3. Cellule avion
 - Mécanique du vol et roulage
 - Boucles de contrôle et pilotage
4. Préparation des essais
 - Définition des profils de mission
 - Pré- et post-traitements

Dans une seconde partie, les groupes seront redistribués en trois équipes et les modèles des sous-systèmes seront mis en commun. Chaque équipe sera chargée d'assembler son avion et de le tester.

Déroulement, organisation du cours

L'activité sera encadrée par des intervenants de SafranTech ainsi que des enseignants CentraleSupélec. Les étudiants seront divisés en groupes et sous-groupes en fonction des différentes tâches à accomplir. Des reconfigurations auront lieu en cours de semaine en fonction de l'avancement du travail.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se base sur l'assiduité, la motivation et l'efficacité tout au long de la semaine ainsi que sur des soutenances en groupe à plusieurs moments de la semaine.

Moyens

L'ensemble de l'activité se déroulera en utilisant le logiciel Matlab/Simulink pour simuler le problème.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de la semaine, les étudiants auront acquis des notions sur la mécanique du vol, le pilotage d'un avion, le fonctionnement de moteurs électriques et de piles à combustible. Ils auront surtout appris à gérer les contraintes liées à ces différents éléments lorsqu'ils sont assemblés dans un système complexe. Enfin, l'étendue et la complexité du problème demandent nécessairement un travail en équipe avec différents cœurs de métiers, répliquant en cela des situations réelles du monde du travail.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 + C2 + C4 + C6 + C7

ST5- CONTROLE DE LA POLLUTION ACOUSTIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE

Dominante : **MDS (Mathématique, Data Science) et Info&Num (Informatique et Numérique)**

Langue d'enseignement : **Français**

Campus où le cours est proposé : **Paris-Saclay**

Problématique d'ingénieur

La pollution acoustique est aujourd'hui considérée comme une gêne majeure par la population, alors que la pollution électromagnétique soulève pour sa part de nombreuses questions et interrogations liées aux problèmes de santé. Les réalisations pratiques permettant de contrôler cette pollution représentent un défi technique et industriel de premier plan, mais ne bénéficient pas encore des nouveaux développements que peut lui apporter l'analyse mathématique, la simulation numérique et l'informatique.

Cet enseignement s'intéresse à la conception de produits innovants (revêtement acoustique ou électromagnétique) destinés à contrôler la pollution acoustique/électromagnétique. Ayant introduit le contexte physique, il vise à donner aux élèves les notions en mathématique et informatique associées à la conception et la fabrication de tels produits.

Cet enseignement propose deux voies de formation :

- **Voie Méthodes mathématiques** : une voie basée sur la théorie mathématique (EDPs, analyse fonctionnelle, dérivée de Fréchet) associée aux algorithmes numériques pour maîtriser le contrôle des ondes pour définir la forme d'un revêtement acoustique ou électromagnétique. En particulier, dans cette voie sont traitées les EDPs sur les bords irréguliers (fractales) et est développée la méthode d'optimisation des formes et la notion de la dérivée par rapport au bord.
- **Voie Calcul Scientifique, méthodes numériques et algorithmique** : cette voie a pour objectif l'approfondissement des méthodes numériques utilisées en voie mathématique, elle est orientée vers le calcul scientifique. En s'intéressant au même but commun que la voie mathématique, cette voie permet d'aller plus loin dans l'implémentation numérique de la méthode d'optimisation des formes.

Les deux voies étudient les méthodes (théoriques ou numériques) qui sont utiles au contrôle des ondes acoustiques extérieures (voisinage des autoroutes, des aéroports, des chantiers) ou intérieures (isolation phonique dans les bureaux par des panneaux perforés ou liners acoustiques dans les réacteurs des avions par exemple), ainsi qu'au contrôle de la pollution électromagnétique (chambres anéchoïques).

L'enseignement d'intégration permet de mettre en œuvre les compétences et connaissances acquises dans le cas d'une application choisie pour garantir les meilleures performances tout en tenant compte des contraintes réglementaires, environnementales et économiques.

L'intervention d'industriels (ONERA, SIEPEL) et des spécialistes concepteurs des murs anti-bruits permet de mieux appréhender les contraintes économiques et les enjeux associés à la conception et à l'exploitation de produits innovants.

Prérequis conseillés

Pour la voie « Méthodes mathématiques » il est demandé une maîtrise du cours de première année EDPs. D'un point de vue général, avoir suivi le cours de SPI « Physique des Ondes » serait un plus.

Modules contexte et enjeux : cette partie s'organise autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire les enjeux et verrous associés. Ainsi les thèmes suivants seront abordés : les fractales pour l'innovation dans les applications acoustiques et électromagnétiques, le contrôle par des liners acoustiques dans les réacteurs en aéronautique, les défis actuels du contrôle des ondes électromagnétiques, la recherche et l'innovation dans le contrôle des ondes.

Cours spécifique (60 HEE) : Le contrôle des ondes : la théorie et algorithmique

Brève description : Les deux voies proposées ont les mêmes objectifs. Les concepts du cours commun de Commande des systèmes dynamiques sont approfondis dans le contexte du contrôle de la dissipation de l'énergie d'une onde. L'observabilité dans ce cas dépend de la géométrie du bord absorbant. Pour illustrer les raisons pour lesquelles on a besoin de l'irrégularité géométrique, on introduit les notions de géométrie fractale avec des résultats connus en physique et, pour la voie théorique, en mathématiques. On présente en particulier les phénomènes de localisation et d'absorption des ondes (acoustiques ou électromagnétiques) qui sont reliées par l'analyse spectrale du modèle (théorique et numérique). Pour mieux comprendre les enjeux environnementaux et sociologiques des développements des barrières acoustiques, on présente quelques aspects psycho-acoustiques, qui montrent l'importance de la dissipation de certaines fréquences. Dans le cadre de l'absorption optimale de l'énergie des ondes, nous résolvons d'abord théoriquement et, en EI, numériquement un problème d'optimisation de forme paramétrique pour trouver la distribution optimale du matériau absorbant dans le matériau réfléchissant défini par une fonction caractéristique dans la condition limite de type Robin associée à l'équation de Helmholtz. La condition limite de Robin peut être donnée sur une partie ou sur tout le bord du domaine. La géométrie de la frontière partiellement absorbante est fixée, mais peut être non Lipschitzienne, par exemple fractale. En utilisant les propriétés de bien-posé du modèle, pour toute fraction de volume fixe du matériau absorbant, nous établissons l'existence d'au moins une distribution optimale minimisant l'énergie acoustique. Grâce à la dérivée de forme de la fonctionnelle d'énergie, qui existe également pour les frontières non Lipschitziennes, on considère (dans le cas bidimensionnel) la méthode de descente de gradient pour établir la méthode numérique associée. Pour la voie numérique la partie algorithmique de cette méthode sera présentée en détail. Dans la voie mathématique on présentera également ces méthodes numériques mais beaucoup plus brièvement.

On considère ensuite la difficulté principale d'avoir une forme "presque optimale" sur une large bande de fréquences, importante d'un point de vue psycho-acoustique et des intérêts industriels. Le but final dans l'EI est de pouvoir déterminer une forme optimale ou une forme « presque optimale » de la géométrie sur une bande de fréquence par la simulation numérique.

Les deux voies proposées prévoient un projet numérique intermédiaire sur la modélisation d'absorption par des milieux poreux. La voie théorique finalisera par un examen écrit sans documents pendant 1h30 et la voie numérique proposera un grand projet numérique final individuel à la place.

Enseignement d'intégration n°1 : Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes. Contrôle de la pollution acoustique extérieure

- **Partenaire associé :** ONERA
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour l'amélioration des produits existants du marché, pour concevoir des revêtements innovants pour absorber le bruit des avions, des trains, des voitures. On vise à développer ces produits innovants de manière optimale en contrôlant l'énergie des ondes par la géométrie du mur tout en prenant en compte les contraintes économiques. Par exemple, COLAS et l'École Polytechnique ont développé un mur anti-bruit nommé "mur Fractal" TM, qui a été conçu empiriquement avec une géométrie complexe afin de dissiper les différentes longueurs d'ondes. Toutefois, ce mur même s'il est quatre fois plus performant que les murs classiques pour les basses fréquences, ne se vend quasiment pas... L'explication tient au fait que sa construction, se faisant par démoulage, risque de briser le mur, ce qui entraîne un coût élevé de fabrication. Cet EI se propose de trouver par des méthodes de contrôle des ondes, des formes optimales les plus absorbantes possibles (en décibel) qui satisfont les contraintes imposées par l'industriel, par exemple, le coût de fabrication le moins cher avec la réduction la plus importante des décibels. Des premiers résultats numériques dans ce contexte montrent l'existence de formes optimales "pas trop complexes" capables d'améliorer d'un facteur 6 les performances du "mur Fractal" TM.

Enseignement d'intégration n°2 : Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes. Contrôle de la pollution acoustique intérieure

- **Partenaire associé :** ONERA
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants sur le marché, dans le but de concevoir des revêtements intérieurs pour absorber le bruit à l'intérieur des bâtiments et également de liners acoustiques dans les réacteurs des avions. Dans ce contexte on s'intéresse à trois applications phares: (i) la conception des revêtements dans les chambres anéchoïques (jusqu'à présent les chambres anéchoïques acoustiques ont été conçues de manière empirique fondée sur des géométries utilisant des échelles différentes), (ii) la conception de panneaux

absorbants perforés (les matériaux absorbants sont constitués de fibres qui ont de très bonnes propriétés acoustiques absorbantes, et qui sont habituellement couverts de panneaux en bois pour des raisons esthétiques, ce qui nuit malheureusement à leur efficacité) et enfin (iii) les isolants absorbants perforés dans les réacteurs des avions. Dans la dernière application il est important d'optimiser le diamètre et le positionnement des trous dans le matériau. Les objectifs sont de contrôler au mieux les ondes par une analyse de la forme optimale de la surface de ces revêtements afin d'améliorer l'absorption acoustique en décibel en prenant en compte les enjeux et contraintes industrielles.

Enseignement d'intégration n°3 : Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes. Contrôle de la pollution électromagnétique

- **Partenaire associé :** ONERA
- **Lieu :** Campus Paris-Saclay
- **Brève description :** On se positionne sur les enjeux industriels, présentés par THALES, qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants du marché, ceci afin d'absorber les ondes électromagnétiques. Comme domaines d'applications, on vise la conception et l'optimisation d'une chambre anéchoïque. On remarque que les matériaux absorbants pour les ondes électromagnétiques sont différents des matériaux dissipatifs pour les ondes acoustiques. La nature différente de ces ondes implique une adaptation du modèle vu en cours.

2SC5710 – Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes

Responsables : **Anna Rozanova-Pierrat**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

La pollution acoustique est aujourd'hui considérée comme une gêne majeure par la population, alors que la pollution électromagnétique soulève pour sa part de nombreuses questions et interrogations liées aux problèmes de santé. Les réalisations pratiques permettant de contrôler cette pollution représentent un défi technique et industriel de premier plan, mais ne bénéficient pas encore des nouveaux développements que peuvent lui apporter l'analyse mathématique, la simulation numérique et l'informatique.

Cet enseignement s'intéresse à la conception de produits innovants (revêtement acoustique ou électromagnétique) destinés à contrôler la pollution acoustique/électromagnétique.

Ayant introduit le contexte physique dans le module "Contexte et enjeux", il vise à donner aux élèves les notions en mathématique et informatique associées à la conception et la fabrication de tels produits. Cet enseignement propose deux voies de formation :

- Voie analyse théorique, dirigée par Mme Rozanova-Pierrat : une voie basée sur la théorie mathématique (EDPs, analyse fonctionnelle, dérivée de Fréchet) pour maîtriser le contrôle des ondes pour définir la forme d'un revêtement acoustique ou électromagnétique. En particulier, dans cette voie sont traitées les EDPs sur les bords irréguliers (fractales) et est développée la méthode d'optimisation de formes et la notion de la dérivée par rapport au bord.
- Voie analyse numérique, méthodes numériques et algorithmique, dirigée par M. Magoulès : cette voie a pour objectif l'approfondissement des méthodes numériques, elle est orientée vers le calcul scientifique. En particulier, dans cette voie sont traitées les méthodes numériques et l'implémentation de celles-ci pour la propagation des ondes et la méthode d'optimisation de formes.

Les deux voies préparent aux trois Els proposés par la suite. Plus précisément, elles étudient les méthodes (théoriques ou numériques) qui sont utiles aux thématiques des trois Els: au contrôle des ondes acoustiques extérieures (voisinage des autoroutes, des aéroports, des chantiers) ou intérieures (isolation phonique dans les bureaux par des panneaux perforés ou liners acoustiques dans les réacteurs des avions par exemple), ainsi qu'au contrôle de la pollution électromagnétique (chambres anéchoïques).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

La maîtrise des cours SG de la 1ère année: Algorithmique et complexité (pour la voie Calcul Scientifique) et EDPs (pour la voie Analyse théorique)

Le cours SPI "Physique des Ondes" est conseillé pour l'EI "Contrôle de la pollution électromagnétique"

Plan détaillé du cours (contenu)

On développe sur le cours "Commande des systèmes dynamiques" de la ST, les problèmes de contrôle décrits par des équations aux dérivées partielles (observabilité, commandabilité, dite contrôlabilité) qu'on approfondi dans le contexte du contrôle de la dissipation de l'énergie d'une onde. L'observabilité dans ce cas dépend de la géométrie du bord absorbant. Pour illustrer les raisons dans lesquelles on a besoin de l'irrégularité géométrique, on introduit les notions de géométrie fractale avec des résultats connus en physique et en mathématiques (voie Analyse théorique). On présente en particulier, les phénomènes de localisation et d'absorption des ondes

(acoustiques ou électromagnétiques) qui sont reliées par l'analyse spectrale du modèle. Pour mieux comprendre les enjeux environnementaux et sociologiques des développements des barrières acoustiques, on présente quelques aspects psychoacoustiques, qui montrent l'importance de la dissipation des certaines fréquences. Le cours étudie en particulier, pour une fréquence fixée, l'obtention d'une forme optimale pour un modèle fréquentiel sur les équations de Helmholtz dans le but de permettre son utilisation dans l'EI sur deux types de contrôles : géométrique et topologique. On considère ensuite la difficulté principale d'avoir une forme "presque optimale" sur une large bande des fréquences, importante d'un point de vue psychoacoustique et des intérêts industriels. Dans ce contexte sont également présentées (de manière approfondie pour la voie Calcul Scientifique) les méthodes numériques les plus adaptées afin de pouvoir déterminer rapidement et de manière robuste la forme optimale ou la forme « presque optimale » de la géométrie sur une bande de fréquence par la simulation numérique.

Voie Analyse Numérique : modèles de la propagation des ondes ; équation de Poisson, méthode éléments finis, méthode des différences finies, implémentation numérique ; bords pré-fractales ; problème spectral et méthodes numériques associées, implémentation des différentes conditions aux bords, erreur numérique ; méthodes numériques avancées dans le contexte des ondes ; introduction de l'optimisation paramétrique, algorithmique et numérique associée.

Voie Analyse Théorique: Introduction EDPs; modèles de la propagations des ondes; la théorie des opérateurs de traces, extensions, ensembles compacts, opérateurs compacts; équation de Poisson; bords fractales; analyse du problème de Poisson aux conditions au bord mixtes et du problème spectral associé; modèle de l'Helmholtz avec un bord absorbant; optimisation paramétrique (existence d'une forme optimale); la dérivée de Fréchet et la dérivée par rapport à un paramètre; méthode de Lagrangien, algorithmique et numérique associée.

Déroulement, organisation du cours

Cours :15*1h30, : TD 4*1h30, projet (en dehors des TDs, aide avec office hours), polycopié du cours, calculs sur un cluster, solutions des exercices des TDs

Organisation de l'évaluation

Contrôle final de 2h qui compte pour 70% dans la note finale et le projet issu du TP qui compte pour 30% dans la note finale dans la voie théorique.

Projet numérique qui compte pour 70% dans la note finale et le projet issu des TPs qui compte pour 30% dans la note finale dans la voie numérique.

Support de cours, bibliographie

1. F. Magoulès, P.T.K. Nguyen, P. Omnes, A. Rozanova-Pierrat, *Optimal absorbtion of acoustic waves by a boundary* SIAM J. Control Optim. Vol. 59, No. 1, (2021), pp. 561-583.
2. Kevin Arfi, Anna Rozanova-Pierrat. *Dirichlet-to-Neumann or Poincaré-Steklov operator on fractals described by d -sets. Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S, American Institute of Mathematical Sciences, 2019, 12 (1), pp.1-26.*
3. G. Allaire, *Conception optimale de structures*, Springer.
4. A. Henrot, M. Pierre *Variation et optimisation de formes. Une analyse géométrique.* Springer.
5. M. Filoche and S. Mayboroda, *Universal mechanism for Anderson and weak localization*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 109, 14761 (2012).
6. M. Filoche and S. Mayboroda, *The landscape of Anderson localization in a disordered medium*, *Contemporary Mathematics*, 601 (2013), 113-121

Moyens

Les étudiants sont divisés (par les souhaits des étudiants) en deux groupes correspondant à deux voies mentionnées avant le commencement du cours spécifique. Chaque groupe a des cours destinés à introduire des notions utilisées en TDs et à plus longue terme en EI (les trois Els proposés). Il y aura quelques cours sur les méthodes numériques dans la voie mathématique et il y aura quelques cours théoriques élémentaires (comme l'intégration par parties multidimensionnelle) dans la voie numérique. Il y a un projet numérique pendant le cours à rendre (modélisation de l'absorption des ondes par un milieu poreux fixé). Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène. Les offices hours seront mis en place pour aider à finaliser ce projet.

La voie numérique : il y a un projet numérique à rendre pour valider le cours.
Pour valider la voie théorique il y a un examen écrit de deux heures.

La voie Analyse théorique est basée sur le polycopié du cours, qui sera mis à disposition de tout le monde. Les étudiants ont également à leur disposition tous les sujets des TDs avec les corrections. Les calculs numériques seront effectués sur un cluster de calcul de CentraleSupélec en se connectant à Jupyter.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Voie Analyse Théorique :

- Comprendre les techniques théoriques et des algorithmes numériques du contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques
- Valider les techniques théoriques de contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques (optimisation de forme)

Voie Analyse Numérique, calcul scientifique, méthodes numériques et algorithmique :

- Techniques numériques de contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques
- Implémenter des méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes externes / internes et problèmes pour une large bande de fréquences)
- Valider les techniques numériques de contrôle des ondes acoustiques / électromagnétiques

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1, C2

Voie Analyse théorique (analyse fonctionnelle, optimisation de formes):

Pouvoir traiter les problèmes de contrôle décrits par les EDPs.

Savoir traiter l'irrégularité du bord y compris fractale pour montrer le caractère bien posé d'un problème décrit par des EDPs.

Savoir appliquer la méthode d'optimisation des formes et dériver une fonctionnelle d'énergie par rapport au bord du domaine.

Pouvoir déduire à partir des objectifs applicatifs les contraintes du contrôle et le fait d'une existence/non-existence d'une forme optimale.

Cibler les échelles géométriques d'intérêt par rapports aux longueurs d'ondes à dissiper.

Pouvoir traiter les aspects numériques.

Voie Analyse numérique (Calcul Scientifique, méthodes numériques et algorithmique) :

Pouvoir traiter les problèmes de contrôle décrits par les EDPs.

Pouvoir déduire à partir des objectifs applicatifs les contraintes du contrôle et l'importance d'une forme optimale.

Cibler les échelles géométriques d'intérêt par rapports aux longueurs d'ondes à dissiper.

Maîtriser la méthode des éléments finis et différences finies et leur implémentation.

Connaissance des méthodes de résolutions liées à la simulation de la propagation des ondes.

Maîtrise des difficultés numériques liées à la simulation.

L'évaluation de ces compétences est prise en compte dans l'évaluation des compétences de l'enseignement d'intégration

2SC5791 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique extérieure

Responsables : **Frédéric Magoules**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour l'amélioration des produits existants du marché, pour concevoir des revêtements innovants pour absorber le bruit des avions, des trains, des voitures. On vise à développer ces produits innovants de manière optimale en contrôlant l'énergie des ondes par la géométrie du mur tout en prenant en compte les contraintes économiques. Par exemple, COLAS et l'École Polytechnique ont développé un mur anti-bruit nommé "mur Fractal" TM, qui a été conçu empiriquement avec une géométrie complexe afin de dissiper les différentes longueurs d'ondes. Toutefois, ce mur même s'il est quatre fois plus performant que les murs classiques pour les basses fréquences, ne se vend quasiment pas... L'explication tient au fait que sa construction, se faisant par démoulage, risque de briser le mur, ce qui entraîne un coût élevé de fabrication. Cet EI se propose de trouver par des méthodes de contrôle des ondes, des formes optimales les plus absorbantes possibles (en décibel) qui satisfont les contraintes imposées par l'industriel, par exemple, le coût de fabrication le moins cher avec la réduction la plus importante des décibels. Des premiers résultats numériques dans ce contexte montrent l'existence des formes optimales "pas trop complexes" capables d'améliorer d'un facteur 6 les performances du "mur Fractal" TM.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Les cours de ST5 et en particulier le cours "Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes" 2SC5710 (une des deux voies proposées)

Plan détaillé du cours (contenu)

Travail en équipe "entreprise", définition des enjeux, recherche bibliographique, compréhension physique et de l'intérêt pratique, modélisation mathématique du problème, mise au point de la théorie mathématique correspondante si nécessaire (le problème bien ou mal posé, régularité de la solution, dérivation de l'énergie acoustique par rapport à la géométrie du mur, influence du choix du matériau poreux choisit sur l'absorption de l'énergie,...), développement/implémentation de la méthode numérique, l'analyse numérique des résultats, l'analyse de leurs pertinence, amélioration possible, obtention d'une forme efficace pour une large bande des fréquences.

Déroulement, organisation du cours

Travail en équipe, projet, dialogue avec différents spécialistes du domaine.

Organisation de l'évaluation

Rapport, livrables finaux et intermédiaires, soutenance.

Moyens

Connexion au cluster de calcul à la distance

Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène choisi. Ils étudieront la chaîne de simulation avec un objectif de performance et de précision sous contraintes économiques (coût de fabrication) et environnemental (gain en décibel ou en potentiel).

Livrables : rapport, logiciel, transparents et soutenance

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre l'apport de la géométrie dans la conception et le développement de nouveaux produits
- Appréhender les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Implémenter les méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes extérieurs et problèmes pour une large bande des fréquences)
- Valider les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Confronter les étudiants à la réalisation d'un produit complexe par des techniques de simulation numérique

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4.1 Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques : étude de l'intérêt industriel, psychoacoustique et environnementale pour la détermination des contraintes du problème du contrôle.

C6.1 Identifier et utiliser au quotidien les logiciels nécessaires pour son travail (y compris les outils de travail collaboratif). Adapter son "comportement numérique" au contexte : utilisation et développement d'un code numérique en se basant sur des parties existantes.

C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée. Convaincre en travaillant sur la relation à l'autre : en travaillant en équipe le choix stratégique est crucial pour avoir des bons résultats du projet, pour le faire il faut savoir convaincre les autres ; le travail en équipe lui-même ; la soutenance finale devant un jury multidisciplinaire.

2SC5792 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution acoustique intérieure

Responsables : **Frédéric Magoules**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants sur le marché, dans le but de concevoir des revêtements intérieurs pour absorber le bruit à l'intérieur des bâtiments et également de liners acoustiques dans les réacteurs des avions. Dans ce contexte on s'intéresse à trois applications phares: (i) la conception des revêtements dans les chambres anéchoïques (jusqu'à présent les chambres anéchoïques acoustiques ont été conçues de manière empirique basée sur des géométries utilisant des échelles différentes), (ii) la conception de panneaux absorbants perforés (les matériaux absorbants sont constitués de fibres qui ont de très bonnes propriétés acoustiques absorbantes, et qui sont habituellement couverts de panneaux en bois pour des raisons esthétiques, ce qui nuit malheureusement à leur efficacité) et enfin (iii) les isolations absorbant perforés dans les réacteurs des avions. Dans la dernière application il est important d'optimiser le diamètre et le positionnement des trous dans le matériau. Les objectifs sont de contrôler au mieux les ondes par une analyse de la forme optimale de la surface de ces revêtements afin d'améliorer l'absorption acoustique en décibel en prenant en compte les enjeux et contraintes industrielles.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Les cours de ST5 et en particulier le cours "Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes" 2SC5710 (une des deux voies proposées)

Plan détaillé du cours (contenu)

Travail en équipe "entreprise", définition des enjeux, recherche bibliographique, compréhension physique et de l'intérêt pratique, modélisation mathématique du problème, mise au point de la théorie mathématique correspondante si nécessaire (le problème bien ou mal posé, régularité de la solution, dérivation de l'énergie acoustique par rapport à la géométrie du mur, influence du choix du matériau poreux choisit sur l'absorption de l'énergie,...), développement/implémentation de la méthode numérique, l'analyse numérique des résultats, l'analyse de leurs pertinence, amélioration possible, obtention d'une forme efficace pour une large bande des fréquences.

Déroulement, organisation du cours

Travail en équipe, projet, dialogue avec différents spécialistes du domaine.

Organisation de l'évaluation

Rapport, livrables finaux et intermédiaires, soutenance

Moyens

Connexion au cluster de calcul à la distance

Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène choisi. Ils étudieront la chaîne de simulation avec un objectif de performance et de précision sous contraintes économiques (coût de fabrication) et environnemental (gain en décibel ou en potentiel).

Livrables : rapport, logiciel, transparents et soutenance

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre l'apport de la géométrie dans la conception et le développement de nouveaux produits
- Appréhender les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Implémenter les méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes intérieur et problèmes pour une large bande des fréquences)
- Valider les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Confronter les étudiants à la réalisation d'un produit complexe par des techniques de simulation numérique

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4.1 Penser client. Identifier/analyser les besoins, les enjeux et les contraintes d'autres parties prenantes, notamment sociétales et socio-économiques : étude de l'intérêt industriel, psychoacoustique et environnemental pour la détermination des contraintes du problème du contrôle.

C6.1 Identifier et utiliser au quotidien les logiciels nécessaires pour son travail (y compris les outils de travail collaboratif). Adapter son "comportement numérique" au contexte : utilisation et développement d'un code numérique en se basant sur les parties existantes.

C7.1 Convaincre sur le fond. Être clair sur les objectifs et les résultats attendus. Être rigoureux sur les hypothèses et la démarche. Structurer ses idées et son argumentation. Mettre en évidence la valeur créée. Convaincre en travaillant sur la relation à l'autre : en travaillant en équipe le choix stratégique est crucial pour avoir des bons résultats du projet, pour le faire il faut savoir convaincre les autres ; le travail en équipe lui-même ; la soutenance finale devant un jury multidisciplinaire.

2SC5793 – Conception d'un revêtement afin de contrôler la pollution des ondes : Contrôle de la pollution électromagnétique

Responsables : **Anna Rozanova-Pierrat**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

On se positionne sur les enjeux industriels qui imposent les contraintes économiques et les contraintes technologiques nécessaires pour améliorer les produits existants du marché, ceci afin d'absorber les ondes électromagnétiques. Comme domaines d'applications, on vise la conception/optimisation des chambres anéchoïques électromagnétiques. On remarque que les matériaux absorbants pour les ondes électromagnétiques sont différents des matériaux dissipatifs pour les ondes acoustiques.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours "Physique des Ondes" de la 1ère année serait un plus

Les cours de ST5 et en particulier le cours "Théorie et algorithmique pour le contrôle des ondes" 2SC5710 (une des deux voies proposées)

Plan détaillé du cours (contenu)

Travail en équipe "entreprise", définition des enjeux, recherche bibliographique, compréhension physique et de l'intérêt pratique, modélisation mathématique du problème, mise au point de la théorie mathématique correspondante si nécessaire (le problème bien ou mal posé, régularité de la solution, dérivation de l'énergie électromagnétique par rapport à la géométrie du mur, influence du choix du matériau poreux choisit sur l'absorption de l'énergie,...), développement/implémentation de la méthode numérique, l'analyse numérique des résultats, l'analyse de leurs pertinence, amélioration possible, obtention d'une forme efficace pour une large bande des fréquences.

Déroulement, organisation du cours

Travail en équipe, projet, dialogue avec différents spécialistes du domaine.

Organisation de l'évaluation

Rapport, livrables finaux et intermédiaires, soutenance par équipe

Moyens

Connexion au cluster de calcul à la distance

Les étudiants réaliseront la modélisation, la simulation, la visualisation et le rendu du phénomène choisi. Ils étudieront la chaîne de simulation avec un objectif de performance et de précision sous contraintes économiques (coût de fabrication) et environnemental (gain en décibel ou en potentiel).

Livrables : rapport, logiciel, transparents et soutenance

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Comprendre l'apport de la géométrie dans la conception et le développement de nouveaux produits
- Appréhender les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Implémenter les méthodes numériques pour simuler des phénomènes de propagation d'ondes acoustiques de grandes dimensions (problèmes extérieurs et problèmes pour une large bande des fréquences)
- Valider les techniques théoriques et numériques du contrôle des ondes acoustiques
- Confronter les étudiants à la réalisation d'un produit complexe par des techniques de simulation numérique

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4, C6, C7

ST5- SYSTEMES COMPLEXES INDUSTRIELS ET CRITIQUES A LOGICIELS PREPONDERANTS

Dominante : InfoNum (Informatique et Numérique)

Langue d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Cette séquence thématique aborde un axe des sciences du logiciel à travers la mise en place d'un cycle de développement permettant la conception de systèmes complexes industriels et critiques où le logiciel est prépondérant. Les systèmes industriels modernes sont souvent des systèmes composés de composants hétérogènes en interaction pouvant être définis comme des systèmes complexes (systèmes de systèmes). Ce qui caractérise de tels systèmes est qu'ils sont souvent à logiciels prépondérants (Ex. les systèmes cyber-physiques). De plus, leur comportement est souvent difficilement appréhendable du fait de l'émergence de comportements global que l'on ne peut anticiper à un niveau plus local. Enfin, ils sont critiques dans le sens où la moindre erreur de conception peut avoir des conséquences rédhibitoires sur le comportement global du système. Plus précisément, ce sujet de séquence thématique vise à aborder à la fois la conception et la vérification de tels systèmes complexes et critiques en utilisant des techniques issues du Génie Logiciel. Les composants de tels systèmes étant hétérogènes (c.-à-d. à la fois physiques et logiciels), les méthodologies et les outils présentés dans ce sujet seront multiples et s'intègrent dans le cadre d'un cycle de développement. L'idée est d'aborder scientifiquement les phases de conception et de validation en utilisant des techniques formelles du Génie Logiciel (modélisation temporisée et hybride, logique temporelle, model-checking). L'interaction du système avec son environnement externe (qui peut être l'utilisateur humain ou pas) est l'un des points principaux qui seront pris en compte.

L'objectif principal d'une telle démarche vise à montrer, à travers les modèles formels obtenus, que le système fait bien ce que l'on attend de lui tout en respectant les contraintes imposées par le cahier des charges et par l'environnement, ou dans le cas contraire, à extraire les états du système qui peuvent remettre en cause son bon fonctionnement. Dans ce dernier cas, le gain sur le plan économique est très intéressant et appréciable par les ingénieurs qui gagneront à corriger les problèmes détectés par la vérification du modèle avant de passer à l'étape de l'implémentation (programmation).

Prérequis conseillés

Aucun

Modules contexte et enjeux : cette partie s'articule autour de demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire la thématique. Ainsi seront organisées des conférences portant sur l'état actuel de l'ingénierie dirigée par les modèles dans le monde industriel et les défis dans du futur.

Cours spécifique (60 HEE) : Conception et vérification des systèmes critiques

Brève description : un système critique est un système dont la panne peut avoir des conséquences graves, comme les systèmes de transport (trains, avions, voitures ...) ou les systèmes de production d'énergie (nucléaire, éolien ...). Ces systèmes sont complexes et afin de garantir leur bon fonctionnement, il est nécessaire de prendre en compte les aspects continus et événementiels de leur dynamique. Une part du cours sera donc dédiée à la conception et à la modélisation des systèmes critiques et complexes. Par ailleurs, leur sûreté de fonctionnement est porteuse d'enjeux économiques et sociétaux considérables. Une autre part du cours sera alors dédiée aux méthodes et outils (formels ou semi-formels) proposés pour garantir les propriétés de sûreté pendant la phase de conception.

Enseignement d'intégration n°1 : Conception d'un système de commande sûr pour un ascenseur

- **Partenaire associé** : ClearSy
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : Le but de cette étude est de concevoir un logiciel critique à embarquer dans un contrôleur pilotant un ascenseur. Cette étude implémente l'ensemble du cycle de vie du développement d'un logiciel critique en partant d'une spécification formelle jusqu'à la génération automatique du code C qui sera embarqué dans le contrôleur. La méthode formelle B sera l'outil support pour couvrir l'ensemble des étapes du développement formel, et les circuits CSP développés par ClearSy, seront utilisés pour implémenter le contrôleur de l'ascenseur.

Enseignement d'intégration n°2 : Conception de systèmes intelligents pour le contrôle automatisé du trafic aérien

- **Partenaire associé** : à confirmer
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : les systèmes d'informations critiques dans le domaine avionique sont soumis à des contraintes de temps et de fiabilité très importantes. Leur développement nécessite donc des techniques d'ingénierie prenant en compte ces caractéristiques dès les phases amont de leur cycle de vie. Cet EI s'intéresse donc à la conception des modèles des systèmes intelligents pour contrôler le trafic aérien et à la vérification des certaines propriétés de sûreté sur ces modèles. Ces systèmes mettent en œuvre de nombreux composants interagissant fortement, qui sont parallèles et asynchrones. Tous ces sous-systèmes sont soumis à la vérification et au test pour garantir leur propre fonctionnalité. Par exemple, il est primordial de démontrer l'absence de blocage et la possibilité pour chacun d'assurer un fonctionnement correct dans des délais compatibles avec leurs propres contraintes temporelles. Il est également important d'ordonnancer les actions de ces sous-systèmes et assurer un contrôle fiable de l'ensemble du système. A titre d'exemple, quelques propriétés (formulées en STL) importantes à vérifier : 1) Le trafic aérien ne devrait jamais être autorisé dans les deux sens simultanément sur le même itinéraire 2) L'aéronef doit répondre aux messages dans un délai limité 3) Pour deux aéronefs, il doit y avoir une séparation avec une distance minimale.

Enseignement d'intégration n°3 : Automatisation de la conception de la signalisation : de la spécification au code embarqué

- **Partenaire associé** : Prover
- **Lieu** : Campus Paris-Saclay
- **Brève description** : L'objectif principal de cette étude est le développement de système ferroviaire utilisant une approche en deux phases : Développement d'une application générique, et Instanciation de cette application générique pour produire une ou plusieurs applications spécifiques. L'approche développée sera mise en œuvre pour le développement des systèmes d'enclenchements d'une ligne ferroviaire complète en suivant les étapes suivantes :
 - Une ligne est découpée en plusieurs postes d'enclenchement (interlockings), en général un par station.
 - Les mêmes principes de signalisation sont utilisés tout le long de la ligne.
 - Chaque poste d'enclenchement est une instanciation de ces principes génériques.

L'étude sera finalisée par une simulation de la ligne entière en liant les différents postes d'enclenchement développés.

2SC5810 – Conception et vérification de systèmes critiques

Responsables : **Idir Ait Sadoune**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours vise à aborder à la fois la conception et la vérification des systèmes complexes et critiques en utilisant des techniques issues du Génie Logiciel. Les composants de tels systèmes étant hétérogènes (c-à-d. à la fois physiques et logiciels), les méthodologies et les outils présentés dans ce cours seront multiples et s'intègrent dans le cadre d'un cycle de développement. L'idée est d'aborder scientifiquement les phases de conception et de validation en utilisant des techniques formelles du Génie Logiciel (modélisation temporisée, stochastique et hybride, logique temporelle, model-checking). L'objectif principal d'une telle démarche vise à montrer, à travers les modèles formels obtenus, que le système fait bien ce que l'on attend de lui tout en respectant les contraintes imposées par le cahier des charges et par l'environnement, ou dans le cas contraire, à extraire les états du système qui peuvent remettre en cause son bon fonctionnement. Dans ce dernier cas, le gain sur le plan économique est très intéressant et appréciable par les ingénieurs qui gagneront à corriger les problèmes détectés par la vérification du modèle avant de passer à l'étape de l'implémentation (programmation).

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

- Système d'information et programmation,
- Algorithmique et complexité,
- Modélisation

Plan détaillé du cours (contenu)

- Chapitre 1 - Présentation des logiques temporelles : LTL, CTL
- Chapitre 2 - La vérification avec le Model Checking
- Chapitre 3 - Les automates temporisés : Modélisation et Vérification
- Chapitre 4 - Les modèles stochastiques : Modélisation et Vérification

Déroulement, organisation du cours

- 10,5h de Cours
- 18h de TD : Travaux dirigés

Organisation de l'évaluation

Examen écrit (2H)

Moyens

Les intervenants :

- Marc Aiguier, (Département informatique)
- Idir Ait Sadoune, (Département informatique)
- Paolo Ballarini, (Département informatique)
- Lina Ye (Département informatique)

La langue d'enseignement est le français, mais la majorité des ressources pédagogiques sont écrites en Anglais

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Modéliser un système à logiciels critiques en utilisant différentes approches formelles (Logique temporelle, Automates, Automates temporisés, modèles stochastiques, automates hybrides).
- Modéliser un système à logiciels critiques en prenant en considération différents types de contraintes (fonctionnelles, non-fonctionnelles, temporelles, ...)
- Analyser scientifiquement le modèle d'un système à logiciels critiques en utilisant des techniques issues du Génie Logiciel (Technique de Vérification formelle : Model Checking).
- Extraire les états d'un système à logiciels critiques qui peuvent remettre en cause son bon fonctionnement.
- Valider le modèle d'un système à logiciels critiques (le système fait bien ce qu'on attend de lui).

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.
- C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

L'évaluation de ces compétences est prise en compte pour l'enseignement d'intégration

2SC5891 – Conception d'un système de commande sûr pour un ascenseur

Responsables : **Idir Ait Sadoune**

Département de rattachement : **DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le but de cette étude est de concevoir un logiciel critique à embarquer dans un contrôleur pilotant un ascenseur. Cette étude implémente l'ensemble du cycle de vie du développement d'un logiciel critique en partant d'une spécification formelle jusqu'à la génération automatique du code C qui sera embarqué dans le contrôleur. La méthode formelle B sera l'outil support pour couvrir l'ensemble des étapes du développement formel, et les circuits CSP (CLEARSY Safety Platform) développés par ClearSy, seront utilisés pour implémenter le contrôleur de l'ascenseur.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

- Cours : Modélisation et Vérification des systèmes critiques (le cours spécifique de la ST)
- Introduction à la modélisation avec la méthode B (fait pendant la 1e journée de l'enseignement d'intégration)

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction à la modélisation en utilisant la méthode B.
- Introduction à l'utilisation de l'Atelier B
- Introduction à l'utilisation de la Clearsy Safety platform
- Modélisation d'un ascenseur.
- Vérification des propriétés de sûreté.
- Génération d'un programme informatique embarqué dans des cartes électroniques à partir d'un modèle B.

Déroulement, organisation du cours

Projet sur une semaine (9 demi-journées)

Organisation de l'évaluation

Les étudiants seront évalués à la suite d'une présentation de 15 à 20 minutes des résultats obtenus.

Support de cours, bibliographie

Atelier B :

<https://www.clearsy.com/outils/atelier-b/>

Clearsy-Safety-Platform

<https://www.clearsy.com/outils/clearsy-safety-platform/>

<https://www.youtube.com/watch?v=QtmzVYNe0Fo>

Moyens

- Utilisation de l'Atelier B, outils de développement avec la méthode formelle B (<https://www.clearsy.com/outils/atelier-b/>)
- Utilisation la Clearsy Safety Platform comportant des cartes électroniques et un logiciel de développement (<https://www.clearsy.com/outils/clearsy-safety-platform/>).

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

- Modéliser un système critique en utilisant la méthode formelle B.
- Modélisation des propriétés critiques d'un système.
- Vérification des propriétés de sûreté en utilisant la preuve.
- Générer un programme informatique embarqué dans une carte électronique à partir d'un modèle formel prouvé.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 - Savoir convaincre

2SC5893 – Système intelligent pour le contrôle automatisé du trafic aérien

Responsables : **Lina Ye**

Département de rattachement : **DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les systèmes d'informations critiques dans le domaine avionique sont soumis à des contraintes de temps et de fiabilité très importantes. Leur développement nécessite donc des techniques d'ingénierie prenant en compte ces caractéristiques dès les phases amont de leur cycle de vie. Cet EI s'intéresse donc à la conception des modèles des systèmes intelligents pour contrôler trafic aérien et à la vérification des certaines propriétés de sûretés. Ces systèmes mettent en œuvre de nombreux composants interagissant fortement, qui sont parallèles et synchrones. Tous ces sous-systèmes sont soumis à la vérification pour garantir leur propre fonctionnalité. Par exemple, il est primordial de démontrer l'absence de blocage et la possibilité pour chaque composant d'assurer un fonctionnement correct dans des délais compatibles avec leurs propres contraintes temporelles.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

ST5 - Systèmes complexes industriels et critiques à logiciels prépondérants

Plan détaillé du cours (contenu)

En basant sur la description informelle du système critique, les étudiants sont invités à utiliser une approche de modélisation semi-formelle pour capturer et structurer les exigences de sûreté, puis à les transformer en un modèle formel (par exemple des automates temporisés) avant d'appliquer des techniques de model-checking pour la vérification formelle. Une partie facultative est dédiée à développer un outil pour détecter un type de scénarios non réalistes dans les modèles, qui peuvent très souvent perturber les résultats de model checker comme UPPAAL.

Déroulement, organisation du cours

Projet d'une semaine en intégrant les contenus de cours de ST5, par les méthodes démonstratives, actives et de découverte.

Organisation de l'évaluation

Rapport et soutenance

Support de cours, bibliographie

1. Alur, R., Dill, D.L. A theory of timed automata. Journal of Theoretical Computer Science 126(2), page: 183–235, 1994
2. Christel Baier and Joost-Pieter Katoen, Principles of Model Checking (Representation and Mind Series). TheMIT Press, 2008.
3. Gerd Behrmann, Alexandre David, Kim Guldstrand Larsen. A Tutorial on Uppaal. Formal Methods for the Design of Real-Time Systems, International School on Formal Methods for the Design of Computer, Communication and Software Systems, SFM-RT, page:200-236, 2004.
4. Patricia Bouyer, Uli Fahrenberg, Kim Guldstrand Larsen, Nicolas Markey, Joël Ouaknine, James Worrell, Model Checking Real-Time Systems. Handbook of Model Checking, page:1001-1046, 2018.
5. Patricia Bouyer, François Laroussinie, Nicolas Markey, Joël Ouaknine, James Worrell, Timed Temporal Logics. Models, Algorithms, Logics and Tools, page: 211-230, 2017.
6. Nicolas Navet and Stephan Merz, Modeling and Verification of Real-Time Systems (1st ed.). Wiley-IEEE Press, 2008.

Moyens

WIFI,
PROJECTEUR,
PRISES ELECTRIQUES

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Les étudiants doivent savoir et comprendre comment concevoir un système de sûreté avec les approches informelles et formelles en garantissant les exigences de sûreté.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les étudiants doivent être capable d'exploiter ses ressources (par exemple leurs propres connaissances nécessaires), de bien maîtriser l'environnement de travail, de faire aboutir les objectifs en produisant des résultats et également de bien développer l'entraide et le partage avec les autres dans le groupe.

C4: Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6: Être à l'aise et innovant dans le monde du numérique

C7: Savoir convaincre

2SC5894 – Automatisation de la conception de la signalisation : de la spécification au code embarqué

Responsables : **Idir Ait Sadoune**

Département de rattachement : **DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif principal de cette étude est le développement de système ferroviaire utilisant une approche en deux phases : Développement d'une application générique, et Instanciation de cette application générique pour produire une ou plusieurs applications spécifiques. L'approche développée sera mise en œuvre pour le développement des systèmes d'enclenchements d'une ligne ferroviaire complète en suivant les étapes suivantes :

- Une ligne est découpée en plusieurs postes d'enclenchement (interlockings), en général un par station.
- Les mêmes principes de signalisation sont utilisés tout le long de la ligne.
- Chaque poste d'enclenchement est une instanciation de ces principes génériques.

L'étude sera finalisée par une simulation de la ligne entière en liant les différents postes d'enclenchement développés.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Les élèves doivent avoir pris part au cours "Systèmes critiques" de la ST5

Plan détaillé du cours (contenu)

- Modélisation d'un système ferroviaire.
- Vérification des propriétés de sûreté d'un système ferroviaire.

Déroulement, organisation du cours

Projet sur une semaine (9 demi-journées)

Organisation de l'évaluation

Les étudiants seront évalués à la suite d'une présentation de 15 à 20 minutes des résultats obtenus.

Moyens

Une salle de TD/TP pour ~25 élèves avec connexion WiFi

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Modéliser un système critique.
- Modélisation des propriétés critiques d'un système dans le cadre ferroviaire.
- Vérification des propriétés de sûreté.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 - Savoir convaincre

ST5- DATA DRIVEN CONTROL

Dominante : GSI

Langue d'enseignement : Anglais

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Le pilotage des systèmes dynamiques repose sur l'utilisation de modèles et la caractérisation de ses interactions avec l'environnement (moyens d'actions, perturbations...). Si les approches classiques reposent essentiellement sur des modèles paramétriques et des équations analytiques, le développement des techniques d'apprentissage fondées sur des données mesurées ou simulées apportent des opportunités et des défis pour le domaine de la commande.

D'un côté, l'utilisation de données peut permettre de s'affranchir de l'étape préalable de modélisation physique du système en tirant parti des informations présentes dans les données entrées-sorties mesurées, afin de représenter son fonctionnement en intégrant implicitement les comportements non linéaires, mal connus ou difficiles à formaliser mathématiquement, ainsi que l'influence de son environnement. De telles représentations peuvent également permettre de définir des modèles de prédiction de l'environnement (par exemple, profils de vent à venir pour une production éolienne, trajectoires futures des véhicules environnant pour une voiture autonome...). Enfin, l'utilisation des données peut fournir un pilotage du système s'adaptant à des comportements humains ou des situations opérationnelles variées, en reproduisant des comportements appris (par exemple, pilotage d'un robot avec une préhension fine adaptée à l'objet, reproduction de mouvement humains...).

De l'autre côté, l'introduction de tels outils de représentation fondés sur les données n'est pas sans poser des problématiques nouvelles et stimulantes pour les utiliser dans un contexte de boucle fermée afin d'en tirer un pilotage des systèmes à la fois efficace, performant et sécurisé. De telles modélisations implicites fondées sur les données demandent, en effet, à la fois de gérer la technique d'apprentissage pour maîtriser le compromis entre la complexité du modèle et sa représentativité, et d'adapter les méthodes de calcul de lois de commande existantes pour prendre en compte cette nouvelle classe de représentations. D'autres approches reposent sur le développement de nouvelles stratégies de calcul de la loi de commande purement fondées sur l'utilisation de données et d'expérimentations du système en ayant recours à des méthodologies d'imitation ou d'apprentissage par renforcement. Enfin, ces différentes approches conduisent à intégrer en boucle fermée de nouveaux objets issus d'un traitement des données, censées être représentatives des caractéristiques opérationnelles du système, mais qui restent par nature incomplètes de la diversité des situations observées lors du pilotage du système. Une attention toute particulière doit ainsi être apportée à la garantie de la stabilité et des performances du système piloté.

Cette séquence thématique se propose donc de donner une vue large des problématiques ingénieur liées à l'utilisation de méthodes de pilotage de systèmes fondées sur les données, depuis l'obtention d'un modèle de système dynamique adapté aux objectifs de commande jusqu'à l'implémentation de tels outils dans une boucle fermée.

Prérequis conseillés

Cours de première année du cursus CentraleSupélec généraliste « 1CC3000 Modélisation : Représentation et analyse des modèles »

Dans le cas d'étudiants n'ayant pas suivi le cursus de première année, la connaissance des notions de représentation d'état et d'identification par moindres carrés est conseillée.

Modules contexte et enjeux :

L'introduction de la séquence s'organise autour de trois demi-journées de formation visant à présenter la séquence, l'enseignement d'intégration et à introduire les enjeux de l'utilisation des approches fondées sur les données dans le contexte du pilotage des systèmes. En particulier, des conférenciers issus de grands groupes industriels, de start-ups ou du milieu académique viendront présenter les avancées actuelles dans le domaine.

Exemples de conférences (liste en cours de définition) :

- Approche basée sur les données pour la planification de la préhension robotique (CEA)
- Rendre les applications robotiques simples et rapides (1ms.ai)
- Intelligence artificielle pour le véhicule autonome (Safran)
- ...

Cours spécifique (60 HEE) : Approches de modélisation, identification et commande des systèmes fondées sur l'apprentissage

Ce cours spécifique a pour objectif de présenter aux étudiants la façon dont l'utilisation de l'intelligence artificielle, et plus particulièrement des approches fondées sur les données, peut changer le paradigme de la commande des systèmes dynamiques, tant du point de vue de la modélisation des systèmes, du calcul de la loi de commande en elle-même ou de la stratégie d'interaction avec l'environnement, que de l'analyse des propriétés obtenues pour le système piloté.

Apprentissages de systèmes dynamiques

Les techniques d'apprentissage, utilisant par exemple des réseaux de neurones, peuvent permettre d'obtenir un modèle du système à piloter à partir de données disponibles. Le cours présentera les principales structures de modèle, et exposera les avantages et inconvénients des réseaux feedforward et récurrents pour modéliser les systèmes dynamiques en termes de représentativité et de facilité d'apprentissage (cout computationnel, nombre de paramètres). Cette partie sera également l'occasion de faire le lien avec les techniques classiques d'identification (richesse des données, obtention des données mesurées ou simulées, sélection de modèles, identifiabilité...).

Calcul de lois de commande par apprentissage

Cette partie du cours se focalisera sur la conception de lois de commandes ou la détermination des paramètres de réglage par des approches fondées sur les données. Les méthodologies présentées pourront s'appuyer sur les modèles précédents utilisés comme modèles de prédiction, ou bien consister en un apprentissage direct de l'action de commande ou de la stratégie de pilotage à partir des données.

Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement consiste, pour un système autonome, à apprendre les actions à réaliser, à partir d'expériences, de façon à optimiser une récompense quantitative au cours du temps. Ainsi, ces méthodes s'inscrivent-elles de façon naturelle dans un formalisme de boucle fermée et d'interactions avec l'environnement pour définir un pilotage adéquat du système. Après une présentation formelle de ces approches, le cours sera illustré par des exemples en robotique (trajectoire optimale, préhension...) et plus généralement d'applications intégrant l'humain dans la boucle.

Ouverture aux problématiques de garanties de stabilité et de fonctionnement en boucle fermée

Le cours spécifique se terminera par une ouverture vers les problématiques de robustesse des systèmes pilotés en boucle fermée par des algorithmes fondées sur les données. Quelques exemples d'étude utilisant les outils de l'analyse de robustesse seront ainsi présentés pour garantir la stabilité et les performances des systèmes asservis utilisant de telles approches.

Enseignement d'intégration n°1 : Identification et commande de véhicules autonomes par approche data-driven

Partenaire associé : Safran

Lieu : Campus Paris-Saclay

Brève description :

Le cas d'étude retenu pour cet enseignement d'intégration sera constitué d'un drone devant se poser sur un véhicule terrestre en mouvement. Les étudiants devront mettre en œuvre une démarche d'ingénieur visant à définir et satisfaire un cahier des charges quant au pilotage de cet objet volant. Différentes tâches devront ainsi être réalisées par des groupes d'étudiants telles que :

- Obtention d'un modèle physique et d'un modèle fondé sur les données pour représenter le cas d'étude ; en particulier différentes structures de modèles obtenus par apprentissage pourront être testées et comparées ;
- Pré-traitement des données pour l'apprentissage (normalisation, suppression des données aberrantes, des biais des capteurs, du bruit, etc.)
- Identification des paramètres des modèles ;
- Développement d'un simulateur du cas d'étude ;
- Définition d'un cahier des charges pertinent pour l'application proposée ;
- Développement de stratégies de pilotage classiques à partir d'une approche de type Linéaire Quadratique (par exemple) utilisant les modèles déterminés précédemment ;
- Détermination de stratégies de pilotage fondées sur les données ;
- Mise en commun et comparaison des approches ;
- Réflexions sur les prolongements possibles de l'étude (estimateur du vent perturbateur, analyse de robustesse des lois de commande...)

Le partenaire industriel fournira des données et / ou un simulateur boîte noire permettant d'en générer ou de comparer les résultats.

2SC5910 – Approches de modélisation, identification et commande des systèmes fondées sur l'apprentissage

Responsables : **Guillaume Sandou**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours spécifique a pour objectif de présenter aux étudiants la façon dont l'utilisation de l'intelligence artificielle, et plus particulièrement des approches fondées sur les données, peut changer le paradigme de la commande des systèmes dynamiques, tant du point de vue de la modélisation des systèmes, du calcul de la loi de commande en elle-même ou de la stratégie d'interaction avec l'environnement, que de l'analyse des propriétés obtenues pour le système piloté

- **Apprentissages de systèmes dynamiques**

Les techniques d'apprentissage, utilisant par exemple des réseaux de neurones, peuvent permettre d'obtenir un modèle du système à piloter à partir de données disponibles. Le cours présentera les principales structures de modèle, et exposera les avantages et inconvénients des réseaux feedforward et récurrents pour modéliser les systèmes dynamiques en termes de représentativité et de facilité d'apprentissage (cout computationnel, nombre de paramètres). Cette partie sera également l'occasion de faire le lien avec les techniques classiques d'identification (richesse des données, obtention des données mesurées ou simulées, sélection de modèles, identifiabilité...).

- **Calcul de lois de commande par apprentissage**

Cette partie du cours se focalisera sur la conception de lois de commandes ou la détermination des paramètres de réglage par des approches fondées sur les données. Les méthodologies présentées pourront s'appuyer sur les modèles précédents utilisés comme modèles de prédiction, ou bien consister en un apprentissage direct de l'action de commande ou de la stratégie de pilotage à partir des données.

- **Apprentissage par renforcement**

L'apprentissage par renforcement consiste, pour un système autonome, à apprendre les actions à réaliser, à partir d'expériences, de façon à optimiser une récompense quantitative au cours du temps. Ainsi, ces méthodes s'inscrivent-elles de façon naturelle dans un formalisme de boucle fermée et d'interactions avec l'environnement pour définir un pilotage adéquat du système. Après une présentation formelle de ces approches, le cours sera illustré par des exemples en robotique (trajectoire optimale, préhension...) et plus généralement d'applications intégrant l'humain dans la boucle.

- **Ouverture aux problématiques de garanties de stabilité et de fonctionnement en boucle fermée**

Le cours spécifique se terminera par une ouverture vers les problématiques de robustesse des systèmes pilotés en boucle fermée par des algorithmes fondées sur les données. Quelques exemples d'étude utilisant les outils de l'analyse de robustesse seront ainsi présentés pour garantir la stabilité et les performances des systèmes asservis utilisant de telles approches.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours de première année du cursus CentraleSupélec généraliste « 1CC3000 Modélisation : Représentation et analyse des modèles »

Dans le cas d'étudiants n'ayant pas suivi le cursus de première année, la connaissance des notions de représentation d'état et d'identification par moindres carrés est conseillée.

Plan détaillé du cours (contenu)

Apprentissages de systèmes dynamiques

Partie 1 : Identification basée sur un modèle physique

- Moindres carrés, Moindres carrés récurrents
- Identification des systèmes non linéaires par algorithmes d'optimisation sans gradient
- TD sur PC avec application des deux méthodes

Partie 2 : Identification sans modèle physique

- Réseaux de neurones :
 - Présentation des réseaux de neurones
 - Présentation des algorithmes d'apprentissage
 - Présentation des méthodes annexes : pré-traitement des données, early stopping, etc.
 - Présentation des outils pour l'IA
 - TD sur PC : application de la méthode
- TP (3h) : Comparaison des approches (MCR, optimisation sans gradient, NN)

Partie 3 : Techniques de commande associées

- Méthodes diverses associées à ces modèles

Apprentissage par renforcement

Introduction à l'apprentissage par renforcement : introduction aux concepts et méthodes fondamentaux de l'apprentissage par renforcement (RL), un domaine clé de l'apprentissage automatique axé sur la prise de décision séquentielle. Les étudiants exploreront à la fois les bases théoriques et les applications pratiques, notamment la programmation dynamique, les méthodes de Monte Carlo, l'apprentissage par différence temporelle, et les techniques d'approximation de fonctions. Le cours met l'accent sur la compréhension des fonctions de valeur, des politiques de contrôle, du compromis entre exploration et exploitation, ainsi que des approches modernes impliquant les réseaux de neurones. À la fin du cours, les étudiants seront capables d'appliquer les algorithmes de RL à des problèmes concrets et de comprendre les orientations actuelles de la recherche dans ce domaine. Des exercices pratiques de programmation et des devoirs utilisant Python et des bibliothèques RL populaires pour renforcer l'apprentissage par la mise en œuvre

Déroulement, organisation du cours

- Cours et TDs issus d'application réelles
- TD impliquant l'implémentation d'algorithme d'apprentissage de commande en Python et Matlab sur les ordinateurs des étudiants
- TPs utilisant les maquettes du Département Automatique

Organisation de l'évaluation

- Compte rendu d'étude de laboratoire (activité obligatoire) : 25% de la note, en trinômes
- Examen écrit final 2h (individuel) : 75% de la note

Support de cours, bibliographie

- Maxime Pouilly-Caythelain - Synthèse de correcteurs s'adaptant à des critères multiples de haut niveau par la commande prédictive et les réseaux de neurones, thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2020
- Shai Shalev-Shwartz and Shai Ben-David. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. Cambridge University Press, 2014.
- Christopher M. Bishop. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2011.
- Trevor Hastie, Robert Tibshirani, and Jerome Friedman. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Second Edition, Springer, 2017.
- I. Goodfellow, Y. Bengio et A. Courville. Deep learning. MIT Press, 2016.
- SUTTON, Richard S. et BARTO, Andrew G. Reinforcement learning: An introduction. MIT press, 2018.

Moyens

- Equipe enseignante : Maxime Pouilly-Cathelain (Safran Electronics and Defense), Adam Abdin (Département GIO), Guillaume Sandou (Département Automatique)
- Maquettes expérimentales du Département Automatique

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les étudiants seront capables de :

- Appréhender l'intérêt et les limites du pilotage des systèmes en boucle fermée par les approches data driven
- Déterminer un modèle de système dynamique par des techniques d'apprentissage
- Maîtriser les algorithmes de régression et d'apprentissage potentiellement utilisables pour la commande des systèmes
- Piloter des systèmes dynamiques via l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage par renforcement

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences suivantes seront travaillées dans ce cours :

- C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

Elles seront évaluées dans l'enseignement d'intégration ST5 - 59 - EI : Identification et commande de véhicules autonomes par approche Data-driven.

2SC5990 – Identification et commande de véhicules autonomes par approche data-driven

Responsables : **Guillaume Sandou**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le pilotage des systèmes dynamiques repose sur l'utilisation de modèles et la caractérisation de ses interactions avec l'environnement (moyens d'actions, perturbations...). Si les approches classiques reposent essentiellement sur des modèles paramétriques et des équations analytiques, le développement des techniques d'apprentissage fondées sur des données mesurées ou simulées apportent des opportunités et des défis pour le domaine de la commande.

L'utilisation de données peut permettre de s'affranchir de l'étape préalable de modélisation physique du système en tirant parti des informations présentes dans les données entrées-sorties mesurées, afin de représenter son fonctionnement en intégrant implicitement les comportements non linéaires, mal connus ou difficiles à formaliser mathématiquement, ainsi que l'influence de son environnement. De telles représentations peuvent également permettre de définir des modèles de prédiction de l'environnement (par exemple, profils de vent à venir pour une production éolienne, trajectoires futures des véhicules environnant pour une voiture autonome...). Enfin, l'utilisation des données peut fournir un pilotage du système s'adaptant à des comportements humains ou des situations opérationnelles variées, en reproduisant des comportements appris (par exemple, pilotage d'un robot avec une préhension fine adaptée à l'objet, reproduction de mouvement humains...).

Le cas d'étude, défini en partenariat avec Safran Electronics and Defense, retenu pour cet enseignement d'intégration sera constitué d'un drone devant se poser sur un véhicule terrestre en mouvement.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Cours de première année du cursus CentraleSupélec généraliste « 1CC3000 Modélisation : Représentation et analyse des modèles »

Dans le cas d'étudiants n'ayant pas suivi le cursus de première année, la connaissance des notions de représentation d'état et d'identification par moindres carrés est conseillée.

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cas d'étude retenu pour cet enseignement d'intégration sera constitué d'un drone devant se poser sur un véhicule terrestre en mouvement. Les étudiants devront mettre en œuvre une démarche d'ingénieur visant à définir et satisfaire un cahier des charges quant au pilotage de cet objet volant. Différentes tâches devront ainsi être réalisées par des groupes d'étudiants telles que :

- Obtention d'un modèle physique et d'un modèle fondé sur les données pour représenter le cas d'étude ; en particulier différentes structures de modèles obtenus par apprentissage pourront être testées et comparées ;
- Pré-traitement des données pour l'apprentissage (normalisation, suppression des données aberrantes, des biais des capteurs, du bruit, etc.)
- Identification des paramètres des modèles ;
- Développement d'un simulateur du cas d'étude ;

- Définition d'un cahier des charges pertinent pour l'application proposée ;
- Développement de stratégies de pilotage classiques à partir d'une approche de type Linéaire Quadratique (par exemple) utilisant les modèles déterminés précédemment ;
- Détermination de stratégies de pilotage fondées sur les données ;
- Mise en commun et comparaison des approches ;
- Réflexions sur les prolongements possibles de l'étude (estimateur du vent perturbateur, analyse de robustesse des lois de commande...)

Le partenaire industriel fournira des données et / ou un simulateur boîte noire permettant d'en générer ou de comparer les résultats.

Déroulement, organisation du cours

Fonctionnement de type projet, avec un encadrement des enseignants du Département Automatique et des ingénieurs de recherche de Safran Electronics and Defense.

Les étudiants devront se répartir les tâches, et avancer sur les différents jalons proposés durant la semaine, avant une mise en commun des différents algorithmes de résultats obtenus.

Un point d'avancement avec les objectifs court-terme sera effectué chaque journée.

Organisation de l'évaluation

Evaluation (note sur 20 pour le module et PASS/FAIL pour les compétences C1, C2, C4, C6 et C7) à partir des livrables demandés :

- Rapport d'étude ;
- Soutenance orale ;
- Codes et programmes développés incluant un mode d'emploi.

Les compétences seront évaluées à partir de grilles critériées

Support de cours, bibliographie

- Maxime Pouilly-Caythelain - Synthèse de correcteurs s'adaptant à des critères multiples de haut niveau par la commande prédictive et les réseaux de neurones, thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2020
- Shai Shalev-Shwartz and Shai Ben-David. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. Cambridge University Press, 2014.
- Christopher M. Bishop. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2011.
- Trevor Hastie, Robert Tibshirani, and Jerome Friedman. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Second Edition, Springer, 2017.
- I. Goodfellow, Y. Bengio et A. Courville. Deep learning. MIT Press, 2016.
- SUTTON, Richard S. et BARTO, Andrew G. Reinforcement learning: An introduction. MIT press, 2018.

Moyens

Encadrement :

- Enseignants du Département Automatique
- Ingénieurs de recherche de Safran Electronics and Defense

Utilisation des ordinateurs des étudiants (Python - Matlab)

Le partenaire industriel fournira des données et / ou un simulateur boîte noire permettant d'en générer ou de comparer les résultats.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de ce cours, les étudiants seront capables de :

- Appréhender l'intérêt et les limites du pilotage des systèmes en boucle fermée par les approches data driven
- Déterminer un modèle de système dynamique par des techniques d'apprentissage par réseaux de neurones
- Maîtriser les algorithmes de régression et d'apprentissage potentiellement utilisables pour la commande des systèmes
- Calculer une loi de commande et des algorithmes d'optimisation par des approches data driven

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le module sera l'occasion de travailler les compétences suivantes :

- C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
- C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 - Savoir convaincre

ST5- MOBILITÉ AUTOMATISÉE CONNECTÉE ET COOPÉRATIVE

Dominante : SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)

Langue d'enseignement : Anglais

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur :

Les Véhicules Autonomes Coopératifs et Connectés (CCAVs, pour Cooperative Connected Autonomous Vehicles) représentent un changement de paradigme dans le futur des transports, où les véhicules ne sont pas seulement autonomes, mais communiquent et coopèrent également entre eux ainsi qu'avec les infrastructures environnantes. Cette intégration novatrice de systèmes autonomes, de communications véhicule-à-véhicule (V2V pour Vehicle-to-Vehicle) et véhicule-à-infrastructure (V2I pour Vehicle-to-Infrastructure), ainsi que de traitement de données avancé, a le potentiel de révolutionner les systèmes de mobilité. Cependant, cette transition soulève d'importants défis scientifiques et technologiques, notamment en ce qui concerne le partage de données en temps réel, la fiabilité des systèmes, et l'interaction fluide entre véhicules autonomes et véhicules conduits par des humains dans des environnements de circulation mixte.

L'un des principaux obstacles scientifiques réside dans le développement d'algorithmes robustes de prise de décision coopérative, garantissant la sécurité et l'efficacité dans des scénarios routiers complexes et dynamiques. Les systèmes de communication doivent être ultra-fiables, à faible latence et à large bande passante, afin de permettre une coordination en temps réel entre véhicules et infrastructures. Par ailleurs, le besoin en capteurs avancés, en modèles d'apprentissage automatique, et en intégration poussée avec les systèmes de gestion du trafic urbain pose d'importants défis techniques, nécessitant des recherches interdisciplinaires dans des domaines tels que l'intelligence artificielle, la robotique et les télécommunications.

Au-delà des considérations technologiques, les CCAVs ont également des implications environnementales et sociétales profondes. Sur le plan environnemental, leur adoption à grande échelle pourrait contribuer à la réduction des émissions en optimisant les flux de circulation, en diminuant la consommation de carburant et en facilitant la transition vers les véhicules électriques. Leur nature coopérative permet une meilleure gestion du trafic, susceptible de réduire les embouteillages et la pollution de l'air. Sur le plan sociétal, cependant, l'intégration des CCAVs soulève des questions d'équité, de protection de la vie privée, de déplacement d'emplois dans des secteurs comme la conduite, ainsi que des enjeux juridiques et éthiques concernant la prise de décision automatisée en cas d'accident.

À l'échelle mondiale, les CCAVs offrent des perspectives prometteuses en matière de mobilité durable, notamment alors que les villes et les nations cherchent à atteindre des objectifs climatiques et à concevoir des systèmes de transport plus efficaces et plus équitables. En réduisant la dépendance à l'automobile individuelle, en améliorant les réseaux de transport public et en renforçant la sécurité routière, les CCAVs contribuent à la vision de villes intelligentes, vertes et inclusives. Toutefois, leur déploiement réussi nécessite une coopération internationale dans l'élaboration de normes, de réglementations, et d'investissements en infrastructures afin d'assurer une répartition équitable des bénéfices de cette technologie à l'échelle mondiale.

Le développement des CCAVs exige une approche multidisciplinaire, combinant des expertises en perception, prise de décision, fusion de données et contrôle. La perception repose sur des technologies de capteurs avancées telles que le LiDAR, le radar et les caméras, associées à des algorithmes d'apprentissage automatique pour interpréter l'environnement et détecter les obstacles, les piétons et les autres véhicules. En matière de prise de décision, les algorithmes doivent analyser les données en temps réel afin de prendre des décisions de conduite sûres et efficaces, en tenant compte à la fois de la dynamique du véhicule et des facteurs environnementaux. La fusion de capteurs est essentielle, nécessitant une expertise en traitement du signal pour combiner les données issues de capteurs variés en une représentation cohérente de l'environnement du véhicule. Les systèmes de contrôle, issus de la robotique et du génie des systèmes, assurent la manœuvre précise du véhicule en traduisant les décisions de haut niveau en commandes de bas niveau agissant sur l'accélération, le freinage et la direction. Ces domaines doivent également interagir avec les technologies de communication pour la coordination V2V et V2I ce qui requiert des notions en réseaux sans fil, cybersécurité et protocoles de données.

Au cours de cette séquence thématique, les étudiants recevront une formation approfondie portant sur les méthodes de deep learning appliquées à la perception, les protocoles de communication et leur implémentation, ainsi que sur la théorie de la décision et ses applications opérationnelles. À l'issue de plusieurs tables rondes consacrées à l'analyse des grands enjeux internationaux de la mobilité automatisée connectée et coopérative (CCAM – Connected and Cooperative Automated Mobility), un cycle structuré de cours et de masterclasses leur fournira les bases conceptuelles et techniques nécessaires pour s'engager dans un mini-défi appliqué. Ce mini-défi constituera un exercice d'intégration au cours duquel les étudiants devront concevoir, mettre en œuvre et optimiser les systèmes de perception et de comportement de mini-véhicules autonomes.

Prérequis conseillés

Pour suivre cette séquence thématique dans des conditions optimales et en tirer le meilleur parti, il est recommandé d'avoir validé les cours suivants : Systèmes électroniques (cours SPI) et Réseaux et sécurité (cours SPI).

Module contexte et enjeux

Ce module se compose d'une série de tables rondes visant à offrir une vue d'ensemble approfondie des enjeux liés à la CCAM, en croisant les regards d'acteurs industriels, de chercheurs académiques et de représentants d'associations professionnelles. Trois tables rondes sont prévues, chacune d'une durée de trois heures. Chaque session comprendra une brève présentation de chaque intervenant, suivie d'un débat modéré autour du thème central, puis d'un temps d'échange avec le public sous forme de questions-réponses.

La première table ronde portera sur les défis et objectifs stratégiques de la CCAM du point de vue des territoires, des associations professionnelles et des usagers. La deuxième abordera les principaux verrous scientifiques et techniques à l'innovation dans le domaine de la CCAM. La troisième se concentrera sur le déploiement, l'intégration à grande échelle et l'opérationnalisation des technologies CCAM.

Des acteurs clés français tels que Renault, Stellantis, Beti, Milla, la Plateforme Automobile (PFA) et d'autres interviendront tout au long de ce module pour partager leur expertise et leurs perspectives.

Intervenants invités pour la table ronde 1 : CPS, CD78, Mairie de Paris [à confirmer], AFT, PFA.

Intervenants invités pour la table ronde 2 : Stellantis, Renault, Valeo, Twinswheel, Spirops.

Intervenants invités pour la table ronde 3 : Vinci, RATP, SNCF, Beti, Milla.

Cours spécifique (60 HEE)

Titre : Perception, connectivité, et fusion/décision pour la CCAM

Ce cours spécifique est structuré en quatre modules distincts, chacun portant sur un aspect clé de la CCAM. À l'issue de chaque module, une masterclass guidera les étudiants dans la mise en œuvre de systèmes de comportement pour véhicules autonomes, avec un accent particulier sur les approches basées sur des règles. Ces masterclasses sont conçues pour faciliter l'intégration et le déploiement d'algorithmes sur des véhicules autonomes miniatures (mini-AVs – miniature Autonomous Vehicles), constituant ainsi une préparation concrète au projet d'intégration final.

Module 1 : Apprentissage profond pour la CCAM (5 leçons)

Ce module explorera l'intégration des applications d'apprentissage profond dans les véhicules autonomes. Les étudiants comprendront comment les réseaux de neurones sont utilisés pour les tâches de perception, de classification et de prédiction dans les systèmes de CCAM.

- **Introduction à l'apprentissage profond dans la CCAM – 1h30**

Cette leçon présentera un aperçu général de la CCAM et des défis qui y sont associés, en mettant en lumière le rôle de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage profond pour y répondre. Elle proposera une perspective historique, exposera les tendances actuelles du domaine et illustrera des cas d'usage concrets de l'apprentissage profond dans les scénarios de conduite autonome.

- **Architectures de réseaux de neurones en CCAM – 1h30**

Cette leçon introduira les concepts fondamentaux des réseaux de neurones, notamment les perceptrons et les fonctions d'activation. Elle couvrira les réseaux de neurones convolutifs (CNN – *Convolutional Neural Networks*) pour le traitement d'image, les réseaux récurrents (RNN – *Recurrent Neural Networks*) pour les données séquentielles, ainsi que l'utilisation des Transformers dans les systèmes autonomes. Les processus d'apprentissage, les techniques de validation et les métriques d'évaluation des performances seront également abordés.

- **Intégration des modèles d'apprentissage profond dans les systèmes embarqués – 1h30**

Cette leçon explorera les contraintes liées au traitement en temps réel dans les véhicules autonomes, en comparant les approches Edge AI et cloud. Elle introduira des techniques d'optimisation des modèles telles que

l'élagage (*pruning*), la quantification (*quantization*) et la distillation des connaissances (*knowledge distillation*). Les étudiants étudieront également l'intégration logicielle et matérielle à travers des plateformes telles que ROS et NVIDIA Jetson.

- **Apprentissage profond pour la détection et le suivi d'objets en CCAM – 1h30**

Cette leçon présentera les principaux algorithmes utilisés pour la détection d'objets, notamment YOLO, SSD et Faster R-CNN. Elle couvrira également des méthodes de suivi telles que les filtres de Kalman et Deep SORT. Les étudiants apprendront à évaluer les performances des modèles à l'aide de métriques comme l'IoU, le mAP et la précision de suivi (*tracking accuracy*). La leçon abordera également la sélection des jeux de données, les outils d'annotation et les bonnes pratiques de préparation des données d'apprentissage.

- **Masterclass : Déploiement d'un modèle d'apprentissage profond dans un environnement simulé de CCAM – 1h30**

Cette masterclass proposera aux étudiants une simulation pratique d'un système perception-contrôle en boucle fermée, appliqué à des scénarios d'urgence. En utilisant des outils tels que CARLA ou LGSVL, les étudiants déploieront et évalueront des modèles d'apprentissage profond, effectueront des opérations de débogage et d'optimisation, puis participeront à une discussion de groupe pour partager leurs expériences et recueillir des retours.

Module 2 : Fusion de données pour la CCAM (5 leçons)

Ce module se concentrera sur la fusion des capteurs et des plateformes de perception, en examinant comment des sources de données hétérogènes peuvent être combinées pour former une compréhension unifiée de l'environnement. Différentes stratégies de fusion — fusion précoce (*early fusion*), fusion intermédiaire (*intermediate fusion*) et fusion tardive (*late fusion*) — seront étudiées.

- **Introduction aux concepts de fusion de capteurs et de données – 1h30**

Cette leçon introduira la motivation de l'utilisation de la fusion de données dans la CCAM, en présentant les rôles et caractéristiques de divers capteurs tels que les caméras, LiDAR, radar, GPS et unités de mesure inertielle (IMUs – *Inertial Measurement Units*). Elle explorera les défis liés à l'intégration des données hétérogènes des capteurs et fournira un aperçu des architectures courantes des systèmes de fusion.

- **Techniques de fusion précoce et applications en CCAM – 1h30**

Cette leçon expliquera le concept et les avantages des techniques de fusion précoce. Elle couvrira les méthodes d'alignement et de calibration des capteurs, les stratégies de synchronisation des données, et présentera des applications concrètes de la fusion précoce dans les systèmes de perception utilisés par les véhicules autonomes.

- **Fusion intermédiaire : principes et études de cas – 1h30**

Cette leçon explorera la fusion au niveau des caractéristiques (*feature-level fusion*) et l'utilisation de représentations de niveau intermédiaire dans le traitement des données des capteurs. Elle introduira les réseaux de fusion, les techniques d'apprentissage multimodal, et inclura des études de cas issues de recherches récentes pour illustrer l'application pratique de la fusion intermédiaire.

- **Techniques de fusion tardive et exemples concrets – 1h30**

Cette leçon se concentrera sur les approches de fusion au niveau décisionnel, incluant des techniques telles que le vote majoritaire, l'inférence bayésienne et la théorie de Dempster-Shafer. Elle abordera également les enjeux au niveau système tels que la fiabilité, la redondance et la tolérance aux pannes, avec des exemples de fusion tardive dans des systèmes CCAM déployés.

- **Masterclass : Application de la fusion de données – 1h30**

Cette masterclass guidera les étudiants dans la mise en œuvre d'un système perception-contrôle en boucle fermée, dans le cadre de scénarios d'urgence en CCAM. Les étudiants appliqueront des techniques de fusion de données pour relever les défis rencontrés lors du mini-défi, définiront les modèles de problème et les résultats attendus, identifieront des solutions techniques, construiront une chaîne de traitement des données, entraîneront des modèles à partir de jeux de données fournis et générés, puis testeront leurs solutions sur des scénarios enregistrés.

Module 3 : Connectivité pour les applications C-ITS (5 leçons)

Ce module offrira une analyse approfondie des technologies de communication et des protocoles clés utilisés dans les Systèmes de Transport Intelligents Coopératifs (C-ITS – *Cooperative Intelligent Transport Systems*), en mettant l'accent sur la communication Véhicule-à-Tout (V2X – *Vehicle-to-Everything*).

- **Fondamentaux des Systèmes de Transport Intelligents Connectés (C-ITS) – 1h30**

Cette leçon introduira l'architecture et les principes fondamentaux des C-ITS, en soulignant leur importance dans la gestion du trafic, la sécurité routière et la mobilité urbaine. Elle couvrira les normes clés, les rôles des différents acteurs, ainsi que les cadres politiques et réglementaires pertinents qui orientent le déploiement des C-ITS.

- **Présentation des technologies V2X et des principaux protocoles – 1h30**

Cette leçon présentera les différents types de communication V2X : Véhicule-à-Véhicule (V2V – *Vehicle-to-Vehicle*), Véhicule-à-Infrastructure (V2I – *Vehicle-to-Infrastructure*), Véhicule-à-Piéton (V2P – *Vehicle-to-Pedestrian*) et Véhicule-à-Réseau (V2N – *Vehicle-to-Network*). Elle examinera les cas d'usage liés à la sécurité, à l'efficacité et à l'infodivertissement, explorera les ensembles de messages V2X et les piles de communication, et offrira une comparaison détaillée des technologies V2X en termes d'utilisation du

spectre, de latence et de barrières au déploiement. La leçon abordera également l'interopérabilité et la rétrocompatibilité entre les différents protocoles.

- **Aspects de sécurité et de confidentialité des communications V2X – 1h30**
Cette leçon étudiera les enjeux critiques de sécurité et de confidentialité dans les systèmes V2X. Les étudiants apprendront à reconnaître les menaces courantes telles que l'usurpation d'identité (*spoofing*), la manipulation des données et les attaques par déni de service. Les concepts clés de sécurité — tels que l'Infrastructure à Clé Publique (*PKI – Public Key Infrastructure*), les signatures numériques et la gestion des certificats — seront présentés pour garantir l'authenticité et l'intégrité des messages. La leçon abordera également les techniques de préservation de la vie privée destinées à protéger l'identité et la localisation des utilisateurs, conciliant conformité réglementaire et confiance des usagers.
- **Études de cas sur les applications de connectivité en CCAM – 1h30**
Cette leçon explorera les mises en œuvre réelles et les projets pilotes liés à la connectivité dans le contexte de la CCAM. Les étudiants analyseront des études de cas, des évaluations basées sur la simulation, ainsi que des analyses quantitatives des impacts de la connectivité sur le flux de trafic, la sécurité et l'expérience utilisateur. Les enseignements tirés et les problématiques de montée en échelle seront également discutés.
- **Masterclass : Application pratique de la communication V2X – 1h30**
Cette masterclass accompagnera les étudiants dans la simulation de scénarios de communication V2X à l'aide d'outils tels que NS-3 ou SUMO. Ils mettront en œuvre des cas d'usage V2V et V2I, suivront la performance des communications, et analyseront les résultats. Des présentations de groupe favoriseront la discussion et l'évaluation critique des choix techniques et des résultats obtenus.

Module 4 : Prise de décision dans la CCAM (4 cours)

Ce dernier module couvrira les principaux algorithmes de prise de décision utilisés dans la CCAM, depuis les systèmes basés sur des règles jusqu'aux stratégies avancées pilotées par l'intelligence artificielle.

- **Introduction aux cadres de prise de décision dans la mobilité automatisée – 1h30**
Cette leçon introduira les principaux cadres de prise de décision au sein de l'architecture de conduite autonome, en distinguant les stratégies de planification délibérative des comportements réactifs. Il explorera des modèles tels que les machines à états finis (*FSM – Finite State Machines*), les arbres de comportement (*behavior trees*) et les processus décisionnels de Markov partiellement observables (*POMDP – Partially Observable Markov Decision Processes*), tout en abordant les contraintes de sécurité, les considérations éthiques et les cadres juridiques pertinents pour la prise de décision dans les systèmes CCAM.
- **Systèmes de décision basés sur des règles et leurs applications – 1h30**
Cette leçon examinera la structure et l'utilisation des systèmes de décision basés sur des règles, en particulier dans le contexte de la conduite urbaine, du respect du code de la route et des interactions avec des véhicules conduits par des humains. Les étudiants apprendront l'encodage des règles, la priorisation des actions et les stratégies adaptées à des scénarios spécifiques. Le cours s'appuiera également sur des exemples issus de compétitions robotiques telles que RoboCup et des défis de conduite autonome.
- **Algorithmes avancés de prise de décision (IA, apprentissage automatique, théorie des jeux) – 1h30**
Cette leçon explorera des approches avancées de prise de décision, incluant l'apprentissage par renforcement, l'apprentissage profond par renforcement et l'apprentissage par imitation. Il abordera également les modèles hybrides combinant logique basée sur des règles et stratégies d'apprentissage. Les limites pratiques et les défis de déploiement, tels que la généralisation, la sécurité et l'explicabilité, seront également discutés.
- **Masterclass : Développement et application de la prise de décision basée sur des règles dans un scénario CCAM – 1h30**
Cette masterclass proposera un atelier pratique de développement d'un agent de prise de décision basé sur des règles pour un scénario CCAM prédéfini en simulation. Les étudiants implémenteront la logique nécessaire pour gérer les interactions avec l'infrastructure routière (par exemple, les panneaux de signalisation), évalueront les performances en comparaison avec des modèles basés sur l'apprentissage, et présenteront une synthèse finale détaillant leur conception, leurs choix d'implémentation, leurs résultats et les enseignements tirés.

Enseignement d'intégration

Partenaire R&D : VEDECOM
Lieu : Campus Paris-Saclay

Le Grand Challenge DARPA de 2004 a marqué un tournant dans le développement de la mobilité automatisée en lançant une compétition où des équipes devaient concevoir des véhicules autonomes capables d'accomplir un ensemble de missions prédéfinies. Cet événement révolutionnaire a considérablement accéléré les progrès dans le domaine de la CCAM et nombre des leaders actuels et organisations majeures en conduite autonome trouvent leur origine dans les équipes ayant participé à ce défi.

Titre : Mini-défi sur la CCAM

Le cours d'intégration prendra la forme d'un mini-défi utilisant des véhicules autonomes à l'échelle réduite 1/10. Le thème pourra varier d'une année à l'autre. Les étudiants seront répartis en équipes pour relever le défi proposé. Pour l'édition 2025, l'objectif sera de mettre en œuvre des systèmes de perception, de planification et de connectivité sur un véhicule afin de remplir deux missions spécifiques : s'adapter aux changements de limitations de vitesse légales via des entrées connectées, et réaliser l'évitement dynamique d'obstacles grâce à la prédiction de trajectoire. Les véhicules seront pré-équipés de capteurs, d'unités de calcul embarquées, de modules de connectivité ainsi que d'un algorithme de contrôle de base. Ce système de contrôle existant sera étudié puis optimisé par les étudiants. Pour réussir, ces derniers devront appliquer leurs connaissances en apprentissage profond (deep learning) pour la reconnaissance de motifs et la prévision de trajectoires, déployer des protocoles de C-ITS pour l'échange de données, et implémenter des stratégies de prise de décision pour l'évitement d'obstacles en temps réel.

Le cours d'intégration prendra la forme d'un mini-défi utilisant des véhicules autonomes à l'échelle réduite 1/10. Le thème pourra évoluer chaque année, les étudiants travaillant en équipes autour d'un objectif précis. Pour l'édition 2027, l'objectif sera la mise en œuvre d'un système de convoi automatisé (*platooning*), nécessitant l'intégration de multiples composantes en perception, prise de décision, contrôle et communication. Les étudiants développeront des systèmes de perception utilisant des capteurs tels que LiDAR et caméras pour détecter l'environnement et maintenir des distances de sécurité entre les véhicules. Des algorithmes de prise de décision permettront à chaque véhicule d'adapter sa vitesse et sa position en fonction des données en temps réel. Les techniques de fusion de capteurs combineront les informations provenant de tous les véhicules du convoi afin d'assurer une coordination et une cohérence optimales. Les systèmes de contrôle gèreront l'accélération, le freinage et la direction pour suivre précisément le véhicule leader. La communication V2V sera essentielle pour maintenir un mouvement synchronisé et garantir la sécurité au sein du convoi. Ce mini-défi mobilisera une approche multidisciplinaire, combinant expertise en intelligence artificielle, robotique, technologies de communication et théorie du contrôle. Il illustrera comment l'autonomie collaborative peut conduire à un transport plus sûr et plus efficace, tout en réduisant la consommation de carburant et en optimisant l'usage des infrastructures routières.

Equipe pédagogique

Mohamed-Cherif RAHAL, PhD

Steve PECHBERTI

Pierre MERDRIGNAC, PhD

Olivier ORFILA, PhD, directeur scientifique de VEDECOM, coordinateur de la ST pour VEDECOM

Antoine O. BERTHET, PhD, responsable et coordinateur de la ST pour CentraleSupélec

Raul DE LACERDA, PhD

Salah EL AYOUBI, PhD

2SC6010 – Perception, connectivité, et fusion-décision pour la mobilité automatisée

Responsables : **Antoine Berthet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les Véhicules Autonomes Coopératifs et Connectés (CCAVs, pour Cooperative Connected Autonomous Vehicles) représentent un changement de paradigme dans le futur des transports, où les véhicules ne sont pas seulement autonomes, mais communiquent et coopèrent également entre eux ainsi qu'avec les infrastructures environnantes. Cette intégration novatrice de systèmes autonomes, de communications véhicule-à-véhicule (V2V pour Vehicle-to-Vehicle) et véhicule-à-infrastructure (V2I pour Vehicle-to-Infrastructure), ainsi que de traitement de données avancé, a le potentiel de révolutionner les systèmes de mobilité. Cependant, cette transition soulève d'importants défis scientifiques et technologiques, notamment en ce qui concerne le partage de données en temps réel, la fiabilité des systèmes, et l'interaction fluide entre véhicules autonomes et véhicules conduits par des humains dans des environnements de circulation mixte.

L'un des principaux obstacles scientifiques réside dans le développement d'algorithmes robustes de prise de décision coopérative, garantissant la sécurité et l'efficacité dans des scénarios routiers complexes et dynamiques. Les systèmes de communication doivent être ultra-fiables, à faible latence et à large bande passante, afin de permettre une coordination en temps réel entre véhicules et infrastructures. Par ailleurs, le besoin en capteurs avancés, en modèles d'apprentissage automatique, et en intégration poussée avec les systèmes de gestion du trafic urbain pose d'importants défis techniques, nécessitant des recherches interdisciplinaires dans des domaines tels que l'intelligence artificielle, la robotique et les télécommunications.

Au-delà des considérations technologiques, les CCAVs ont également des implications environnementales et sociétales profondes. Sur le plan environnemental, leur adoption à grande échelle pourrait contribuer à la réduction des émissions en optimisant les flux de circulation, en diminuant la consommation de carburant et en facilitant la transition vers les véhicules électriques. Leur nature coopérative permet une meilleure gestion du trafic, susceptible de réduire les embouteillages et la pollution de l'air. Sur le plan sociétal, cependant, l'intégration des CCAVs soulève des questions d'équité, de protection de la vie privée, de déplacement d'emplois dans des secteurs comme la conduite, ainsi que des enjeux juridiques et éthiques concernant la prise de décision automatisée en cas d'accident.

À l'échelle mondiale, les CCAVs offrent des perspectives prometteuses en matière de mobilité durable, notamment alors que les villes et les nations cherchent à atteindre des objectifs climatiques et à concevoir des systèmes de transport plus efficaces et plus équitables. En réduisant la dépendance à l'automobile individuelle, en améliorant les réseaux de transport public et en renforçant la sécurité routière, les CCAVs contribuent à la vision de villes intelligentes, vertes et inclusives. Toutefois, leur déploiement réussi nécessite une coopération internationale dans l'élaboration de normes, de réglementations, et d'investissements en infrastructures afin d'assurer une répartition équitable des bénéfices de cette technologie à l'échelle mondiale.

Le développement des CCAVs exige une approche multidisciplinaire, combinant des expertises en perception, prise de décision, fusion de données et contrôle. La perception repose sur des technologies de capteurs avancées telles que le LiDAR, le radar et les caméras, associées à des algorithmes d'apprentissage automatique pour interpréter l'environnement et détecter les obstacles, les piétons et les autres véhicules. En matière de prise de décision, les algorithmes doivent analyser les données en temps réel afin de prendre des décisions de conduite sûres et efficaces, en tenant compte à la fois de la dynamique du véhicule et des facteurs environnementaux. La fusion de capteurs est essentielle, nécessitant une expertise en traitement du signal pour combiner les données issues de capteurs variés en une représentation cohérente de l'environnement du véhicule. Les systèmes de contrôle, issus de la robotique et du génie des systèmes, assurent la manœuvre précise du véhicule en traduisant les décisions de haut niveau en commandes de bas niveau agissant sur l'accélération, le freinage et la direction. Ces domaines doivent également interagir avec les technologies de

communication pour la coordination V2V et V2I ce qui requiert des notions en réseaux sans fil, cybersécurité et protocoles de données.

Au cours de la séquence thématique, les étudiants recevront une formation approfondie portant sur les méthodes de deep learning appliquées à la perception, les protocoles de communication et leur implémentation, ainsi que sur la théorie de la décision et ses applications opérationnelles.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Pour suivre cette séquence thématique dans des conditions optimales et en tirer le meilleur parti, il est recommandé d'avoir validé les cours suivants : Systèmes électroniques (cours SPI) et Réseaux et sécurité (cours SPI).

Plan détaillé du cours (contenu)

Le programme débutera par une série de tables rondes visant à examiner les enjeux mondiaux liés à la Mobilité Automatisée Connectée et Coopérative (CCAM). Ces sessions seront suivies d'un module spécifique structuré, composé de cours magistraux et de masterclasses. Les bases théoriques et techniques acquises seront ensuite utilisées dans l'exercice d'intégration 2SC6090, en fin de séquence thématique.

Le module "contexte et enjeux" se compose d'une série de tables rondes visant à offrir une vue d'ensemble approfondie des enjeux liés à la CCAM, en croisant les regards d'acteurs industriels, de chercheurs académiques et de représentants d'associations professionnelles. Trois tables rondes sont prévues, chacune d'une durée de trois heures. Chaque session comprendra une brève présentation de chaque intervenant, suivie d'un débat modéré autour du thème central, puis d'un temps d'échange avec le public sous forme de questions-réponses. La première table ronde portera sur les défis et objectifs stratégiques de la CCAM du point de vue des territoires, des associations professionnelles et des usagers. La deuxième abordera les principaux verrous scientifiques et techniques à l'innovation dans le domaine de la CCAM. La troisième se concentrera sur le déploiement, l'intégration à grande échelle et l'opérationnalisation des technologies CCAM. Des acteurs clés français tels que Renault, Stellantis, Beti, Milla, la Plateforme Automobile (PFA) et d'autres interviendront tout au long de ce module pour partager leur expertise et leurs perspectives.

Le cours spécifique 2SC6010 de la séquence thématique, intitulé "Perception, connectivité, et fusion/décision pour la CCAM", est structuré en quatre modules distincts – chacun portant sur un aspect clé de la CCAM – précédés de trois séances introductives. Des masterclasses guideront les étudiants dans la mise en œuvre de systèmes de comportement pour véhicules autonomes, avec un accent particulier sur les approches à base de modèles et lois. Ces masterclasses sont conçues pour faciliter l'intégration et le déploiement d'algorithmes sur des véhicules autonomes miniatures (mini-AVs – miniature Autonomous Vehicles), constituant ainsi une préparation concrète au projet d'intégration final.

Introduction : aperçu de la CCAM, aspects éthiques et juridiques (3 séances)

Ces séances introductives offrent une vue d'ensemble complète du CCAM, en mettant en lumière ses concepts clés ainsi que ses fondements technologiques. Par ailleurs, ces séances abordent les principales considérations éthiques et les cadres juridiques essentiels à la mise en œuvre et à l'exploitation des systèmes CCAM.

Module 1 : Apprentissage profond pour la CCAM (4 séances)

Ce module explorera l'intégration des applications d'apprentissage profond dans les véhicules autonomes. Les étudiants comprendront comment les réseaux de neurones sont utilisés pour les tâches de perception, de classification et de prédiction dans les systèmes de CCAM.

Module 2 : Fusion de données pour la CCAM (4 séances)

Ce module se concentrera sur la fusion des capteurs et des plateformes de perception, en examinant comment des sources de données hétérogènes peuvent être combinées pour former une compréhension unifiée de l'environnement. Différentes stratégies de fusion — fusion précoce (early fusion), fusion intermédiaire (intermediate fusion) et fusion tardive (late fusion) — seront étudiées.

Module 3 : Connectivité pour les applications C-ITS (4 séances)

Ce module offrira une analyse approfondie des technologies de communication et des protocoles clés utilisés dans les Systèmes de Transport Intelligents Coopératifs (C-ITS – Cooperative Intelligent Transport Systems), en mettant l'accent sur la communication Véhicule-à-Tout (V2X – Vehicle-to-Everything).

Module 4 : Prise de décision dans la CCAM (4 séances)

Ce dernier module couvrira les principaux algorithmes de prise de décision utilisés dans la CCAM, depuis les systèmes basés sur des règles jusqu'aux stratégies avancées pilotées par l'intelligence artificielle.

Le cours d'intégration 2SC6090 prendra la forme d'un mini-défi utilisant des outils de simulations et/ou véhicules autonomes à l'échelle réduite 1/10. Le thème pourra varier d'une année à l'autre. Les étudiants seront répartis en équipes pour relever le défi proposé.

Déroulement, organisation du cours

La méthode pédagogique suivie est la suivante : série de tables rondes; cours spécifique, composé de cours magistraux et de masterclasses en parallèle au module obligatoire de la séquence thématique; puis mise en pratique de l'ensemble des concepts et méthodes présentés dans l'exercice d'intégration 2SC6090, en fin de séquence thématique.

Organisation de l'évaluation

La méthode d'évaluation consistera en un examen final écrit sur table de 2h sans documents et sans connexion Internet.

Support de cours, bibliographie

Les supports de cours consisteront principalement en une collection de transparents projetés en cours. Les étudiants y trouveront un grand nombre de références bibliographiques.

Moyens

L'équipe enseignante est principalement composée de membres de VEDECOM, tous experts dans le domaine de la CCAM. Les responsables des différents modules du cours spécifiques sont : Olivier ORFILA, PhD ; Mohamed-Cherif RAHAL, PhD ; Pierre MERDRIGNAC, PhD ; et Steve PECHBERTI.

L'Institut VEDECOM est un institut de recherche et d'innovation public-privé français dédié à la mobilité du futur, basé à Versailles. Il rassemble des acteurs industriels, académiques et institutionnels autour de projets collaboratifs dans les domaines des véhicules autonomes, connectés, électrifiés et de la mobilité partagée. VEDECOM joue un rôle clé dans le développement de technologies de rupture, tout en contribuant à la normalisation, à la formation et à la réflexion sociétale sur les nouveaux usages de la mobilité. Olivier ORFILA en est le directeur scientifique.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin du cours, les étudiants seront en mesure de :

- Comprendre les concepts fondamentaux liés à la perception embarquée, à la fusion de données, à la prise de décision automatisée et aux communications V2V/V2I dans le contexte des véhicules autonomes coopératifs et connectés ;
- Concevoir et modéliser un ensemble ou des parties d'un système de CCAVs, incluant les chaînes de perception, de communication et de contrôle, et évaluer les performances de ces systèmes, soit analytiquement (modèles, métriques de performance), soit par simulation (environnement virtuel ou mini-véhicules) ;
- Déterminer et optimiser les paramètres des systèmes de CCAVs, tels que l'architecture logicielle, les algorithmes de décision, les configurations de capteurs ou les protocoles de communication, sous des contraintes physiques, énergétiques, de latence ou de robustesse, en tenant compte des interactions avec l'environnement urbain et les autres usagers de la route.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences acquises à l'issue du cours sont les suivantes :

C1.2 Utiliser et développer des modèles adaptés, choisir l'échelle de modélisation appropriée et simplifier les hypothèses pour traiter un problème.

C1.4 Spécifier, concevoir, réaliser et valider des composants d'un système complexe.

C2.1 Approfondir un domaine ou une discipline relevant des sciences fondamentales ou des sciences de l'ingénieur.

C2.5 Maîtriser les compétences d'un des métiers fondamentaux de l'ingénierie.

C6.7 Comprendre les notions avancées en perception embarquée, fusion de données, prise de décision automatisée et communications V2V/V2I dans le contexte des véhicules autonomes coopératifs et connectés.

2SC6090 – Mini-défi sur la CCAM

Responsables : **Antoine Berthet**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les Véhicules Autonomes Coopératifs et Connectés (CCAVs, pour Cooperative Connected Autonomous Vehicles) représentent un changement de paradigme dans le futur des transports, où les véhicules ne sont pas seulement autonomes, mais communiquent et coopèrent également entre eux ainsi qu'avec les infrastructures environnantes. Cette intégration novatrice de systèmes autonomes, de communications véhicule-à-véhicule (V2V pour Vehicle-to-Vehicle) et véhicule-à-infrastructure (V2I pour Vehicle-to-Infrastructure), ainsi que de traitement de données avancé, a le potentiel de révolutionner les systèmes de mobilité. Cependant, cette transition soulève d'importants défis scientifiques et technologiques, notamment en ce qui concerne le partage de données en temps réel, la fiabilité des systèmes, et l'interaction fluide entre véhicules autonomes et véhicules conduits par des humains dans des environnements de circulation mixte.

L'un des principaux obstacles scientifiques réside dans le développement d'algorithmes robustes de prise de décision coopérative, garantissant la sécurité et l'efficacité dans des scénarios routiers complexes et dynamiques. Les systèmes de communication doivent être ultra-fiables, à faible latence et à large bande passante, afin de permettre une coordination en temps réel entre véhicules et infrastructures. Par ailleurs, le besoin en capteurs avancés, en modèles d'apprentissage automatique, et en intégration poussée avec les systèmes de gestion du trafic urbain pose d'importants défis techniques, nécessitant des recherches interdisciplinaires dans des domaines tels que l'intelligence artificielle, la robotique et les télécommunications.

Au-delà des considérations technologiques, les CCAVs ont également des implications environnementales et sociétales profondes. Sur le plan environnemental, leur adoption à grande échelle pourrait contribuer à la réduction des émissions en optimisant les flux de circulation, en diminuant la consommation de carburant et en facilitant la transition vers les véhicules électriques. Leur nature coopérative permet une meilleure gestion du trafic, susceptible de réduire les embouteillages et la pollution de l'air. Sur le plan sociétal, cependant, l'intégration des CCAVs soulève des questions d'équité, de protection de la vie privée, de déplacement d'emplois dans des secteurs comme la conduite, ainsi que des enjeux juridiques et éthiques concernant la prise de décision automatisée en cas d'accident.

À l'échelle mondiale, les CCAVs offrent des perspectives prometteuses en matière de mobilité durable, notamment alors que les villes et les nations cherchent à atteindre des objectifs climatiques et à concevoir des systèmes de transport plus efficaces et plus équitables. En réduisant la dépendance à l'automobile individuelle, en améliorant les réseaux de transport public et en renforçant la sécurité routière, les CCAVs contribuent à la vision de villes intelligentes, vertes et inclusives. Toutefois, leur déploiement réussi nécessite une coopération internationale dans l'élaboration de normes, de réglementations, et d'investissements en infrastructures afin d'assurer une répartition équitable des bénéfices de cette technologie à l'échelle mondiale.

Le développement des CCAVs exige une approche multidisciplinaire, combinant des expertises en perception, prise de décision, fusion de données et contrôle. La perception repose sur des technologies de capteurs avancées telles que le LiDAR, le radar et les caméras, associées à des algorithmes d'apprentissage automatique pour interpréter l'environnement et détecter les obstacles, les piétons et les autres véhicules. En matière de prise de décision, les algorithmes doivent analyser les données en temps réel afin de prendre des décisions de conduite sûres et efficaces, en tenant compte à la fois de la dynamique du véhicule et des facteurs environnementaux. La fusion de capteurs est essentielle, nécessitant une expertise en traitement du signal pour combiner les données issues de capteurs variés en une représentation cohérente de l'environnement du véhicule. Les systèmes de contrôle, issus de la robotique et du génie des systèmes, assurent la manœuvre précise du véhicule en traduisant les décisions de haut niveau en commandes de bas niveau agissant sur l'accélération, le freinage et la direction. Ces domaines doivent également interagir avec les technologies de communication pour la coordination V2V et V2I ce qui requiert des notions en réseaux sans fil, cybersécurité et protocoles de données.

Au cours de la séquence thématique, les étudiants recevront une formation approfondie portant sur les méthodes de deep learning appliquées à la perception, les protocoles de communication et leur implémentation, ainsi que sur la théorie de la décision et ses applications opérationnelles.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Pour suivre cet enseignement d'intégration dans des conditions optimales et en tirer le meilleur parti, il est recommandé d'avoir suivi le cours spécifique 2SC6010 "Perception, connectivité, et fusion-décision pour la mobilité automatisée" de la séquence thématique.

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours d'intégration prendra la forme d'un mini-défi dont le thème pourra varier d'une année à la suivante. Les étudiants seront répartis en équipes pour le relever. Pour l'édition 2025, le mini-défi se fera à l'aide de simulations d'ordinateur. L'objectif sera de mettre en œuvre des systèmes de perception, de planification et de connectivité sur un véhicule afin de remplir deux missions spécifiques : s'adapter aux changements de limitations de vitesse légales via des entrées connectées, et réaliser l'évitement dynamique d'obstacles grâce à la prédiction de trajectoire. Seront modélisés et simulés les capteurs, les unités de calcul embarquées, les modules de connectivité ainsi qu'un algorithme de contrôle de base. Ce système de contrôle existant sera étudié puis optimisé par les étudiants. Pour réussir, ces derniers devront appliquer leurs connaissances en apprentissage profond (deep learning) pour la reconnaissance de motifs et la prévision de trajectoires, déployer des protocoles de C-ITS pour l'échange de données, et implémenter des stratégies de prise de décision pour l'évitement d'obstacles en temps réel.

Déroulement, organisation du cours

Les étudiants travailleront en équipe sur des projets interdisciplinaires, guidés par des enseignants qui adopteront un rôle de tuteur plutôt que de transmetteur. Cette approche favorise l'autonomie, la réflexion critique et l'acquisition de compétences par la pratique.

Organisation de l'évaluation

La méthode d'évaluation consistera en la rédaction d'un rapport d'équipe portant sur le travail réalisé dans l'enseignement d'intégration et d'une soutenance orale le dernier jour.

Moyens

L'équipe enseignante, placée sous la responsabilité d'Olivier ORFILA est composée de membres de VEDECOM, tous experts dans le domaine de la CCAM : Fouad HAJ SALEM, Maryem FADILI, Mohammed ALFAQAWI, Arslane HAMZA CHERIF, et Nouhed NAIDJA.

L'Institut VEDECOM est un institut de recherche et d'innovation public-privé français dédié à la mobilité du futur, basé à Versailles. Il rassemble des acteurs industriels, académiques et institutionnels autour de projets collaboratifs dans les domaines des véhicules autonomes, connectés, électrifiés et de la mobilité partagée. VEDECOM joue un rôle clé dans le développement de technologies de rupture, tout en contribuant à la normalisation, à la formation et à la réflexion sociétale sur les nouveaux usages de la mobilité. Olivier ORFILA en est le directeur scientifique.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de l'enseignement d'intégration, les étudiants seront en mesure de :

- Comprendre les concepts fondamentaux liés à la perception embarquée, à la fusion de données, à la prise de décision automatisée et aux communications V2V/V2I dans le contexte des véhicules autonomes coopératifs et connectés ;
- Concevoir et modéliser un ensemble ou des parties d'un système de CCAVs, incluant les chaînes de perception, de communication et de contrôle, et évaluer les performances de ces systèmes, soit analytiquement (modèles, métriques de performance), soit par simulation (environnement virtuel ou mini-véhicules) ;
- Déterminer et optimiser les paramètres des systèmes de CCAVs, tels que l'architecture logicielle, les algorithmes de décision, les configurations de capteurs ou les protocoles de communication, sous des contraintes physiques, énergétiques, de latence ou de robustesse, en tenant compte des interactions avec l'environnement urbain et les autres usagers de la route.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences acquises à l'issue du cours sont les suivantes :

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.

C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers.

C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients.

C6 Être à l'aise et innovant dans le monde numérique.

C7 Savoir convaincre.

2SC6410 – Modèles de données et schémas de conception

Responsables : **Jean-Francois Lalande**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours permet de découvrir les notions nécessaires à la conception de logiciels manipulant de grandes quantités de données. Il aborde la programmation orientée objet, au travers de deux langages, Java et Kotlin. Il aborde ensuite les méthodologies de génie logiciel en lien étroit avec le cours de modélisation système dans lequel sont vus les différents diagrammes (activités, séquence, blocs, etc.). Le cours permet à l'étudiant de se questionner sur la pertinence de la structuration d'un code logiciel au regard des patrons de conception existant. A cet effet, les travaux dirigés qui s'appuient sur le cours de modélisation système qui se déroule en parallèle seront réalisés en pédagogie inversée.

Dans une seconde partie le cours s'intéresse au stockage à la manipulation des données proprement dites. Il s'agira de découvrir les fondements des logiciels de base de donnée et les problématiques théoriques que cela pose (mise en forme, requêtes). Enfin, cette partie se conclut par l'introduction des logiciels de mapping objet-relation qui permettent de lier les données avec le code métier de l'application et pour lesquels une compétence de modélisation particulière doit être acquise.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

- Système d'information et programmation
- Algorithmique et complexité

Plan détaillé du cours (contenu)

Programmation orientée objet (Java/Kotlin)

- Héritage, encapsulation, polymorphisme, dispatch dynamique
- Généricité, covariance, contravariance, invariance
- Fonctions et classes anonymes
- Typage et inférence de type

TL : prise en main des langages en illustrant les notions vues en cours.

Travail personnel : Approfondir : Réflexivité, sérialisation, Java NIO, JNI, Garbage collector

Génie logiciel

- Méthodes historiques : cycle en V, cycle en spirale, tests
- Diagramme UML : utilisation des diagrammes vus dans « Modélisation système » (use case, séquences, classes, état transition)
- Test et intégration continue

Bases de données relationnelles

- Algèbre relationnelle,
- Conception de bases de données, normalisation
- Langage SQL, requêtage, indexation
- Optimisation de requêtes

Introduction au patron de conception

Travail personnel : Finir le TL de développement + génie logiciel + base de données

Déroulement, organisation du cours

33.5 HPE: 12h de cours, 3h de TD, 18h de TP, 2 Examen

Organisation de l'évaluation

Examen final : 2h : 50 % Contrôle continu: TL génie logiciel, par binome: 15 min de présentation + 10 min de questions : 50 % En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

Support de cours, bibliographie

- Java et Eclipse Développez une application avec Java et Eclipse (2e édition), Editions ENI
- JPA et Java Hibernate, Editions ENI
- SQL, Les fondamentaux du langage, Eyrolles
- Neo4j : données-graphes - Volume 2
- Design Patterns en Java, Eyrolles

Moyens

TP sur machine:

- Eclipse, IntelliJ
- Logiciel de base de données

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Effectuer de la programmation orientée objet
- Choisir correctement les patrons de conception
- Savoir manipuler des données dans une base de données
- Modéliser avec un mapping objet-relation

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
Évalué par un examen écrit.

C2.2 Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines
Acquise par la validation de l'introduction de la ST5 (Quizz).

C6.2 Concevoir un logiciel
Évalué par le TP de conception de bibliothèque et sa soutenance.

2SC6490 – Développement d'un système de supervision de capteurs

Responsables : **Jean-Francois Lalande**

Département de rattachement : **DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

En collaboration avec les étudiants de la séquence thématique du campus de Rennes « Systèmes intelligents et embarqués pour la santé » ou bien de la salle Smart and Secure Room, l'objectif est de développer le système d'information qui permettra de collecter et de traiter les données en provenance de capteurs, et de fournir des services pour la régulation de ceux-ci. L'objectif pédagogique est de découvrir les spécificités du développement dans le Cloud et de percevoir l'intérêt des choix de conception pour faciliter l'évolution logicielle ainsi que les bénéfices d'une organisation AGILE.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

- Système d'information et programmation
- Algorithmique et complexité

Plan détaillé du cours (contenu)

D'un point de vue technique, on visera à développer par une équipe une infrastructure complète pour collecter, traiter et visualiser des données issues de capteurs. Les données issues des autres groupes projets des autres ST remonteront des données qui seront hébergées sur un serveur local mais qui seront ensuite poussées sur une infrastructure de type cloud. Un court-circuit de la partie Cloud peut être prévu, si le temps de développement est trop long ou suivant les échecs des différentes équipes. A ce stade, aucun traitement n'est réalisé. Les données sont ensuite ré-extraites et peuvent subir un traitement afin d'être projetées dans un modèle de donnée final propice à la manipulation pour présentation. Ces données seront stockées dans une base de données à mettre en œuvre par l'équipe de développement. Ces données sont alors présentées via une API REST à la partie de l'équipe développant le frontend applicatif.

Déroulement, organisation du cours

Les étudiants seront répartis en équipe projet s'organisant autour d'un chef projet (qui pourra changer chaque jour). En début de journée, chaque équipe projet se verra attribuer des fonctionnalités devant être fournies en fin de journée. Par ailleurs, chaque jour, des améliorations mineures devront être apportées afin de répondre au plus vite aux besoins exprimés par les étudiants des autres ST à l'occasion de réunion regroupant l'ensemble des étudiants des ST concernées.

Pour supporter l'EI, il est à prévoir :

- une salle informatique permettant d'accueillir maximum 25 personnes

- un accès à une infrastructure de type Cloud Computing
- d'éventuels VPN pour connecter les différents composants logiciels

Organisation de l'évaluation

Présentations orales

Moyens

- ordinateur
- capteurs de test et des autres STs

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Interpréter et modéliser le besoin client
- Implémenter en équipe une solution répondant au besoin client

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C4.1 Identifier et intégrer les autres parties prenantes, internes et externes ainsi que les autres dimensions non évoquées initialement

Évalué par une présentation technique du produit réalisé intégrant de bout en bout les développements des ST partenaires.

C7.1: Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypotheses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

Évaluée par une présentation non technique de la solution globale en coordination avec les autres ST.

ST5 - 65 - INGENIERIE SYSTEME POUR LE CONTROLE-COMMANDE DES CENTRALES NUCLEAIRES FACE AUX GRANDS ENJEUX DE SURETE ET DE FLEXIBILITE DES SYSTEMES ENERGETIQUES DECARBONES

Dominante : **ENE et GSI**

Langue d'enseignement : **Français**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS de PARIS - SACLAY**

Problématique d'ingénieur

Dans toutes les trajectoires de décarbonation à travers le monde, la part de l'électricité dans le mix énergétique va considérablement augmenter au détriment des énergies fossiles. En France, la SFEC (Stratégie Française Energie Climat) prévoit que, malgré la contraction globale du besoin d'énergie finale, résultat des pratiques d'efficacité énergétique et de sobriété, la consommation d'électricité sera en croissance, de 450TWh environ actuellement à 550 à 750TWh en 2050 selon les scénarios.

Cette énergie sera issue de moyens de production bas carbone (nucléaire, hydraulique, solaire ou éolien). L'intégration massive des énergies renouvelables variables (solaire et éolien) dans le mix énergétique et le développement des nouveaux usages électriques (transport, production d'hydrogène, industrie, bâtiment, ...) nécessiteront l'adaptation du système électrique et le développement des flexibilités. Dans ce contexte, les moyens de production décarbonés pilotables (centrales nucléaires et hydrauliques) joueront un rôle majeur. Les centrales nucléaires de production d'électricité sont des systèmes complexes dont la conception et l'exploitation doivent répondre à des exigences et règles de sûreté strictes. Aujourd'hui, l'énergie nucléaire doit faire face à des enjeux qui orientent la conception des nouveaux réacteurs et l'amélioration continue des performances dans la durée des réacteurs en exploitation. Le contrôle-commande est au cœur de ces problématiques, jouant un rôle essentiel pour assurer la sûreté et la performance des réacteurs qu'il pilote. Par ailleurs, le développement des énergies renouvelables variables nécessite que les moyens de production pilotables comme le nucléaire adaptent leur production en fonction de la disponibilité du vent et du soleil et des besoins du système électrique. Le contrôle-commande joue un rôle clé pour répondre à ces exigences. Cette séquence présentera comment la conception des systèmes de contrôle-commande est fondée sur les grands principes de sûreté, tout en intégrant le retour d'expérience des grands accidents de référence. Elle montrera aussi comment le contrôle-commande des centrales nucléaires joue un rôle déterminant pour contribuer aux grands enjeux des mix énergétiques décarbonés d'aujourd'hui et de demain.

Prérequis conseillés

L'enseignement abordera les grandes régulations mises en œuvre dans les centrales nucléaires en exploitation, une connaissance générale des principes de lois de commandes (régulateurs de type proportionnel-intégral notamment) est souhaitée pour cette partie de l'enseignement. Le fonctionnement général des réacteurs à eau pressurisé (REP) sera exposé rapidement et servira de base à la présentation de la conception du contrôle-commande des centrales. Enfin des notions générales d'électrotechnique sont souhaitées pour les modules liées aux régulations en lien avec le réseau électrique (notion de puissance active/réactive, fréquence).

Modules contexte et enjeux :

Plusieurs intervenants issus d'entreprises du secteur nucléaire (EDF, Edvance, Framatome, ...) proposeront des conférences en début de séquence pour présenter les grands enjeux du nucléaire et de son contrôle-commande :

- Les enjeux du nucléaire, son économie, ses contraintes, ses acteurs
- Le mix énergétique, la flexibilité du nucléaire pour répondre aux contraintes réseau
- De la R&D à l'exploitation : un exemple de carrière au sein d'EDF de la recherche à la direction d'une centrale nucléaire
- Nucléaire, environnement et gestion des déchets

- Du contrôle-commande du nouveau nucléaire à celui en exploitation, en passant par le chantier de l'EPR dont Flamanville3 et à l'international et l'exploitation : de l'ingénierie du parc en exploitation à l'ingénierie du nouveau nucléaire
- Le nucléaire à l'international : quelles offres à l'export ? comment s'adapter à des contextes différents et du référentiel sûreté d'autorités de régulation nucléaires

Cours spécifique (60 HEE) :

Breve description : le cours spécifique de la séquence a pour objectifs de présenter :

- Les bases de la conception du contrôle-commande d'un réacteur nucléaire : à savoir le fonctionnement et les grands principes de sûreté
- Les grandes étapes de la conception du contrôle-commande : la conception des régulations importantes, les architectures fonctionnelles et matérielles, les technologies support du contrôle-commande
- Les performances attendues des centrales nucléaires à leur point de connexion au réseau et les enjeux de flexibilité traités par le contrôle-commande
- Les caractéristiques des nouveaux réacteurs : EPR, EPR2, les SMR

L'enseignement sera délivré principalement par des intervenants de différentes entités d'EDF : Direction des Projets Nouveau Nucléaire et Offres d'EDF, EDVANCE pour la partie ingénierie du nouveau nucléaire, R&D, DIPDE (Division Ingénierie Parc et De l'Environnement) et DPN (Division Production Nucléaire) pour les problématiques du parc en exploitation. Par ailleurs l'enseignement prévoit des séances dans les locaux d'EDVANCE (centre d'ingénierie du nouveau nucléaire EDF-FRAMATOME) à Montrouge (92) autour du simulateur pleine échelle TREFLE représentant le fonctionnement complet du réacteur EPR Flamanville avec la salle de commande. Des intervenants FRAMATOME seront également présents pour les cours spécifiques et l'enseignement d'intégration.

Enseignement d'intégration :

Préambule : l'enseignement d'intégration propose deux sujets permettant de synthétiser les différents aspects techniques abordés lors des cours spécifiques en mettant en œuvre un cas pratique simplifié de conception du contrôle-commande de fonctions d'une centrale nucléaire.

Partenaire associé : fournisseurs logiciels pour les parties outillées (à préciser)

Lieu : Campus Paris-Saclay

Brève description : le premier cas d'étude proposé a pour but de mettre en œuvre une démarche d'ingénierie système pour la conception, l'implémentation et le test du contrôle-commande d'un système élémentaire simplifié (fictif mais représentatif) d'une centrale nucléaire. Les grandes étapes du cycle de vie (cycle en V) feront l'objet d'activités qui pourront être réparties plusieurs sous-groupes de travail :

- Les spécifications : il s'agira à partir d'un cahier des charges textuel de formaliser, organiser les exigences fonctionnelles qui vont guider la conception du contrôle-commande. L'activité prévoit d'outiller cette formalisation et d'effectuer des tests de cohérence et de complétude sur le pool d'exigences. La définition de scénario de tests fonctionnels sera précisée.
- La conception des lois de régulation et leur implémentation : à partir des exigences fonctionnelles du système, une loi de régulation sera synthétisée pour piloter le système et répondre aux exigences de performances et de sûreté. Un modèle du procédé du système sera utilisé pour l'interfacer à la loi de régulation et effectuer des tests de mise au point (tests de type Model-In-the-Loop). La loi de régulation sera ensuite programmée dans un automate programmable industriel
- La validation du contrôle-commande : cette phase prévoit d'effectuer des tests unitaires et des tests fonctionnels d'ensemble notamment par la mise en place de tests Hardware-In-the-Loop en interfaçant l'automate industriel programmé avec la loi de régulation et le modèle de procédé utilisé.

Les sous-groupes devront se coordonner dans une démarche projet afin d'organiser et synchroniser les différentes sous-activités, les données de sortie d'un sous-groupe pouvant être nécessaires pour les autres sous-groupes.

Le deuxième cas d'étude proposé a pour but de mettre en œuvre une démarche d'ingénierie système pour la conception, l'implémentation et le test du contrôle-commande de sûreté d'une centrale nucléaire. Le scope couvert concerne la mise en place de régulations permettant de gérer des situations transitoires occasionnées par des scénarios d'accidents (perte d'eau dans le circuit primaire). Il sera fait sur la base d'un modèle Matlab-Simulink très simplifié de centrale nucléaire à eau pressurisée.

- Les grandes étapes du cycle de vie (cycle en V) feront l'objet d'activités qui pourront être réparties plusieurs sous-groupes de travail :
- Spécification : Définition d'une spécification fonctionnelle à partir d'un cahier des charges textuelles, à pré-valider/vérifier sur un modèle physique simplifié fourni.
- Conception et implémentation des logiques et lois de régulations : à partir des exigences fonctionnelles réalisées plus haut et d'exigences textuelles, implémenter dans un modèle « Automate » Simulink, représentatif d'un automate de contrôle de sûreté les différentes fonctions spécifiées. Ajout de contraintes technologiques.

- Validation du contrôle commande : cette phase prévoit d'effectuer des tests unitaires et des tests fonctionnels d'ensemble notamment par la mise en place de tests Software-In-the-Loop en interfaçant le modèle « Automate Simulink » ainsi développé avec le modèle de centrale nucléaire.

2SC6510 – Contrôle-commande des réacteurs nucléaires

Responsables : **Jing Dai**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours a pour but de faire comprendre les grands enjeux de l'énergie nucléaire aujourd'hui : participation au mix énergétique décarboné, flexibilité de production, mais également enjeu de maintien d'objectifs de sûreté, performance et adaptation de l'offre nucléaire à l'export. Pour cela, le cours montrera comment l'ingénierie système appliquée à la conception du contrôle-commande (aspects fonctionnel, régulations et technologique) tient un rôle clé pour exploiter, maintenir en conditions opérationnelles le parc installé mais également pour répondre au besoin croissant en France et à l'international d'énergie décarbonée, sûre et performante.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

Principes de fonctionnement généraux des centrales nucléaires. Notions de base de régulation. Notions de base d'électrotechnique pour les cours sur les régulations en lien avec le réseau électrique.

Plan détaillé du cours (contenu)

25,5h de CM et 3h de TD

Séance 1 - Fonctionnement général des réacteurs à eau pressurisée - Principaux circuits

Séance 2 - Principes généraux de sûreté et Etats de tranche

Séance 3 - Accidents de référence et retour d'expérience associé

Séance 4 - Défense en profondeur - lignes de défense

Séance 5 - Système de protection et sauvegarde

Séance 6 - Fonctionnement normal - Grandes régulations

Séance 7 - Technologies support du contrôle-commande

Séance 8 - Architectures de contrôle-commande de référence du parc nucléaire en exploitation

Séance 9 - Maintien en Conditions Opérationnelles du contrôle-commande et grands chantiers de rénovation

Séance 10 - Enjeux réseau électrique et contrôle-commande associé (1/2)

Séance 11 - Enjeux réseau électrique et contrôle-commande associé (2/2)

Séance 12 - Enjeux d'exploitation des centrales de production nucléaires

Séance 13 - Simulateur EPR (séance délocalisée chez EDVANCE sur simulateur réel pleine échelle)

Séance 14 - Ingénierie système pour la conception du contrôle-commande

Séance 15 - Data, cybersécurité et IA dans le nucléaire

Séance 16 - Nouveau nucléaire : les projets EPR

Séance 17 - Nouveau nucléaire : les SMR et autres moyens de production

Séance 18 - Fresque de l'ingénierie (1/2) (TD)

Séance 19 - Fresque de l'ingénierie (2/2) (TD)

Déroulement, organisation du cours

Les cours seront délivrés dans les locaux de CentraleSupélec par des intervenants EDF. Les séances 12 & 13 seront délocalisées dans les locaux d'EDVANCE à Montrouge (92).

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sous deux formes :

- Des QCM (Questions à Choix Multiples) sur le contenu de l'enseignement (50%) : examen final
- Résolution de petits cas d'étude (50%) : évaluation obligatoire

Support de cours, bibliographie

Présentations PPT

Moyens

Experts d'EDF

Plateforme de simulation d'EDVANCE à Montrouge

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Maîtrise des grandes étapes de la démarche d'ingénierie système pour la conception des centrales nucléaires, pour l'opération et le maintien en conditions opérationnelles des centrales existantes et la conception des futures centrales. Maîtrise des enjeux de sûreté des centrales et des principes de flexibilité pour la production participant au mix énergétique.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Concepts de sûreté nucléaires, concepts d'ingénierie système appliqués à la conception des centrales nucléaires. Concepts des grandes régulations des centrales nucléaires y compris pour la connexion réseau électrique.

Aucune compétence n'est évaluée dans ce cours spécifique.

2SC6590 – Conception du contrôle-commande d'un sous-système d'une centrale nucléaire pour le fonctionnement normal

Responsables : **Jing Dai**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'enseignement d'intégration propose de synthétiser les différents aspects techniques abordés lors des cours spécifiques en mettant en œuvre un cas pratique simplifié de conception du contrôle-commande d'un sous-système d'une centrale nucléaire.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST4

Prérequis

La prise en main des outils utilisés pourra être demandée en amont de la semaine de l'EI : étude documentaire de l'outil, réalisation de tutoriels, etc. L'équipe d'encadrement de l'EI s'assurera que les logiciels utilisés sont opérationnels sur les outils de travail (PC personnel ou mis à disposition) au début de l'EI.

Plan détaillé du cours (contenu)

L'EI sera basé sur un cas d'étude et a pour but de mettre en œuvre une démarche d'ingénierie système pour la conception, l'implémentation et le test du contrôle-commande d'un système élémentaire simplifié (mais représentatif en termes de composants, lois de régulations présentes dans le nucléaire) d'une centrale nucléaire.

Déroulement, organisation du cours

Les grandes étapes du cycle de vie (cycle en V) feront l'objet d'activités qui pourront être réparties en trois sous-groupes de travail :

- Les spécifications : il s'agira à partir d'un cahier des charges textuel de formaliser, organiser les exigences fonctionnelles qui vont guider la conception du contrôle-commande. L'activité prévoit d'outiller cette formalisation et d'effectuer des tests de cohérence et de complétude sur le pool d'exigences. La définition de scénarios de tests fonctionnels fera également partie de l'activité.
- La conception des lois de régulation et leur implémentation : à partir des exigences fonctionnelles du système, une loi de régulation sera synthétisée pour piloter le système et répondre aux exigences de performances et de sûreté. Un modèle du procédé du système sera utilisé pour l'interfacer à la loi de régulation et effectuer des tests de mise au point (tests de type Model-In-the-Loop). La loi de régulation sera ensuite programmée dans un automate programmable industriel.
- La validation du contrôle-commande : cette phase prévoit d'effectuer des tests unitaires et des tests fonctionnels d'ensemble notamment par la mise en place de tests Hardware-In-the-Loop en interfaçant l'automate industriel programmé avec la loi de régulation et le modèle de procédé utilisé.

Les trois sous-groupes devront se coordonner dans une démarche projet afin d'organiser et synchroniser les différentes sous-activités. Le workflow des activités des trois groupes imposant une production des résultats en série, des données d'entrées seront fournies pour alimenter chacun des sous-groupes sans attendre les résultats du groupe précédent.

Organisation de l'évaluation

Chaque groupe de 10 étudiants devra fournir :

- Un simulateur complet du travail effectué, incluant – selon le groupe - un modèle des exigences vérifiées avec les scénarios de validation, un simulateur du système avec le contrôle-commande, la loi de commande programmée et les rapports de tests de validation ;
- Un rapport exposant l'approche proposée et en particulier le mode d'emploi pour utiliser le simulateur et les codes ;
- Une présentation orale de l'étude.

Support de cours, bibliographie

Présentations PPT

Moyens

Les logiciels utilisés et potentiellement à prendre en main en amont de l'EI seront précisés lors de la ST. Le matériel (automate programmable industriel) sera également mis à disposition.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Connaissance des grands principes de sûreté fondateur pour la conception du contrôle-commande d'une centrale nucléaire.

Connaissance des grands principes de régulations mis en œuvre dans une centrale nucléaire, des supports technologiques et de leur architecture.

Connaissance des étapes d'une démarche d'ingénierie système pour la conception du contrôle-commande d'un système fonctionnel d'une centrale nucléaire.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Mise en place d'une organisation projet pour mettre en œuvre une démarche ingénierie système. Mise en œuvre des différentes étapes clé dans la conception d'un système de contrôle-commande représentatif du nucléaire.

Les compétences C1, C2, C4, C6 et C7 seront évaluées :

- "C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques", notamment par la justification de la démarche adoptée
- "C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers", notamment par l'analyse des résultats obtenus vis-à-vis de l'application considérée
- "C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients", notamment la création du simulateur complet fourni à la fin
- "C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique", notamment par la fourniture des simulateurs
- "C7 Savoir convaincre" notamment à travers la présentation et le rapport.

2SC6591 – Conception du contrôle-commande d'une fonction de sûreté d'une centrale nucléaire pour des scénarios d'accidents

Responsables : **Jing Dai**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'enseignement d'intégration propose de synthétiser les différents aspects techniques abordés lors des cours spécifiques en mettant en œuvre un cas pratique simplifié de conception du contrôle-commande d'une fonction de sûreté d'une centrale nucléaire.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST5

Prérequis

La prise en main des outils utilisés pourra être demandée en amont de la semaine de l'EI : il s'agit de Matlab / Simulink.

Plan détaillé du cours (contenu)

L'EI sera basé sur un cas d'étude et a pour but de mettre en œuvre une démarche d'ingénierie système pour la conception, l'implémentation et le test du contrôle-commande d'une fonction de sûreté simplifiée couplé à un modèle ultra-simplifié d'une centrale nucléaire (mais représentatif qualitativement des effets que l'on cherche à contrôler).

Déroulement, organisation du cours

Les grandes étapes du cycle de vie (cycle en V) feront l'objet d'activités qui pourront être réparties en trois sous-groupes de travail :

- Les spécifications : il s'agira à partir d'un cahier des charges textuel de formaliser et définir une spécification fonctionnelle sous forme de diagrammes qui seront réalisés avec Simulink. Cette spécification sera à pré-valider sur un modèle simplifié de réacteur nucléaire fourni. La définition de scénarios de tests fonctionnels fera également partie de l'activité.
- La conception et implémentation des logiques et lois de régulations : à partir des exigences fonctionnelles réalisées plus haut et d'exigences textuelles, implémenter dans un modèle « Automate » Simulink, représentatif d'un automate de contrôle de sûreté les différentes fonctions spécifiées. Ajout de contraintes technologiques.
- Validation du contrôle commande : cette phase prévoit d'effectuer des tests unitaires et des tests fonctionnels d'ensemble notamment par la mise en place de tests Software-In-the-Loop en interfaçant le modèle « Automate Simulink » ainsi développé avec le modèle de centrale nucléaire.

Les trois sous-groupes devront se coordonner dans une démarche projet afin d'organiser et synchroniser les différentes sous-activités. Le workflow des activités des trois groupes imposant une production des résultats en série, des données d'entrées seront fournies pour alimenter chacun des sous-groupes sans attendre les résultats

du groupe précédant.

Organisation de l'évaluation

Chaque groupe de 10 étudiants devra fournir :

- Un simulateur contenant la spécification fonctionnelle et le modèle de réacteur simplifié, un simulateur contenant les automates de contrôles et les implémentations des logiques et lois de commande au sein de cet automate et les rapports de tests de validation associés ;
- Un rapport exposant l'approche proposée et en particulier le mode d'emploi pour utiliser le simulateur et les codes ;
- Une présentation orale de l'étude.

Support de cours, bibliographie

Présentations PPT

Moyens

Matlab/Simulink disponible par défaut pour les étudiants de CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Connaissance des grands principes de sûreté fondateur pour la conception du contrôle-commande d'une centrale nucléaire.

Connaissance des grands principes de régulations mis en œuvre dans une centrale nucléaire, des supports technologiques et de leur architecture.

Connaissance des étapes d'une démarche d'ingénierie système pour la conception du contrôle-commande d'un système fonctionnel d'une centrale nucléaire.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Mise en place d'une organisation projet pour mettre en œuvre une démarche ingénierie système. Mise en œuvre des différentes étapes clé dans la conception d'un système de contrôle-commande représentatif du nucléaire.

Les compétences C1, C2, C4, C6 et C7 seront évaluées d'une manière obligatoire :

- "C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques", notamment par la justification de la démarche adoptée
- "C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers", notamment par l'analyse des résultats obtenus vis-à-vis de l'application considérée
- "C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients", notamment la création du simulateur complet fourni à la fin
- "C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique", notamment par la fourniture des simulateurs
- "C7 Savoir convaincre" notamment à travers la présentation et le rapport.

COURS SEQUENCE THEMATIQUE N°7

ST7 – FINANCE STOCHASTIQUE ET MODÉLISATION DES RISQUES

Dominante : **MDS (Mathématiques, Data Sciences)**

Langue d'enseignement : **Anglais**

Campus: **Paris-Saclay**

Problématique d'ingénieur

La financiarisation de l'économie est un phénomène remarquable qui s'est produit au cours des trente dernières années et qui place les marchés financiers au cœur de l'économie mondialisée. En conséquence, la gestion des risques par les institutions financières est cruciale pour l'économie dans son ensemble.

Ce cours vise à présenter aux étudiants les concepts fondamentaux de la gestion des risques financiers, et en particulier les aspects mathématiques correspondants. Ce module permettra aux étudiants de se familiariser avec les modèles stochastiques d'évaluation des actifs en temps discret, de découvrir les produits dérivés courants et d'aborder les questions réelles de la gestion des risques. Pour les ingénieurs travaillant dans le secteur financier, la compréhension et la maîtrise totale de ces modèles sont essentielles.

Prérequis conseillés

Les étudiants doivent avoir suivi les cours CIP, PDE et Algorithmes et complexité. La connaissance de la théorie de la mesure (abordée dans le cours CIP) est indispensable, notamment les notions suivantes : sigma-algèbre, espace mesurable, mesure/probabilité, espérance conditionnelle, etc.

Toutefois, le cours ST4 Données et statistiques en finance n'est PAS obligatoire.

Module contexte et enjeux :

Une série de conférences présentera différents domaines des méthodes de gestion des risques financiers et leurs applications. Les thèmes et les intervenants peuvent changer chaque année. Les conférences peuvent porter sur :

- Les produits dérivés ;
- La gestion d'actifs : allocation de portefeuille et gestion des risques ;
- La science actuarielle et la gestion des risques dans le domaine de l'assurance ;
- Les marchés des matières premières et de l'énergie ;
- etc.

Cours spécifique (60 HEE) : Modélisation des risques financiers

- **Description rapide** : Ce cours est une introduction aux mathématiques financières discrètes. Il traite en particulier de l'évaluation et de la couverture des produits dérivés ainsi que de la gestion des risques dans un cadre stochastique discret.
- **Contenu** : Modèles de marché à temps discret. Arbitrage. Produits dérivés européens. Marché complet/incomplet. Évaluation. Couverture. Mesures du risque et optimisation de portefeuille. Produits dérivés américains.
- **Travaux dirigés (TD)** : Diverses questions/problèmes se posant en finance sont formulés en langage mathématique.

Les théorèmes/outils/techniques présentés pendant le cours sont nécessaires pour les résoudre.

Projet : Gestion des risques financiers

- Partenaires associés : les partenaires industriels peuvent changer chaque année. Parmi les partenaires récents, on peut citer BNP Paribas, Generali, HSBC, etc.
- Lieu : Paris-Saclay
- Description rapide : les étudiants inscrits à ce cours sont invités à étudier une méthode quantitative dans le cadre de la gestion des risques financiers. Les sujets sont proposés par un partenaire industriel ou universitaire.

Objectifs : être capable de modéliser des problèmes de gestion des risques financiers, être capable de mettre en œuvre des solutions numériques.

Chaque projet traite d'une méthode quantitative de gestion des risques, par exemple la tarification ou la couverture d'un produit financier, ou encore l'allocation d'actifs, la gestion de portefeuille, l'analyse de portefeuille client, etc. Les données financières ou clients réelles sont fournies par le partenaire du projet. Chaque projet nécessite le codage de la méthode étudiée.

Les étudiants travailleront en groupes (les règles de formation des groupes seront précisées au début du ST).

Évaluation : les étudiants seront notés respectivement pour le cours et le projet.

- Cours : note de l'examen final. Plus de détails seront fournis lors du premier cours ou sur Edunao.
- Projet : la note finale est attribuée après une présentation orale, par un jury comprenant le superviseur industriel.

2SC7110 – Modélisation des risques financiers

Responsables : **LAURENCE CARASSUS**, Gaoyue Guo

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MATHÉMATIQUES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours est une introduction aux mathématiques financières en temps discret. Y sont en particulier abordés la valorisation et la couverture des produits dérivés ainsi que l'optimisation de portefeuille et la gestion des risques dans un cadre stochastique à temps discret.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Cours communs 1A de mathématiques et informatique (CIP, EDP, Algo et complexité, Statistiques). Il est important d'avoir bien compris le cours de CIP (ou équivalent) et de l'avoir validé avec de bonnes notes.

Plan détaillé du cours (contenu)

Modélisation des marchés en temps discret. Condition de non-arbitrage. Marché complet et incomplet. Introduction aux produits dérivés financiers. Pricing d'options européenne et américaine. Mesures de risques. Allocation optimale de portefeuilles. Calcul stochastique en temps discret. Arrêt optimal. Optimisation (dualité, multiplicateurs de Lagrange).

Déroulement, organisation du cours

CM/TD

15h de CM, 13,5h de TD

Organisation de l'évaluation

Contrôle écrit final d'une durée de 2H.

Support de cours, bibliographie

Transparent du cours CIP;

Carassus, L. & Pagès G. (2015). *Modèles de marchés financiers en temps discret: cours et exercices corrigés*. Vuibert- ISBN : 978-2-311-40136-3

Föllmer, H., & Schied, A. (2011). *Stochastic finance: an introduction in discrete time*. Walter de Gruyter.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

L'objectif de ce sujet est d'initier les étudiants aux concepts fondamentaux de la finance mathématique et de la gestion des risques financiers. Cette séquence permettra aux étudiants de se familiariser avec les modèles stochastiques d'évaluation d'actifs, de découvrir les principaux produits dérivés, d'aborder des problématiques réelles de gestion des risques et d'optimisation de portefeuille.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les cours (CM), les travaux dirigés (TD) et l'examen contribuent au développement des compétences C1 (C1.1, C1.2, C1.3, C1.4) ainsi que C2 (C2.1, C2.2).

Evaluation des acquis d'apprentissage : La compétence C1 (respectivement C2) est validée si la note obtenue aux questions associées à C1 (respectivement C2) lors de l'examen écrit, une fois renormalisée sur 20, est supérieure à 10.

2SC7190 – Gestion des risques financiers

Responsables : **Gaoyue Guo, LAURENCE CARASSUS**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cet enseignement se déroule sous la forme d'un projet, au cours duquel les étudiants sont invités à étudier une méthode quantitative en lien avec les problématiques vues en cours : évaluation, gestion du risque financier ou optimisation de portefeuille. Les projets sont proposés par un partenaire industriel ou académique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Stochastic Finance and Risk Modelling (ST7 MDS)

Plan détaillé du cours (contenu)

Chaque projet s'appuie sur l'étude d'une méthode quantitative en gestion du risque financier. Cela peut concerner des problèmes d'évaluation ou de couverture d'un produit financier, de construction de portefeuilles optimaux, de gestion d'un portefeuille d'investissement, d'analyse et d'optimisation d'un portefeuille de clients, etc. Un jeu de données réelles peut être fourni par le partenaire du projet. Chaque projet nécessite une implémentation informatique de la méthode étudiée.

Liste des sujets 2024 (peut différer en 2025):

- Prédiction des émissions CO2 et allocation de portefeuille (en partenariat avec Anass Majji BNP Paribas)
- Variance reduction methods for Monte Carlo option pricing (Laurence Carassus)
- Pricing Employee Stock Option (Laurence Carassus)
- Pricing of American option (Gaoyue Guo)
- Robust pricing of exotic options (Gaoyue Guo)

Déroulement, organisation du cours

Projet avec suivi régulier. Mini-cours selon les besoins du projet.

Organisation de l'évaluation

Code, rapport technique et soutenance orale

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le projet, comprenant la réalisation, la rédaction d'un rapport et une soutenance orale, contribue au développement des compétences suivantes :

- C2 (C2.3, C2.4, C2.5)
- C3.2
- C5.1
- C6 (C6.1, C6.3)
- C7 (C7.1, C7.2, C7.3, C7.4)
- C8 (C8.1, C8.4)
- C9.5

Évaluation des acquis d'apprentissage :

- **Rapport écrit** (évalué par l'encadrant) : compétences C2, C3.2, C6.1, C6.3 validées si la note $\geq 12/20$.
- **Soutenance orale** (évaluée par l'encadrant et les pairs) : compétences C5.1, C7, C8.1, C8.4 validées si la note $\geq 14/20$.
- **Évaluation globale de l'encadrant** : compétence C9.5.

ST7 - VILLES INTELLIGENTES

Dominante : **SCOC (Systèmes Communicants et Objets Connectés)**

Langue d'enseignement : **Anglais**

Campus où le cours est proposé : **Paris-Saclay**

Problématique d'ingénieur

L'avènement de l'internet des objets ainsi que la multiplication des applications basées sur les réseaux de capteurs peu coûteux ouvre aujourd'hui la voie vers le développement des villes intelligentes, connectées et durables. De nombreuses villes en Europe (Antony, Dijon, Malaga, Santander, Barcelone etc.) sont en train de créer des environnements intelligents avec des expérimentations déployées pour une meilleure gestion adaptative des trafics et des transports, pour une meilleure gestion de la consommation d'énergie, de l'eau, une réduction du niveau CO₂, du niveau de pollution, de la qualité de vie etc. La création et la gestion de villes intelligentes nécessitent des infrastructures transversales de communication à haut débit et des réseaux d'extrémité pour la collecte, ainsi que l'acheminement et le traitement d'une grande quantité d'informations (comme par exemple les données de capteurs de trafic, de caméras, de véhicules géo-localisables, profils et déplacements des usagers/personnes, prévision et gestion intelligente de l'énergie, etc.). Pour éviter de surcharger les réseaux de télécommunications, l'optimisation et le traitement de ces données doit se faire d'une façon distribuée, en utilisant des outils adaptés comme par exemple la théorie des jeux. Dans ce contexte, un des objectifs principaux des systèmes de communication 5G et 6G est de pouvoir répondre aux besoins des villes intelligentes, en permettant notamment la communication d'un grand nombre de machines, et le traitement intelligent des données. Cette séquence thématique présentera les défis et les problèmes actuels des villes intelligentes, par des interventions des acteurs principaux dans le domaine. Les principes fondamentaux de la théorie des jeux (rationalité, équilibres, etc.) seront ensuite expliqués en détail et plusieurs exemples pratiques de l'utilisation de cette théorie pour résoudre les problèmes de villes intelligentes seront aussi présentés et analysés. Les exemples abordés dans cette séquence ne se limitent pas aux réseaux de télécommunications mais des sujets sur la prévision et l'optimisation de la consommation d'énergie ainsi que sur la recharge de véhicules électriques seront abordés.

Prérequis conseillés

Avoir des notions fondamentales en Modélisation et Traitement du signal.

Modules contexte et enjeux : ces modules comprennent une conférence portant sur les smart cities (enjeux, défis, et expérimentations), une table ronde dédiée aux marchés et aux modèles économiques confrontant les visions des acteurs principaux dans ce domaine, ainsi que des interventions des partenaires de la séquence portant sur les verrous technologiques et scientifiques.

Cours spécifique (60 HEE) : Théorie des jeux pour les villes intelligentes

Brève description : Ce cours explique les principes fondamentaux de la théorie des jeux (rationalité, équilibre de Nash, équilibres corrélés, etc) et présente la solution de plusieurs types de jeux (jeux finis et stratégies mixtes, jeux révolutionnaires, jeux répétés, etc.). Plusieurs exemples pratiques de l'utilisation de la théorie des jeux dans les villes intelligentes sont présentés et analysés. En particulier, l'optimisation distribuée des infrastructures de réseaux de télécommunications, et le problème de recharge intelligente de véhicules seront étudiés.

Projet : Smart cities : les cités connectées

- **Partenaire associé** : Orange, EDF, RTE, Thales
- **Lieu** : Paris-Saclay
- **Brève description** : Les projets sont centrés autour d'applications pratiques de l'optimisation convexe et de la théorie des jeux aux problématiques actuelles des villes intelligentes. Les projets seront pluridisciplinaires et serviront à mettre en perspective les cours de la séquence et à initier les élèves aux problèmes d'ingénierie et/ou à la recherche scientifique dans le domaine.

Exemples de projets : collecte et routage de données dans les villes intelligentes, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, stratégies d'optimisation de la recharge des vélos électriques en station, prévision de la consommation d'énergie électrique, etc.

Le contexte pratique du projet est lié à un service précis dans les villes intelligentes (collecte d'information des capteurs, régulation de température, vidéo surveillance, consommation d'énergie électrique, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, etc.) et il sera donné comme complément des cours. Les élèves devront proposer et implémenter des algorithmes d'optimisation convexe ou de théorie des jeux vus en cours. Les élèves testeront aussi leurs approches sur des données, si possible, réelles.

2SC7210 – Théorie des jeux pour les villes intelligentes

Responsables : **Mohamad Assaad**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours explique les principes fondamentaux de la théorie des jeux (rationalité, équilibre de Nash, équilibres corrélés, etc) et présente la solution de plusieurs types de jeux (jeux finis et stratégies mixtes, jeux révolutionnaires, jeux répétés, etc.). Plusieurs exemples pratiques de l'utilisation de la théorie des jeux dans les villes intelligentes sont présentés et analysés. En particulier, l'optimisation distribuée des infrastructures de réseaux de télécommunications, le routage des données dans les réseaux et le problème de recharge intelligente de véhicules seront étudiés.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Réseaux de télécommunications (notions de bases), optimisation

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction générale
 - Grands enjeux de la ville du futur (énergie, transport, télécommunications, etc.)
 - Ville intelligente et Théorie des jeux
 - Théorie des jeux : Forme normale et extensive
 - Décision et concepts de solution (rationalité, équilibre de Nash, etc)
 - Equilibres corrélés
- Différents types de jeux et application aux problématiques des villes intelligentes
 - Jeux à somme nulle et à somme non nulle
 - Jeux finis et stratégies mixtes
 - Jeux de routage
 - Jeux révolutionnaires
 - Jeux répétés
 - Matching stables : problèmes de mariages stables
- Etude de cas : Application aux problèmes de recharge intelligente d'électricité, application à l'allocation des fréquences dans les réseaux sans fil

Déroulement, organisation du cours

Déroulement, organisation du cours (séquençage CM, TD, EL/TP...) :

- Introduction générale : 4.5h CM+ 1.5h TD
- Différents types de jeux (jeux à somme nulle, routage, etc.): 9h CM + 7.5h TD
- Etude de cas : 6h CM

Organisation de l'évaluation

Examen final - 2h

Support de cours, bibliographie

- Rida Laraki, Jérôme Renault, Sylvain Sorin, Bases Mathématiques de la Théorie des Jeux, Ecole Polytechnique, 2013.
- -E. Altman, Advances in Dynamic Games and Applications, 2013
- D.Bertsekas and J. Tsitsiklis, Parallel and Distributed : Numerical Methods, athena scientific, 2015.
- D. Bertsekas and R. Gallager, Data Networks, Prentice Hall.
- Chen, C., Zhu, S., Guan, X., Shen, X.S, Wireless Sensor Networks : Distributed Consensus Estimation, Springer, 2014.
- G. Ferrari, Sensor Networks : Where Theory Meets Practice, Springer-Verlag, 2009.
- Recent papers on IoT, smart cities and wireless networks.

Moyens

- Equipe enseignante : Mohamad Assaad (CS), Mikael Touati (Orange Labs)
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) :25
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : Matlab

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Connaître plusieurs problèmes émergents dans les villes intelligentes (réseaux de télécommunications, recharge intelligente, etc.)
- Modéliser un réseau dans le contexte des villes intelligentes avec ses fonctions principales.
- Formuler les problèmes émergents dans les villes intelligentes sous la forme de problèmes d'optimisation distribuée
- Connaître les outils de la théorie des jeux et leur utilisation dans le contexte des villes intelligentes
- Implémenter des algorithmes de la théorie des jeux sous Matlab

2SC7290 – Smart cities : les cités connectées

Responsables : **Mohamad Assaad**

Département de rattachement : **DOMINANTE - SYSTÈMES COMMUNICANTS ET OBJETS CONNECTÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les projets sont centrés autour d'applications pratiques de l'optimisation convexe et de la théorie des jeux aux problématiques actuelles des villes intelligentes. Les projets seront pluridisciplinaires et serviront à mettre en perspective les cours de la séquence et à initier les élèves aux problèmes d'ingénierie et/ou à la recherche scientifique dans le domaine. Exemples de projets: collecte et routage de données dans les villes intelligentes, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, stratégies d'optimisation de la recharge des vélos électriques en station, prévision de la consommation d'énergie électrique, etc.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Réseaux de télécommunications (notions de base), optimisation, Matlab

Plan détaillé du cours (contenu)

Exemples de projets : collecte et routage de données dans les villes intelligentes, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, stratégies d'optimisation de la recharge des vélos électriques en station, prévision de la consommation d'énergie électrique, etc.

Le contexte pratique du projet est lié à un service précis dans les villes intelligentes (collecte d'information de capteurs, régulation de température, vidéo surveillance, consommation d'énergie électrique, optimisation d'itinéraire pour le déplacement à vélo, etc.) et il sera donné comme complément des cours. Les élèves devront proposer et implémenter des algorithmes d'optimisation convexe ou de théorie des jeux vus en cours. Les élèves testeront leurs approches sur des données, si possible, réelles.

Déroulement, organisation du cours

Chaque projet est associé en moyenne à 5 élèves et encadré principalement par un enseignant de CentraleSupélec. Certains projets sont proposés conjointement avec des partenaires industriels et co-encadrés par des ingénieurs de ces entreprises. Une salle informatique sera mise à disposition des élèves. Les encadrants assureront un suivi régulier (une réunion/groupe/semaine au début et une réunion quotidienne par groupe durant la semaine finale). La collaboration inter groupes sera encouragée (si c'est possible), et les élèves seront évalués sur leur capacité de travail en équipe (leadership, partage des tâches, communication).

Organisation de l'évaluation

Rapport à rédiger + soutenance (par groupe)

Moyens

- Outil logiciel : Matlab

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin du projet, l'élève sera capable de :

- Connaître des problèmes émergents dans les villes intelligentes (réseaux de télécommunications, routage de données, recharge électrique, etc.)
- Modéliser un réseau dans le contexte des villes intelligentes avec ses fonctions principales.
- Formuler des problèmes émergents dans les villes intelligentes sous la forme de problèmes d'optimisation
- Implémenter des méthodes d'optimisation convexe et de théorie des jeux sous Matlab

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Etre à l'aise et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

C8 : Mener un projet, une équipe

ST7 - ECONOMIE CIRCULAIRE DES SYSTEMES INDUSTRIELS

Dominante : GSI (Grands Systèmes en Interaction), CVT (Construction, Ville et Transports)

Langue d'enseignement : Français

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Les **entreprises** se doivent de devenir des **acteurs de la transition vers une économie plus respectueuse de l'environnement**. Plusieurs d'entre elles ont par exemple demandé un accord fort dès la COP21 en 2015 et elles sont depuis de plus en plus nombreuses à décider d'agir et de transformer leurs pratiques vers des modèles plus « circulaires ». Cette nouvelle conduite des affaires traduit dans les actes plusieurs facteurs qui se renforcent mutuellement : la **sensibilisation croissante aux enjeux de la transition écologique et énergétique**, la **multiplication des initiatives à l'échelle territoriale**, le **renforcement de lois et de normes vers une économie plus durable**, et des équilibres de marché qui changent et rendent **plus rentables les pratiques durables**.

L'**économie circulaire** vise à **sortir d'une culture de l'extraction et du déchet** et à **optimiser l'usage des ressources** afin de minimiser l'impact des activités humaines sur l'environnement. Basée sur une **approche scientifique de métabolisme intégré**, la mise en œuvre de cette économie circulaire s'effectue via – entre autres – les **synergies industrielles** (mutualisations de flux de matières, d'eau ou d'énergie entre entreprises), l'**éco-conception** des produits et services, les **stratégies de réemploi, réutilisation et recyclage**, ou encore l'**économie de la fonctionnalité**.

C'est un **formidable champ d'innovation**, de **différenciation commerciale** et un **relais de croissance durable** et profitable qui est en train d'éclore. **Il faut à cette économie circulaire des chefs d'orchestres capables d'en comprendre les enjeux, formés pour initier et piloter des projets ambitieux à l'échelle des entreprises et des territoires.**

Cette séquence thématique aborde en détail l'Economie Circulaire par les **stratégies, méthodes et outils d'ingénierie** qui permettent de la mettre en œuvre (ce n'est donc pas un enseignement en économie). Elle alterne théorie (cours), mise en pratique (TD, projet académique, projet industriel), et interventions d'industriels et d'institutionnels du secteur (conférences, ateliers, projet industriel).

Prérequis conseillés

Aucun.

Modules contexte et enjeux : L'introduction de la séquence s'organise autour de trois demi-journées visant à présenter la séquence, les projets et à introduire les enjeux de l'économie circulaire, avec les activités suivantes :

- Conférences introductives : introduction à l'Economie Circulaire par les acteurs de terrain (Institut National de l'Economie Circulaire, Cabinet d'avocat spécialisé en Economie Circulaire)
- Conférences industrielles (différentes chaque année). A titre d'exemple des intervenants des années passées : GE Healthcare, Agence Spatiale Européenne (ESA), Réseau National des Recycleries et Ressourceries, Réseau de chaleur et de froid Paris-Saclay...
- Ateliers de découverte : atelier « Impacts du Smartphone » (exemple du Fairphone), atelier « Business models circulaires » (exemple du Groupe SEB), atelier d'introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (Waro, start-up créée par des anciens de l'école)

Cours spécifique (60 HEE) : Méthodes et outils de l'Economie Circulaire

Brève description : Le cours vise à parcourir les différents piliers de l'Économie Circulaire pour donner aux étudiants une vision d'ensemble du domaine : extraction/exploitation et achats durables, éco-conception, écologie industrielle et territoriale, économie de la fonctionnalité, consommation responsable, allongement de la durée d'usage (réemploi, réutilisation, réparation), recyclage. Puis le focus sera fait sur les outils opérationnels de l'Economie Circulaire que les étudiants apprendront à manipuler (Material Flow Analysis, Analyse de Cycle de Vie et indicateurs de circularité) pour mener à bien un projet « académique » en modélisant des flux de matières,

d'énergie, et en mesurant et améliorant les impacts environnementaux d'un produit. Ces outils pourront être mobilisés dans le projet industriel de la séquence thématique.

Projet : Projet industriel d'économie circulaire

La séquence est construite autour d'un projet industriel ; 4 sujets en lien avec des partenaires industriels seront proposés aux étudiants, dont au moins un projet en collaboration avec la dominante CVT. Les sujets décrits ci-dessous sont ceux des années passées et sont fournis à titre purement indicatif. Ceux de 2025 seront sur des thématiques similaires ou proches. Le projet Circolab (exemple n°4 ci-dessous) sera dans tous les cas reconduit pour l'année 2026, les autres pourront varier. Dans tous les cas, ces projets permettent aux étudiants de travailler sur des sujets d'actualité des partenaires, avec des données réelles (parfois sous accord de confidentialité).

Projet n°1 (exemple 2024 et 2025) : Circularité de systèmes d'imagerie médicale

- Partenaire associé : GE Healthcare
- Lieu : Paris-Saclay + visite de l'usine GE Healthcare de Buc
- Brève description : GE Healthcare développe et commercialise des équipements d'imagerie médicale à destination des hôpitaux. GE Healthcare a récemment décidé de s'inscrire pleinement dans une stratégie d'économie circulaire. Outre le fait de repenser la conception de scanner de sorte à réduire son empreinte environnementale à la conception et à l'usage, l'entreprise adopte de nouvelles stratégies visant à faciliter le maintien des équipements (réparation, maintenance préventive et upgrading) sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Ces transformations s'accompagnent également de réflexions autour du packaging, jusqu'à présent à usage unique, de la logistique inverse (pour faciliter l'acheminement et le rapatriement de tout ou partie du scanner qui serait défectueux) et du modèle d'affaire. Une orientation vers une économie des fonctionnalités pourrait faciliter ces transformations, l'entreprise restant propriétaire du produit. Dans ce cadre, les élèves ont :
 - Réalisé un diagnostic environnemental du scanner et du potentiel d'économie circulaire,
 - Investigué les voies de valorisation possibles des composants sensibles et leur substitution,
 - Développé un modèle de logistique inverse intégrant les stratégies de réparation, remanufacturing et de mise à niveau des scanner sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Projet n°2 (exemple 2025) : Reconditionnement de mobilier de bureau

- Partenaire associé : ReYou
- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite du centre de reconditionnement des éléments de mobiliers de bureau
- Brève description : Re-You est une jeune entreprise de l'économie circulaire. Elle se focalise notamment sur les éléments de mobiliers de bureau. Nombre de fournitures de bureau sont effectivement mises au rebus bien que leur fin de vie effective n'ait été atteinte (déménagement par exemple). Fort de ce constat, Re-You propose un service collecte et de reconditionnement de ces éléments favorisant ainsi leur longévité. Dans le cadre du projet, différents axes ont été développés :
 - Identification et caractérisation d'autres gisements à forte valeur ajoutée sur lesquels Re-You pourrait se diversifier. Une quinzaine de familles de produits ont ainsi été identifiées ainsi que leur potentiel de circularité,
 - Développement d'un argumentaire commercial visant à promouvoir l'activité de Re-You et à mettre en avant le bénéfice RSE pour le client,
 - Développement d'une solution de monitoring de casse-palettes pour assurer les phases de logistique et logistique inverse des produits reconditionnés
 - Industrialisation des procédés de reconditionnement de chaises de bureau. Il a s'agit notamment de dimensionner la chaise de reconditionnement et de l'optimiser compte tenu de l'espace de travail, du nombre de compagnons et des flux de mobiliers à reconditionner.

Projet n°3 (exemple 2022 à 2025) : Reconditionnement d'ordinateurs portables

- Partenaire associé : Emmaüs Connect
- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite d'un centre de reconditionnement d'ordinateurs portables
- Brève description : Membre du Mouvement Emmaüs, Emmaüs Connect est une association loi 1901 créée en 2013 pour lutter contre la fracture numérique et l'illectronisme. Emmaüs Connect a lancé en novembre 2020 LaCollecte.tech, une plateforme qui permet aux organisations de donner facilement une deuxième vie à leur matériel informatique inutilisé au profit des publics en situation de précarité sociale et numérique. Le projet vise à promouvoir le reconditionnement d'ordinateurs portables issus de la collecte et à destination des 8 millions de Français qui sont encore privés d'accès à internet et donc de services de première nécessité faute de moyens pour s'équiper (alors que dans le même temps, 33% des entreprises ont du matériel dormant qu'elles ne savent pas revaloriser). Quatre axes de travail ont été étudiés (chaque groupe d'étudiants en a traité deux) : (1) imaginer une coque "universelle" qui permettrait de recréer un ordinateur portable de seconde main avec n'importe quels composants issus de la récupération ; (2) concevoir un outil permettant d'évaluer la compatibilité de composants de marques différentes, issus d'ordinateurs différents, et en fonction des stocks disponibles ; (3) étudier la faisabilité d'un ordinateur portable dont la carte mère serait un Raspberry Pi (car la carte mère d'un ordinateur portable est souvent très compliquée à réutiliser car les composants sont soudés) ; (4) proposer des mesures de plaidoyer à

destination des fabricants d'ordinateurs portables pour faire évoluer leurs pratiques vers plus de circularité et soutenabilité.

Projet n°4 (exemple 2022 et 2024) : Trophée étudiant Circolab

- Partenaire associé : association professionnelle Circolab
- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite du chantier du village olympique (Saint-Denis)
- Brève description : Circolab est une association d'entreprises du secteur de l'immobilier et de la construction qui souhaitent promouvoir l'économie circulaire dans leurs activités. Circolab a lancé en 2022 la première édition du Trophée Economie Circulaire à destination d'étudiants d'écoles d'ingénieur et d'architecture, dont CentraleSupélec. Plusieurs cas d'étude étaient proposés avec un objectif commun : proposer des initiatives d'économie circulaire réalistes et quantifiées à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier. Les étudiants de la ST7 ont travaillé sur deux cas d'études au niveau du future village des athlètes pour les Jeux Olympiques de Paris en 2024 : (1) un cas proposé par la SOLIDEO (organisme en charge de la construction des ouvrages olympiques) à l'échelle d'un îlot de quartier pour proposer des solutions de circularisation des flux d'eau ; (2) un cas proposé par Vinci à l'échelle d'un second îlot de quartier pour proposer des solutions de revalorisation maximisée d'équipements (cloisons, mobilier, sanitaires) entre la "Phase Jeux" (= pendant les jeux) et la "Phase héritage" (= après les Jeux, lorsque le village deviendra un quartier d'habitation, de bureaux et de commerces). En 2024, le trophée Circolab a porté sur la rénovation du conservatoire de musique de Saint-Denis.

2SC7310 – Méthodes et outils de l'Economie Circulaire

Responsables : Yann LEROY, François CLUZEL

Département de rattachement : DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS

Langues d'enseignement : FRANCAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 60

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 30,50

Présentation, objectifs généraux du cours

L'économie circulaire vise selon l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) à changer de paradigme par rapport à l'économie dite linéaire, en limitant le gaspillage des ressources et l'impact environnemental, et en augmentant l'efficacité à tous les stades de l'économie des produits ; elle est composée de 7 piliers : approvisionnement durable, éco-conception, écologie industrielle et territoriale, économie de la fonctionnalité, consommation responsable, allongement de la durée d'usage et recyclage.

Du point de vue de l'ingénieur, l'Economie Circulaire vise à considérer un système industriel dans sa globalité pour identifier, modéliser et optimiser les flux matières et énergie, ainsi que les impacts environnementaux associés. Elle vise à reproduire, dans les activités humaines, un système naturel où tous les flux de matière et d'énergie sont réutilisés, ou la notion de déchet n'existe plus. Tous les secteurs économiques sont concernés.

Le cours vise à parcourir les différentes dimensions de l'économie circulaire pour donner aux étudiants une vision d'ensemble du domaine. Puis le focus sera fait sur les outils d'ingénierie que les étudiants apprendront à manipuler (Material Flow Analysis (MFA, outil de cartographie des flux de matière et d'énergie), Analyse de Cycle de vie (ACV, outil de calcul des impacts environnementaux) et indicateurs de circularité) pour mener à bien un projet d'écologie industrielle. Tout ou partie de ces outils seront par ailleurs mobilisés dans le projet industriel de la séquence thématique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours est structuré en une séance de 1h30 et 9 séances de 3h.

1. Introduction à l'Économie Circulaire et aux impacts environnementaux (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

A. Les piliers de l'Économie Circulaire

Les séances 2 à 6 sont construites sur un format cours/TD d'application sur un cas industriel. Elles permettent de parcourir les 7 piliers de l'Économie Circulaire selon la définition de l'ADEME.

2. Fin de vie des produits (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

3. Éco-conception, allongement de la durée d'usage et consommation responsable (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

4. Approvisionnement durable (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

5. Économie de la fonctionnalité et consommation responsable (Stéphanie Hauville, Terre d'EFC Île de France)

6. Écologie Industrielle et Territoriale (Yann Leroy et/ou François Cluzel)

B. Méthodes et outils de l'Ecologie Industrielle

Les séances 7 à 10 (Yann Leroy et/ou François Cluzel) sont consacrées à l'enseignement (cours et TP sur ordinateur) du Material Flow Analysis (MFA), de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et des indicateurs de Circularité et Soutenabilité. Les trois approches seront appliquées sur un cas d'étude en groupe (appelé projet académique pour le différencier du projet industriel que les étudiants mènent par ailleurs dans le cadre de la ST).

12. Examen final d'une durée de 2h00

Déroulement, organisation du cours

Selon les séances, les modules alterneront entre cours magistraux, TD sur des cas industriels (sous forme de cas d'étude ou de serious game), TD sur des outils logiciels mobilisables pour le projet de la ST. Certaines séances pourront être organisées en mode classe inversée.

Organisation de l'évaluation

Contrôle final écrit (2h00, sur Evalmeee: quiz de 40 questions à choix multiple (25% de la note) + essai portant sur un sujet d'actualité de l'économie circulaire (25% de la note)) + évaluation en groupe des TDs 7 à 10 (projet académique, 50 % de la note)

Pour le contrôle final, l'usage d'internet est proscrit. Les étudiants peuvent en revanche mobiliser 5 pages recto-verso maximum de notes personnelles et manuscrites.

Support de cours, bibliographie

- Adoue, C., 2007. Mettre en œuvre l'écologie industrielle. PPUR, Lausanne.
- Buclet, N., Barles, S., 2011. Écologie industrielle et territoriale : Stratégies locales pour un développement durable. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, France.
- Erkman, S., 2004. Vers une écologie industrielle, 2e éd. ed. Charles Léopold Mayer, Paris.
- Hawken, P., Lovins, A., Lovins, L.H., 1998. Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution, 1st edition. ed. US Green Building Council, Boston.

Moyens

Équipe enseignante : François Cluzel, Yann Leroy (enseignants-chercheurs au Laboratoire Génie Industriel) + autres chercheurs, doctorants ou intervenants extérieurs

Outils logiciels : logiciel d'Analyse de Cycle de Vie (OpenLCA ou Waro) et logiciel de Material Flow Analysis (Stan)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Être sensibilisé aux grands enjeux environnementaux
- Connaître les 7 piliers de l'économie circulaire
- Maîtriser les principaux outils d'ingénierie de l'écologie industrielle : Material Flow Analysis, Analyse de Cycle de Vie, indicateurs de circularité
- Savoir modéliser et simuler un système industriel dans une perspective d'économie circulaire
- Savoir optimiser un système industriel dans une perspective d'économie circulaire

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences de la ST7 Economie circulaire des systèmes industriels (incluant le présent cours) sont évaluées dans le cadre du projet industriel d'économie circulaire. Se reporter donc à la fiche de cours du projet industriel pour les compétences ciblées et leurs modalités d'évaluation.

2SC7390 – Projet industriel d'économie circulaire

Responsables : François CLUZEL

Département de rattachement : DOMINANTE - CONSTRUCTION VILLE TRANSPORTS, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT

Langues d'enseignement : FRANCAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 80

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 40,50

Présentation, objectifs généraux du cours

Le projet industriel d'Economie Circulaire est un élément central de la ST7 Economie Circulaire des Systèmes Industriels. Chaque année, 4 sujets en lien étroit avec des partenaires industriels sont proposés aux étudiants, dont au moins un projet co-porté par la dominante CVT (Construction, Ville, Transports). En début de séquence, les sujets sont présentés aux étudiants qui émettent ensuite leurs préférences (campagne MyWay). Les étudiants sont affectés à un projet en maximisant leur satisfaction et en respectant les quotas (tous les sujets doivent être pourvus). Chaque projet est encadré par deux à trois enseignants, et par un ou plusieurs partenaires industriels. Le projet de ST7 n'est pas un projet scolaire ; les étudiants se voient confier une mission répondant à des problématiques réelles, et travaillent sur la base de données réelles fournis par les partenaires (et le plus souvent sous accord de confidentialité). Leur première mission est de comprendre et reformuler le problème posé. Ainsi, les sujets et partenaires proposés évoluent tous les ans pour correspondre aux "besoins du moment", même si une certaine continuité existe avec certains partenaires/sujets (par exemple avec GE Healthcare ou Emmaüs Connect). Les sujets proposés sont tous en lien avec l'Economie Circulaire, mais avec des points de vue et objectifs assez différents (optimisation de flux ou de procédés, démarche territoriale nécessitant une consultation fine des parties prenantes, étude technico-économique, étude prospective, définition de modèles d'affaires, voire création d'une conférence-spectacle sur l'économie circulaire en 2025 : <https://www.youtube.com/watch?v=kVFy6mCEosE>) qui permettent à chaque étudiant de creuser une dimension de l'Economie Circulaire en accord avec ses préférences.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucune

Plan détaillé du cours (contenu)

Le projet sera étalé sur 6 à 7 semaines. Les élèves devront se répartir les tâches et les rôles au sein de leur groupe, et seront invités à s'organiser autour d'une démarche de management agile de projet. La soutenance finale sera organisée lors de la dernière séance projet. Les étudiants rendront à l'issue de cette soutenance une version finalisée de leur rapport et des livrables définis avec le client. Les sujets décrits ci-dessous sont ceux des années passées et sont fournis à titre purement indicatif. Ceux de 2025 seront sur des thématiques similaires ou proches. Le projet Circolab (exemple n°4 ci-dessous) sera dans tous les cas reconduit pour l'année 2026, les autres pourront varier. Dans tous les cas, ces projets permettent aux étudiants de travailler sur des sujets d'actualité des partenaires, avec des données réelles (parfois sous accord de confidentialité).

Projet n°1 (exemple 2024 et 2025) : Circularité de systèmes d'imagerie médicale

- Partenaire associé : GE Healthcare
- Lieu : Paris-Saclay + visite de l'usine GE Healthcare de Buc
- Brève description : GE Healthcare développe et commercialise des équipements d'imagerie médicale à destination des hôpitaux. GE Healthcare a récemment décidé de s'inscrire pleinement dans une stratégie d'économie circulaire. Outre le fait de repenser la conception de scanner de sorte à réduire son empreinte

environnementale à la conception et à l'usage, l'entreprise adopte de nouvelles stratégies visant à faciliter le maintien des équipements (réparation, maintenance préventive et upgrading) sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Ces transformations s'accompagnent également de réflexions autour du packaging, jusqu'à présent à usage unique, de la logistique inverse (pour faciliter l'acheminement et le rapatriement de tout ou partie du scanner qui serait défectueux) et du modèle d'affaire. Une orientation vers une économie des fonctionnalités pourrait faciliter ces transformations, l'entreprise restant propriétaire du produit. Dans ce cadre, les élèves ont :

- Réalisé un diagnostic environnemental du scanner et du potentiel d'économie circulaire,
- Investigué les voies de valorisation possibles des composants sensibles et leur substitution,
- Développé un modèle de logistique inverse intégrant les stratégies de réparation, remanufacturing et de mise à niveau des scanner sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Projet n°2 (exemple 2025) : Reconditionnement de mobilier de bureau

- Partenaire associé : ReYou
- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite du centre de reconditionnement des éléments de mobiliers de bureau
- Brève description : Re-You est une jeune entreprise de l'économie circulaire. Elle se focalise notamment sur les éléments de mobiliers de bureau. Nombre de fournitures de bureau sont effectivement mises au rebut bien que leur fin de vie effective n'ait été atteinte (déménagement par exemple). Fort de ce constat, Re-You propose un service collecte et de reconditionnement de ces éléments favorisant ainsi leur longévité. Dans le cadre du projet, différents axes ont été développés :
 - Identification et caractérisation d'autres gisements à forte valeur ajoutée sur lesquels Re-You pourrait se diversifier. Une quinzaine de familles de produits ont ainsi été identifiées ainsi que leur potentiel de circularité,
 - Développement d'un argumentaire commercial visant à promouvoir l'activité de Re-You et à mettre en avant le bénéfice RSE pour le client,
 - Développement d'une solution de monitoring de casse-palettes pour assurer les phases de logistique et logistique inverse des produits reconditionnés
 - Industrialisation des procédés de reconditionnement de chaises de bureau. Il a s'agit notamment de dimensionner la chaise de reconditionnement et de l'optimiser compte tenu de l'espace de travail, du nombre de compagnons et des flux de mobiliers à reconditionner.

Projet n°3 (exemple 2022 à 2025) : Reconditionnement d'ordinateurs portables

- Partenaire associé : Emmaüs Connect
- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite d'un centre de reconditionnement d'ordinateurs portables
- Brève description : Membre du Mouvement Emmaüs, Emmaüs Connect est une association loi 1901 créée en 2013 pour lutter contre la fracture numérique et l'illectronisme. Emmaüs Connect a lancé en novembre 2020 LaCollecte.tech, une plateforme qui permet aux organisations de donner facilement une deuxième vie à leur matériel informatique inutilisé au profit des publics en situation de précarité sociale et numérique. Le projet vise à promouvoir le reconditionnement d'ordinateurs portables issus de la collecte et à destination des 8 millions de Français qui sont encore privés d'accès à internet et donc de services de première nécessité faute de moyens pour s'équiper (alors que dans le même temps, 33% des entreprises ont du matériel dormant qu'elles ne savent pas revaloriser). Quatre axes de travail ont été étudiés (chaque groupe d'étudiants en a traité deux) : (1) imaginer une coque "universelle" qui permettrait de recréer un ordinateur portable de seconde main avec n'importe quels composants issus de la récupération ; (2) concevoir un outil permettant d'évaluer la compatibilité de composants de marques différentes, issus d'ordinateurs différents, et en fonction des stocks disponibles ; (3) étudier la faisabilité d'un ordinateur portable dont la carte mère serait un Raspberry Pi (car la carte mère d'un ordinateur portable est souvent très compliquée à réutiliser car les composants sont soudés) ; (4) proposer des mesures de plaidoyer à destination des fabricants d'ordinateurs portables pour faire évoluer leurs pratiques vers plus de circularité et soutenabilité.

Projet n°4 (exemple 2022 et 2024) : Trophée étudiant Circolab

- Partenaire associé : association professionnelle Circolab
- Lieu : Campus Paris-Saclay + visite du chantier du village olympique (Saint-Denis)
- Brève description : Circolab est une association d'entreprises du secteur de l'immobilier et de la construction qui souhaitent promouvoir l'économie circulaire dans leurs activités. Circolab a lancé en 2022 la première édition du Trophée Economie Circulaire à destination d'étudiants d'écoles d'ingénieur et d'architecture, dont CentraleSupélec. Plusieurs cas d'étude étaient proposés avec un objectif commun : proposer des initiatives d'économie circulaire réalistes et quantifiées à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier. Les étudiants de la ST7 ont travaillé sur deux cas d'études au niveau du futur village des athlètes pour les Jeux Olympiques de Paris en 2024 : (1) un cas proposé par la SOLIDEO (organisme en charge de la construction des ouvrages olympiques) à l'échelle d'un îlot de quartier pour proposer des solutions de circularisation des flux d'eau ; (2) un cas proposé par Vinci à l'échelle d'un second îlot de quartier pour proposer des solutions de revalorisation maximisée d'équipements (cloisons, mobilier, sanitaires) entre la "Phase Jeux" (= pendant les jeux) et la "Phase héritage" (= après les Jeux, lorsque le village deviendra un quartier d'habitation, de bureaux et de commerces). En 2024, le trophée Circolab a porté sur la rénovation du conservatoire de musique de Saint-Denis.

Déroulement, organisation du cours

Apprentissage par projet
Management de projet agile
Travail en groupe avec appui des encadrants
Plusieurs échanges programmés avec les partenaires industriels, en présentiel ou distanciel
Travail sur des cas réels avec données du terrain

Organisation de l'évaluation

Les élèves sont évalués en fonction de la qualité de leur présentation orale (soutenance finale, en groupe) et de leurs livrables (rapport final de projet et livrables définis avec le client). La satisfaction du client par rapport à la mission définie initialement est primordiale sur ce genre de projet. Les encadrants portent également une attention particulière à l'implication des membres de chaque groupe tout au long du projet (assiduité, implication, qualité du travail, comportement) et peuvent le cas échéant distinguer chaque étudiant par une note individuelle dérivée de la note de groupe.

Support de cours, bibliographie

Diaporamas et supports du cours de la ST7
Diapositives des différentes présentations
Rapports et livrables des années précédentes
Documents et données fournis par les partenaires industriels.

Moyens

Équipe enseignante : François CLUZEL (LGI), Yann LEROY (LGI), Franck MARLE (LGI), Ulisse VIZZARDI (dominante CVT), autres encadrants à définir
Outils logiciels : à définir selon les projets (par exemples logiciels ACV (OpenLCA ou Waro) et MFA (Stan))
Selon les projets, des déplacements (visite de site, consultation de parties prenantes, etc.) seront organisés.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Être sensibilisé aux grands enjeux environnementaux
- Maîtriser les principaux outils d'ingénierie de l'économie circulaire : Material Flow Analysis (MFA), Analyse de Cycle de Vie (ACV), indicateurs de circularité
- Savoir modéliser et simuler un système industriel dans une perspective d'économie circulaire
- Savoir optimiser un système industriel dans une perspective d'économie circulaire
- Savoir s'organiser en équipes interdépendantes et gérer un projet
- Savoir définir un périmètre d'étude et des objectifs précis pour répondre aux besoins industriels
- Savoir réduire de façon pertinente la complexité d'un problème
- Savoir faire face à l'incertitude ou au manque de données
- Avoir un regard critique sur les données et les modèles

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les compétences suivantes sont évaluées dans le cadre de la ST7 Economie Circulaire des systèmes industriels, et remontées dans le cadre de l'évaluation du projet industriel, même si leur évaluation mobilise les autres composantes de cette séquences (cours spécifique incluant un projet académique, et un examen final composé d'un quiz et d'un essai, modules contextes et enjeux) :

- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métier ; modalité d'évaluation : PASS si note du quiz de l'examen final du cours spécifique >10/20 ET note de l'essai de l'examen final du cours spécifique > 10/20
- C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients ; modalité d'évaluation : PASS si note du projet industriel (incluant soutenance finale et livrables finaux) > 10/20 ET comportement professionnel de l'étudiant face au client durant le projet industriel (assiduité, implication, pris d'initiative, sur la base des observations des encadrants)
- C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique ; modalité d'évaluation : PASS si note du projet académique du cours spécifique > 10/20 + comportement adapté de l'étudiant durant le projet académique du cours spécifique (assiduité, implication, sur la base des observations des encadrants)

- C7 Savoir convaincre ; modalité d'évaluation : PASS si note de l'essai de l'examen final du cours spécifique >10/20 ET participation active et pertinente en soutenance finale du projet industriel (sur la base des observations des encadrants)
- C8 Mener un projet, une équipe ; modalité d'évaluation : PASS si comportement adapté de l'étudiant durant le projet académique (assiduité, implication, prise d'initiative, sur la base des observations des encadrants) ET comportement adapté de l'étudiant durant le projet industriel (assiduité, implication, prise d'initiative, sur la base des observations des encadrants)

ST7 – OPTIMIZATION OF PASSENGER TRANSPORT SYSTEMS

Dominante : Info&Num (Computer Science & Digital), GSI (Large Interacting Systems)

Langue d'enseignement : French

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Les systèmes de transport sont essentiels à la société d'aujourd'hui car ils fournissent des services de mobilité cruciaux pour les voyages personnels et professionnels. La massification des voyages et la diversité des services de mobilité, ainsi que les nouveaux véhicules autonomes, rendent ces systèmes complexes à dimensionner, concevoir et exploiter. L'optimisation de tels systèmes est donc essentielle. Pour une compagnie aérienne, il est particulièrement important de :

- Tirer parti des informations disponibles pour prévoir la demande sur les itinéraires 'origine-destination' et définir des horaires de vol qui couvrent au mieux la demande,
- Tarifier les vols pour garantir le meilleur taux de remplissage possible et la gestion des revenus pour la société, - dimensionner les services (enregistrement, bagages, ...) dans les hubs permettant d'exploiter les plannings de vol, - planifier les horaires d'équipage en conformité avec la législation et les préférences de l'équipage,
- Attribuer des avions aux vols afin de minimiser les coûts et d'être robuste face aux éventuels retards.

Au-delà de la capacité à fonctionner efficacement, le rôle de l'ingénieur est également d'informer les décisions stratégiques grâce à des modèles quantitatifs évaluant différents scénarios dans lesquels une entreprise pourrait choisir de s'engager.

Prérequis conseillés

SIP and Algorithms and Complexity Course

Modules contexte et enjeux : Ces modules comprennent une conférence introductive sur le sujet, des présentations sur les défis technologiques et scientifiques de l'optimisation du transport de passagers, et une présentation des projets connexes.

Cours spécifique (60 HEE) : Assistance à la décision / Recherche opérationnelle (AD/OR)

Description brève : L'optimisation et la prise de décision sont des activités intrinsèques à la profession d'ingénieur/manager. Pour comprendre les problèmes de décision complexes auxquels ils seront confrontés, les ingénieurs et les managers de demain doivent maîtriser les concepts et méthodes d'optimisation pour formaliser un problème de décision. Le cours vise à introduire un certain nombre de modèles classiques permettant de représenter et de résoudre des problèmes de décision dans différents contextes. L'objectif est de présenter des modèles de différents problèmes de décision concrètes.

Projet

Le projet vise à placer les étudiants dans une situation réelle de résolution d'un problème de décision impliquant la formulation d'un modèle, le choix d'une ou plusieurs méthodes de résolution, la mise en œuvre d'une solution permettant une résolution sur des ensembles de données réelles, et la validation de la solution par des tests numériques. L'objectif du projet à travers cette activité est de faire progresser les étudiants dans la compréhension des enjeux scientifiques, techniques, mais aussi humains et économiques qui sous-tendent la mise en œuvre d'un projet de recherche opérationnelle et de soutien à la décision dans une organisation.

Projet n°1 : Optimisation des opérations de transport ferroviaire

- Partenaire associé : SNCF
- Localisation : Paris-Saclay
- Brève description : Dans le transport ferroviaire, la mise en œuvre du service aux passagers implique de traiter divers problèmes de gestion opérationnelle : prévision de la demande de passagers, conception des horaires, tarification des sièges, attribution des trains aux quais dans une gare... Ces exemples

impliquent d'optimiser le fonctionnement du système de transport. Le projet traitera de l'une de ces questions de gestion des opérations ferroviaires.

Projet n°2 : Optimisation des opérations d'une compagnie aérienne

- Partenaire associé : Air France - Groupe de Recherche Opérationnelle / Intelligence Artificielle
- Lieu : campus Paris-Saclay
- Brève description : Ce projet traite de l'un des nombreux problèmes de gestion des opérations d'une compagnie aérienne : par exemple, l'attribution des vols aux portes d'embarquement, le placement des passagers dans un avion, l'attribution des vols prévus à une flotte d'avions, etc.

Projet n°3 : Planification d'une équipe mobile

- Partenaire associé : Decision Brain
- Lieu : Campus Paris-Saclay
- Brève description : L'objectif de ce projet est de concevoir et de mettre en œuvre un outil de planification pour une équipe mobile de techniciens, initialement prévu pour créer les itinéraires quotidiens de 500 techniciens qui doivent réaliser environ 10 000 tâches.

2SC7410 – Aide à la Décision : Modèles, algorithmes et implémentation

Responsables : **Vincent Mousseau**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

La prise de décision est une activité intrinsèque au métier d'ingénieur et conduit très souvent optimiser un/plusieurs aspects d'un système. Mais ces décisions s'appuient aussi sur des jugements/préférences d'un décideur/utilisateur. Les préférences jouent donc un rôle clé dans de nombreuses applications de l'informatique et des technologies de l'information modernes. C'est le cas du marketing computationnel, des systèmes de recommandations, des interfaces utilisateurs adaptatives, ... Les décisions concernées peuvent être de nature stratégiques, tactiques ou opérationnelles, dans des contextes complexes, concurrentiels, incertains, faire intervenir un seul critère à optimiser, ou trouver un compromis entre des critères conflictuels... Pour appréhender les problèmes de décision complexes auxquels ils seront confrontés, les ingénieurs doivent disposer des concepts et méthodes et algorithmes permettant de formaliser un problème de décision.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction à l'aide à la décision, concepts de base,
- Modélisations de problèmes de décision utilisant la programmation mathématique. Présentation d'outils de modélisation et de résolution (modeleurs et solveurs),
- Implémentation TP Python + GUROBI,
 - Décision multicritère et modélisation des préférences, introduction à quelques modèles d'agrégation simples,
- Analyse expérimentale du comportement décisionnel,
- Apprentissage de modèle de préférences à partir de données, apprentissage incrémental,
- Métaheuristiques pour les problèmes combinatoires,
- Optimisation multiobjectif,

Déroulement, organisation du cours

Cours : 13,5h

TD : 10,5h

TP : 9h

Cette distribution C/TD/TP peut évoluer à la marge

Organisation de l'évaluation

Examen (2h) : 70% TP : 30%

Support de cours, bibliographie

Les slides de cours et feuilles de TDs seront fournis
Les TP seront effectués sur un notebook Jupyter

Bibliographie :

D. Bouyssou, T. Marchant, M. Pirlot, P. Perny, A. Tsoukiàs, P. Vincke "Evaluation and Decision models: A critical perspective", Kluwer, 2000.
W. Cooper, L. Seiford, and K. Tone, "Introduction to Data Envelopment Analysis and its use", Springer, 2006.
C. Guéret, C. Prins, M. Sevaux. "Programmation linéaire, 65 problèmes d'optimisation modélisés et résolus avec Visual Xpress", Eyrolles, 2003
C. Kwon, "Julia programming for operations research", 2019, second edition, <http://www.chkwon.net/julia>
P. Vallin, D. Vanderpooten, "Aide à la décision, une approche par les cas", 2e édition, Ellipses. 2002.
H.P. Williams. "Model building in mathematical programming". J. Wiley, New York, 2013. 5ème édition,

Moyens

Équipe enseignante (V. Mousseau + chargés de TD/TP à valider)
Logiciels : Python + Solveurs d'optimisation + bibliothèques de métaheuristiques
TD à ~30 étudiants
TP à ~20 étudiants
Wifi ABSOLUMENT INDISPENSABLE en salle de TP et TD

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Ce cours vise à développer les aptitudes des étudiants à élaborer et mettre en œuvre des modèles et algorithmes pertinents face à une situation de décision.

À l'issue du cours, les étudiants maîtriseront quelques méthodes/modélisation d'aide à la décision. Ils sauront manipuler les modèles, les utiliser de façon opérationnelle et les implémenter efficacement. Ils auront aussi les éléments nécessaires pour prendre du recul et avoir un sens critique par rapport à ces méthodes, et ainsi en distinguer leurs performances et leurs limites d'application.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 (toutes les sous compétences) : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques
C2.1 : Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.
C2.3 : Identifier et acquérir rapidement des nouvelles connaissances et compétences nécessaires dans les domaines pertinents, qu'ils soient techniques, économiques ou autres
C6.3 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider un logiciel
C6.4 : Résoudre des problèmes dans une démarche de pensée computationnelle Nouvelle compétence
C6.5 : Exploiter tout type de données, structurées ou pas, y compris massives.

2SC7490 – Optimisation des systèmes de transport de passagers

Responsables : **Vincent Mousseau**

Département de rattachement : **DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

ST7 - SIMULATION DE FLUX INDUSTRIELS

Dominante : GSI (Grands Systèmes en Interaction) et VSE (Vivant-Santé, Environnement)

Langue d'enseignement : Anglais

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

La complexité croissante des produits et services, la mondialisation des opérations et les exigences de plus en plus grandes des clients placent la problématique de pilotage des flux au cœur des préoccupations des entreprises industrielles et de services.

La compétitivité de ces entreprises est fortement liée à leur capacité à s'organiser pour produire et distribuer des produits et des services répondant aux attentes du client tout en assurant la pérennité de l'entreprise dans ses dimensions économiques, sociales et environnementales.

L'un des enjeux majeurs pour répondre à ces objectifs porte sur l'optimisation du pilotage des flux, allant des fournisseurs aux clients finaux.

Ce sujet aborde ces thèmes en présentant particulièrement une méthode de simulation permettant de s'attaquer aux problèmes de gestion de flux : la simulation à événements discrets.

Prérequis conseillés

Aucun

Modules contexte et enjeux

Ces modules comprendront des interventions de partenaires industriels pour illustrer les problématiques de gestion des flux dans différents secteurs.

Cours spécifique (60 HEE) : Optimisation et gestion de flux

Brève description : Flux de produits dans une usine, flux de colis dans un centre postal, flux de patients dans un hôpital, flux de clients dans un supermarché : les problématiques liées à la compréhension et à la gestion des flux sont présentes dans tous les secteurs d'activité. Plus qu'une problématique spécifique, la gestion des flux est une approche des problèmes industriels adaptable dans de nombreux secteurs. Savoir comprendre et maîtriser les flux est un enjeu majeur de performance industrielle. Ce cours introduit les problématiques liées à la gestion de flux industriels et présente un outil pour s'attaquer à ces problèmes, la simulation à événements discrets.

Projet 1 : Gestion des flux dans la livraison de gaz industriels

- **Partenaire associé :** Air Liquide
- **Lieu :** Paris-Saclay
- **Brève description :** Ce projet permettra, sur un cas industriel proposé par un partenaire, la mise en application des outils vus dans le cours spécifique, et en particulier de la simulation à événements discrets des systèmes de flux industriels. Il s'agira, à partir d'une problématique de livraison de gaz industriels, de définir un modèle conceptuel, le transposer en modèle informatique, valider ce modèle, expérimenter avec, et construire une recommandation à destination des managers à partir des résultats de simulation.

Projet 2 : : Gestion des flux de patients dans les services de santé

- **Partenaire associé :** LGI CentraleSupélec
- **Lieu :** Paris-Saclay
- **Brève description :** Ce projet permettra, sur un cas issu de travaux menés au Laboratoire de Génie Industriel, d'appliquer les approches de simulation à un problème de gestion de flux de patients. Il s'agira en particulier d'évaluer l'adéquation entre les ressources (soignants : infirmiers, médecins, techniciens ; locaux : blocs, chambres ; plateaux d'imagerie, etc.) et l'activité, en tenant compte de la dimension fluctuante de celle-ci.

2SC7510 – Optimisation et gestion de flux

Responsables : **Guillaume LAMÉ, Adam ABDIN**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Flux de produits dans une usine, flux de colis dans un centre postal, flux de patients dans un hôpital, flux de clients dans un supermarché : les problématiques liées à la compréhension et à la gestion des flux sont présentes dans tous les secteurs d'activité. Plus qu'une problématique spécifique, la gestion des flux est une approche des problèmes industriels adaptable dans de nombreux secteurs. Savoir comprendre et maîtriser les flux est un enjeu majeur de performance industrielle. Ce cours introduit les problématiques liées à la gestion de flux industriels et présente un outil pour s'attaquer à ces problèmes, la simulation à événements discrets.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Principes de la simulation à événements discrets de systèmes de flux.
Utilisation du logiciel Simul8.
Optimisation de systèmes de flux.
Utilisation du logiciel OptQuest couplé à Simul8 pour la simulation-optimisation.
Perspectives sur l'implémentation de ces techniques en industrie.
Cas d'études en secteur manufacturier et de services.

Déroulement, organisation du cours

Le module alternera séances de cours, en présentiel ou sous forme de vidéos et lectures à préparer individuellement, et cas d'applications et exercices.

Organisation de l'évaluation

- Contrôle écrit (40%) et travail intermédiaire à rendre (60%).
- Le travail intermédiaire à rendre est une évaluation obligatoire

Support de cours, bibliographie

Sujets de TDs distribués en cours, notes de cours, vidéos.

Ouvrage de référence pour ce cours : Robinson S. Simulation the practice of model development and use. 2nd ed. London: Palgrave Macmillan 2014.

Moyens

Logiciel de simulation à événements discrets Simul8, et son extension OptQuest pour la simulation-optimisation.

Cours, vidéos, exercices et cas d'application industriels.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'étudiant sera capable de mobiliser des techniques de simulation et d'optimisation pour comprendre et améliorer la performance d'un système de flux.

Ce cours permettra de travailler les compétences suivantes :

- C2.1. Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique
- C6.1. Résoudre numériquement un problème

Ces compétences seront validées si la note est supérieure ou égale à 10/20.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Maîtrise d'un formalisme de modélisation de systèmes industriels, la simulation à événements discrets, et d'un logiciel l'implémentant, Simul8.

2SC7591 – Gestion des flux dans la livraison de gaz industriels

Responsables : **Guillaume LAMÉ, Loïc Pineau**

Département de rattachement : **DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT, DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet permettra, sur un cas industriel proposé par un partenaire, la mise en application des outils vus dans le cours spécifique, et en particulier de la simulation à événements discrets des systèmes de flux industriels.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

En parallèle du cours spécifique de ST7, les étudiants appliqueront progressivement les notions abordées en cours sur un problème réel qu'ils aborderont dans toute sa complexité.
Des rappels de cours seront fournis si nécessaire.

Déroulement, organisation du cours

Cas d'étude industriel.

Organisation de l'évaluation

Projet en groupe avec rapport et soutenance finale.

Support de cours, bibliographie

Supports du cours spécifique de ST7.
Données du cas d'étude industriel.

Moyens

Cas d'étude industriel, avec données et présentation du contexte et de la problématique, supervisé par un tuteur.

Logiciel de simulation à événements discrets Simul8, et son extension OptQuest pour la simulation-optimisation.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Implémentation de la simulation à événements discrets. Modélisation conceptuelle d'un problème, transposition en modèle informatique, validation du modèle, expérimentation.

Ce cours permettra de travailler les compétences suivantes :

- C4.2. Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions. Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles
- C7.1 Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)
- C8.2. Mobiliser et entraîner un collectif en faisant preuve de leadership

Les compétences seront validées si la note est supérieure ou égale à 10/20.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Implémentation de la simulation à événements discrets sur un cas réel.

2SC7592 – Gestion des flux de patients et des services de santé

Responsables : Adam ABDIN, Guillaume LAMÉ

Département de rattachement : DOMINANTE - GRANDS SYSTÈMES EN INTERACTION, DOMINANTE - VIVANT, SANTÉ, ENVIRONNEMENT

Langues d'enseignement : ANGLAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 80

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 27,00

Présentation, objectifs généraux du cours

- Ce projet visera à utiliser les outils de modélisation et simulation de flux pour les appliquer à une problématique de santé.
- La simulation à événements discrets est particulièrement utilisée pour la modélisation de flux de patients, afin de comprendre les problèmes de congestion et d'attente à différents niveaux.
- Cette méthode permet d'étudier finement l'équilibre entre demande et capacité, en prenant en compte la variabilité des opérations de santé, et de tester différents scénarios d'amélioration.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

A partir d'un sujet réel d'organisation des services de santé, les étudiants seront invités à structurer le problème, construire un modèle conceptuel, identifier et collecter les données nécessaires, construire un modèle informatique, le valider, et tester différents scénarios d'organisation.

Déroulement, organisation du cours

Projet en groupe de 3 à 6 étudiants, suivis par un enseignant.

Organisation de l'évaluation

- Projet en groupe avec rapport et soutenance finale.
- Le modèle de simulation produit, le rapport, et la soutenance seront évalués séparément et compteront chacun pour un tiers de la note finale.

Support de cours, bibliographie

Cours spécifique de la ST ("Optimisation et gestion de flux")

Moyens

- Données fournies par l'enseignant
- Logiciel Simul8 (licence étudiante fournie)
- Littérature scientifique (pour les données cliniques) et données publiques (pour l'organisation des soins)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Application de la simulation à événements discrets à un problème réaliste et ouvert : structurer le problème, collecter des données, spécifier des hypothèses, concevoir un modèle conceptuel, le mettre en œuvre à l'aide d'un logiciel DES, exploiter le modèle pour élaborer des recommandations

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4.2. Proposer une ou des solutions répondant à la question reformulée en termes de création de valeur et compléter par l'impact sur les autres parties prenantes et par la prise en compte des autres dimensions. Quantifier la valeur créée par ces solutions. Arbitrer entre des solutions possibles
- C7.1 Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)
- C8.2. Mobiliser et entraîner un collectif en faisant preuve de leadership

Les compétences seront validées si la note est supérieure ou égale à 10/20.

ST7 - Simulation à Haute Performance pour la Réduction d'Empreintes

Dominante : **MDS & INFO-NUM**

Langue d'enseignement : **Anglais**

Campus où le cours est proposé : **Paris-Saclay**

Problématique d'ingénieur

La simulation est aujourd'hui au cœur de nombreuses démarches de conception et d'optimisation pour diminuer l'empreinte ou l'impact des produits créés : réduction du risque de destruction en cas de catastrophe naturelle, réduction d'une trainée d'avion pour minimiser le carburant consommé et le CO₂ émis, réduction du temps d'un calcul à large échelle et des ressources exploitées (les simulations elles-mêmes finissent par consommer beaucoup d'énergie sur beaucoup de processeurs), ...

Mais il s'agit souvent de simulations de *systèmes complexes*, qui demandent à la fois des compétences en *simulations à haute performance* et à *large échelle*, et en *méthodes d'optimisation* pour limiter le champ des investigations et les heures de calculs nécessaires. De plus, chaque étude doit encore se faire en recherchant un compromis entre la qualité de la solution trouvée et le nombre d'heures de calcul utilisées, car les heures de calculs coûtent cher (notamment sur des clusters de calculs performants ou à grande échelle dans des *clouds*). Il est donc indispensable d'apprendre à *gérer un quota d'heures de calcul*.

Cette ST comprend ainsi des mathématiques numériques, de l'informatique parallèle, des méthodes d'optimisation, et des développements et expérimentations sur des clusters de PC ou dans des *clouds*. Les étudiants apprendront :

- À développer des modélisations et simulations parallèles afin de réduire la durée de la phase la plus coûteuse de la boucle d'optimisation,
- À associer ces simulations à des méthodes et algorithmes d'optimisation adaptés, qui minimiseront le nombre de configurations à simuler et évaluer (on évitera les approches *brut force*),
- À expérimenter la programmation de plates-formes de calculs à haute performance (clusters de PC ou *clouds*),
- À exploiter ces plates-formes sous la contrainte d'un quota d'heures de calculs à ne pas dépasser.

Modules contexte et enjeux :

Les modules de présentation du contexte et des enjeux commenceront par une présentation des objectifs et de l'organisation de la ST. Puis, une succession d'exposés des partenaires industriels illustrera différents cas d'utilisation de la simulation à haute performance pour la réduction d'empreinte (réduction de consommation énergétique, réduction du coût financier, réduction des temps de simulation, réduction des volumes des données...). A cette occasion, les verrous scientifiques et techniques associés seront identifiés, ainsi que les besoins induits en optimisation.

Les sujets des projets de la ST seront également présentés durant les modules *contexte et enjeux* : en aéronautique, en exploration sismique, en détection d'onde infrasonores, en calcul de risques sur le *cloud*, et en optimisation temporelle et énergétique de calculs parallèles. Ces exposés présenteront également les problématiques économiques et sociétales dues aux investissements associés pour réaliser des simulations à haute performance, et à l'impact de la simulation sur l'évolution des technologies qui nous entourent.

Une visite du *Très Grand Centre de Calcul* (TGCC) à Bruyères-le-Châtel, sous la conduite du CEA, permettra de voir des infrastructures modernes de calcul à haute performance, et leurs infrastructures support (alimentation électrique, refroidissement, protections). Enfin, une table ronde avec tous les partenaires industriels permettra de débattre des tendances pour l'avenir.

Cours spécifique (60 HEE) : « Calcul parallèle et optimisation »

Ce cours inclut à la fois des aspects mathématiques, numériques, algorithmiques et de programmation performante sur machines parallèles et distribuées, associés à des problématiques d'optimisation.

Parmi les notions abordées, ce cours décrit, dans une première partie, les bases de l'informatique parallèle et distribué, en détaillant notamment les architectures informatiques et modèles de programmation parallèles ainsi que des algorithmes parallèles et distribué utilisées sur ces architectures. Dans une deuxième partie, ce cours présente des méthodes et algorithmes d'optimisation parallèles, communément utilisées dans des codes de

calculs parallèles. Deux classes de méthodes utilisées pour des problèmes d'optimisations sont successivement abordées, à savoir les méthodes de partitionnement et de décomposition de domaine parallèles, puis les algorithmes génétiques et les méta-heuristiques parallèles. Ce sont d'ailleurs ces méthodes et algorithmes que l'on retrouvera dans les différents enseignements d'intégrations de cette ST, dans le but de traiter des problèmes issus des sciences de l'ingénieur. Dans une troisième partie, ce cours s'intéresse à l'analyse des performances des solutions développées. Les notions de métriques de performance et de passage à l'échelle, ainsi que l'analyse des performances expérimentales sont également étudiées.

Projet :

Le **CEA DAM** (Direction des Applications Militaires) propose une étude « d'Optimisation d'une campagne d'exploration sismique pour la protection des ouvrages »

(Optimisation d'une exploration sismique)

Le CEA-DAM est le centre d'alerte français pour les tsunamis et les forts séismes, et utilise ses ressources de calculs à haute performance pour différentes missions.

Après l'accident de Fukushima (Japon), l'exploitation des moyens de calcul à haute performance est devenue de plus en plus courante pour l'estimation du risque sismique associé aux centrales nucléaires : dans le cadre de la conception des nouvelles usines, mais aussi afin d'étudier les performances des centrales existantes face à des événements extrêmes, non prévus lors de leur conception.

Cette étude concerne l'optimisation d'une campagne d'exploration géophysique sur un site expérimental, à l'aide de son *jumeau numérique*. Le projet consiste à optimiser (minimiser) le nombre de capteurs nécessaires pour découvrir la configuration géologique du site d'intérêt. De nombreuses simulations réalistes à l'aide du code SEM3D (méthode de *Reverse Time Migration*) devront être appelées dans une boucle d'optimisation. On cherchera donc une méthode d'optimisation permettant d'atteindre une bonne qualité d'optimisation tout en respectant le quota d'heures.

Les calculs se feront sur des machines du mesocentre Moulon, sous contrainte d'un quota d'heures de calculs.

2. L'ONERA (Office National d'Etudes et Recherche Aéronautique) propose une étude « d'Optimisation de formes et réduction de la traînée en aéronautique »

(Réduction de traînée en aéronautique)

Des études récentes montrent que le trafic aérien est en constante augmentation. Sans améliorations des performances des avions en termes de consommation d'énergie, la part du transport aérien dans les émissions de gaz à effet de serre risque de devenir insupportable dans le futur. La baisse de la consommation des avions passe d'une part par l'augmentation des rendements des moteurs et d'autre part par l'amélioration des qualités aérodynamiques des aéronaves et de la diminution de leur poids.

Les outils numériques sont largement utilisés depuis longtemps dans le domaine aéronautique pour aider à la conception et à l'optimisation des systèmes. Par exemple la forme d'une aile peut être améliorée de façon à diminuer sa traînée, à portance constante, ou sa structure intérieure peut être allégée. Les méthodes d'optimisation nécessitent des calculs successifs pour différentes géométries d'ailes. Les coûts de calcul pour chaque étape sont d'autant plus élevés que les modèles numériques sont précis. La seule façon de réduire les temps de calcul pour pouvoir intégrer les méthodes d'optimisation dans le cycle de conception industriel consiste à utiliser des calculateurs parallèles. L'objectif de ce projet consiste à réaliser la parallélisation de la partie la plus coûteuse de la phase d'optimisation, à savoir la résolution des grands systèmes linéaires issus de modèles éléments finis sur des maillages de grande taille, et d'expérimenter différents jeux de paramètres d'optimisation. Les essais se feront sur les machines parallèles du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, sous contrainte d'un quota d'heures de calculs.

3. Le CEA DAM (Direction des Applications Militaires) propose une étude « d'Optimisation de détection d'ondes infrasonores pour la vérification du traité d'interdiction complète d'essais nucléaires »

(Détection d'ondes infrasonores)

Le CEA-DAM est le centre d'alerte français pour les tsunamis et les forts séismes, et participe aussi à la mise en œuvre des moyens de vérification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE) en utilisant ses ressources de calculs à haute performance.

Un code d'hydrodynamique compressible parallèle a ainsi été développé au CEA DAM, qui permet de simuler la propagation d'ondes de souffle et d'ondes acoustiques en présence de relief et de bâtiments, avec ou sans vent. D'autre part, on considère que des capteurs judicieusement placés permettent d'enregistrer les signaux de surpression en cas d'explosion. Deux types de problèmes peuvent alors être étudiés : (1) retrouver le lieu d'une explosion et déterminer sa puissance à partir des enregistrements de capteurs situés sur le terrain, (2) définir où positionner judicieusement des capteurs pour maximiser les chances de détection d'une explosion au sein d'une zone déterminée.

Une investigation « brut force » simulant toutes les configurations possibles des paramètres consommerait beaucoup trop d'heures de calculs. On mettra donc au point une boucle d'optimisation explorant avec parcimonie l'espace des configurations possibles et faisant appel efficacement au code d'hydrodynamique.

Les calculs se feront sur des clusters du CEA sous contraintes d'un quota d'heures de calculs, et trois des derniers jours de l'étude se dérouleront sur le site de Bruyères-le-Châtel. Cette étude est réservée aux étudiants de l'Union Européenne.

4. **ANEO** est une société d'informatique experte en calcul à haute performance et en exploitation de *clouds*, qui propose une étude de « *Optimisation énergétique et accélération d'un graphe de calculs financiers sur cloud* »

(*Grappe de calculs financiers*)

Une des difficultés dans l'appréciation des comptes d'une assurance (ou d'une banque) réside dans la valorisation des actifs financiers (actions, contrats d'assurance vie ou voiture, etc.) et des risques sous-jacents. En fonction de la valorisation des risques pris, les réglementations résultant des diverses crises économiques obligent l'assurance ou la banque à immobiliser une certaine quantité de fonds propres.

Les étapes d'un tel calcul, que gère ANEO, forment un graphe tâches avec de nombreuses dépendances, et la somme des temps d'exécution correspond à l'équivalent de 413177 heures de calcul. Sur une infrastructure de 1700 cœurs la durée du calcul serait d'un peu plus de 10 jours pleins si tous les cœurs pouvaient travailler à tout moment. Mais à cause des dépendances entre les tâches de calcul, il arrive qu'il n'y ait pas assez de tâches pour occuper toutes les ressources allouées, et le processus dure finalement plus de 10 jours.

Afin d'*optimiser les coûts de ce calcul*, nous souhaitons : (1) utiliser des ressources à la demande disponibles dans le *cloud*, et (2) optimiser l'exécution du graphe de tâches en recherchant la meilleure stratégie d'allumage/extinction des nœuds de calcul, et le meilleur ordonnancement des tâches sur les nœuds disponibles. Pour cela on développera une fonction de coût calculant le temps d'exécution du graphe de tâches en fonction d'une stratégie de gestion des nœuds et d'ordonnancement des tâches, et on implantera un algorithme d'optimisation recherchant le meilleur paramétrage de cette stratégie.

5. **INTEL** propose une étude « *d'Optimisation à faible coût des performances d'un code de propagation d'ondes acoustiques* »

(*Réduction de l'empreinte d'un code*)

Toute application à haute performance s'exécutant sur une machine parallèle possède de nombreux paramètres de configuration de son code source et de sa compilation, qui ont un impact non négligeable sur ses performances et son empreinte énergétique. Mais le comportement de l'application dépend de l'architecture des processeurs utilisés, des données du cas test et de la configuration logicielle de la machine. Au final, ce comportement est extrêmement difficile à modéliser, et l'espace des paramètres de configuration peut être de dimension importante. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation apparaît donc fondamentale pour converger vers une configuration de l'application minimisant son temps d'exécution et son empreinte énergétique sur la machine utilisée.

Cependant, chaque exécution d'un cas test d'une application de calcul intensif peut être longue, même sur une machine parallèle. On va donc cibler des méthodes d'optimisation pas trop gourmandes en nombre d'expérimentations, pour que la pré-étape d'optimisation du code HPC ne consomme elle-même pas trop de ressources de calculs ! Ce qui revient à *rechercher un compromis entre l'énergie dépensée à optimiser un code HPC, et l'énergie économisée par cette application une fois optimisée*.

Les essais se feront sur les machines parallèles du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, sous contrainte d'un quota d'heures de calculs.

2SC7610 – Méthodes et algorithmes de calcul parallèle, et méthodes d'optimisation

Responsables : **Frédéric Magoules**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

La *simulation* est aujourd'hui au cœur de nombreuses démarches de conception et d'optimisation, pour diminuer l'impact des produits créés : *réduction de l'empreinte carbone, de l'empreinte sonore...* Mais il s'agit souvent de systèmes complexes, dont la simulation nécessite des compétences spécifiques en simulations à *haute performance* et à *large échelle*.

Dans ce cours les étudiants apprendront à développer des modélisations et simulations sans limite de taille de problème, sans sacrifier la précision des calculs. Pour cela :

- Ils concevront des modélisations décomposables en blocs d'opérations et réalisables en parallèle sur des blocs de données les plus indépendants possibles.
- Ils concevront des algorithmes distribués déployables sur un nombre croissant de processeurs quand la taille du problème augmente, sans sacrifier à la précision des résultats.
- Ils identifieront les méthodes mathématiques d'optimisation adaptées au problème traité.
- Ils expérimenteront la programmation parallèle pour l'optimisation.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

- Cours commun « Systèmes d'Information et Programmation » de SG1 (1CC1000)
- Cours commun « Algorithmique et complexité » de ST2 (1CC2000)
- Connaissances de bases en algèbre linéaire

Plan détaillé du cours (contenu)

Plan détaillé du cours spécifique

Architectures et modèles de programmation bas niveau

- Introduction aux architectures des machines parallèles
- Programmation séquentielle et parallèle, auto-vectorisation
- Autonomie : Exemples de code vectorisés (avec office hours)

Programmation parallèle et distribuée

- Multithreading sur Multicores
- Passage de messages : communications point-à-point, communications collectives, déploiement sur clusters
- Ordonnancement de Jobs et de tâches
- Autonomie : Exemples d'algorithmes 1D et 2D, modélisation de performances (avec office hours)

Algorithmes parallèles et distribués

- Introduction aux algorithmes de gradient
- Méthodologie de parallélisation de l'algorithme du gradient
- Autonomie : analyse de la modification d'un algorithme (avec office hours)

Méthodes de partitionnement et de décomposition de domaine pour l'optimisation

- Introduction aux algorithmes de minimisation dans le cadre de l'optimisation
- Méthodes de décomposition de domaines parallèles
- Techniques de partitionnement de graphes
- Méthodologie de parallélisation
- Minimisation des communications

Algorithmes d'optimisation combinatoire

- Optimisation combinatoire à base de recherche locale
- Optimisation combinatoire à base de population de solutions

Métriques et analyse de performances

- Accélération, efficacité, loi d'Amdhal, loi de Gustafson, passage à l'échelle, extensibilité
- Exemple d'identification de sources de pertes de performance, et d'optimisation de code

Application à la mécanique

- Analyse d'un barrage
- Autonomie : implémentation et analyse d'un problème de mécanique (avec office hours)

Déroulement, organisation du cours

Cours (21,0 heures) et TD (4.5 heures) et office hours (4,5 heures) avec examen final écrit (2 heures) et contrôle continu.

Organisation de l'évaluation

Evaluation des Acquis d'apprentissage du cours spécifique Evaluation 90% par l'examen écrit final individuel répartis pour moitié entre : AA.1 et AA.3 évalués par la première partie de l'examen, et AA.2 et AA.3 évalués par la deuxième partie de l'examen et 10% des homeworks.

Support de cours, bibliographie

- Frédéric Magoulès, François-Xavier Roux. Calcul Scientifique Parallèle. Dunod, Sciences Sup., 2017. 248 pages (en Français).
- Frédéric Magoulès, Stéphane Vialle. Calcul parallèle et distribué, Méthodes numériques: Transparents des supports de cours

Moyens

- Equipe pédagogique : Filippo GATTI et Frédéric MAGOULES et Stéphane VIALLE
- Cours et TD, avec des groupes de TD de 25 étudiants travaillant sur machines.
- Accès à différents serveurs et clusters de calculs (Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, et/ou mésocentre CentraleSupélec-ENS Paris Saclay).
- Expérimentation avec des langages standards : C/C++/Python, bibliothèque d'envois de messages pour clusters de calculs (MPI).

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Acquis d'apprentissage du cours spécifique

AA.1 A l'issue de ce cours les élèves seront capables de paralléliser les noyaux de calcul par méthodes de décomposition de domaines, intervenant dans les techniques d'optimisations (contribue aux compétences C2.1 et C3.6).

AA.2 A l'issue de ce cours les élèves seront capables de paralléliser les méthodes d'optimisation basé sur des algorithmes génétiques, du recuit simulé, et des méta-heuristiques (contribue aux compétences C1.3 et C3.6).

AA.3 A l'issue de ce cours les élèves seront capables de mettre en oeuvre des techniques de parallélisation permettant de résoudre en temps limité un problème dont la résolution séquentielle est impossible en un temps raisonnable (contribue à la compétence C3.6).

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Compétences du cours spécifique (détail)

A l'issue de ce cours les élèves sauront :

C1.3 Résoudre le problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation

C2.1 Avoir approfondi un domaine ou une discipline relative aux sciences fondamentales ou aux sciences de l'ingénieur.

C3.6 Evaluer l'efficacité, la faisabilité et la robustesse des solutions proposées

2SC7691 – Optimisation d'une campagne d'exploration sismique pour la protection des ouvrages

Responsables : **Stephane Vialle, Filippo GATTI**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"

Sujet en partenariat avec CEA-DAM

Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)

Après l'accident de Fukushima (Japon), l'exploitation des moyens de calcul à haute performance est devenue de plus en plus courante pour l'estimation du risque sismique associé aux centrales nucléaires. Ces outils ont une importance stratégique non seulement dans le cadre de la conception des nouvelles installations, mais aussi afin d'étudier les performances des centrales existantes face à des événements extrêmes, non prévus lors de leur conception. Dans ce contexte, l'Institut SEISM (dont CentraleSupélec et le CEA sont fondateurs) a été fondé en 2012. Il s'agit d'un regroupement scientifique français, comprenant des partenaires académiques et industriels (dont le CEA et EDF), avec l'objectif de réunir les différents savoir-faire en sismologie et génie parasismique pour améliorer la prédiction de la réponse sismique des sites et structures critiques en France, ainsi que l'évaluation du risque associé.

Dans ce cadre, ce projet concerne l'optimisation d'une campagne d'exploration géophysique sur un site expérimental, à l'aide de son jumeau numérique, construit en utilisant un code de propagation d'onde (SEM3D) en développement entre CentraleSupélec, le CEA et l'Institut de Physique du Globe. SEM3D permet de simuler la propagation d'ondes sismiques sur des larges domaines 3D, avec décomposition de domaine sur maillage cartésien (ou sphérique). Il intègre également la topographie du site et les structures géologiques complexes. Le projet consiste donc à résoudre un problème inverse afin d'optimiser - à l'aide de SEM3D - la configuration géologique du site d'intérêt. Cette optimisation se base sur la méthode de *Reverse Time Migration* (i.e. résolution par problème adjoint). La stratégie d'optimisation prévoit des nombreuses simulations réalistes, de la source aux capteurs (*forward*) et de rétro-propagation du misfit (*backward*) pour pouvoir mettre à jour itérativement les propriétés mécaniques du sous-sol. En effet, vu la taille du site d'intérêt (~10 km de large) et la résolution spatiale cherchée (~100m), bien que SEM3D soit parallélisé et distribué sur des supercalculateurs, chaque simulation de propagation d'onde peut durer plusieurs heures sur de nombreux cœurs de calcul partagés. Pour cela, à chaque itération, les étapes *Forward* et *Backward* doivent être correctement enchaînées avec une stratégie de job scheduling approprié (lancement des calculs en batch). Enfin, le nombre de capteurs pour les enregistrements in situ doit être réduit, vu les coûts associés, en termes de capteurs, de campagnes d'acquisition et le stockage des données obtenues.

L'objectif de cette étude est donc triple :

- Proposer un modèle de géologie minimisant l'écart entre simulation et enregistrements,
- Minimiser le nombre de capteurs nécessaires pour aboutir à un modèle à coût financier raisonnable (en considérant leur disposition spatiale),
- Arriver à concevoir cette solution dans la durée du projet avec des calculateurs à haute performance et avec un quota d'heures de calculs limité.

Pour cela, on mettra au point une boucle d'optimisation faisant appel le plus efficacement possible au code de simulation de propagation d'onde : en explorant avec parcimonie l'espace des configurations possibles, pour trouver économiquement une bonne solution.

Détails techniques du système :

Le système étudié consiste en un bassin sédimentaire entouré par du rocher affleurant, lieu candidat à la construction d'une centrale nucléaire. Afin d'évaluer la réponse sismique du site et de proposer des scénarios de séismes incident, on a besoin de connaître :

- La géométrie 3D des couches géologiques,
- Les propriétés mécaniques de ces couches.
-

Ces informations sont fondamentales pour la définition des effets de site sur l'énergie sismique radiée par une faille active.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

Plan détaillé du cours (contenu)

Principales étapes de l'étude :

- Complément d'information sur le sujet au début de la première partie du projet (intervention du CEA-DAM) :
 - Présentation des outils théoriques fondamentaux en propagation d'onde dans des milieux complexes,
 - Présentation des enjeux scientifiques liés à la conception parasismique des centrales nucléaires, à l'évaluation de la réponse sismique du site et à l'estimation du risque associé.
- Formalisation du problème et de la grandeur représentant la prospection géophysique afin de caractériser la réponse sismique d'un site nucléaire. Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème. Mise au point de l'algorithme sur un cas de vérification, supporté par la solution analytique.
- Identification des paramètres du code SEM3D et de leurs impacts respectifs sur sa durée d'exécution parallèle, prise en main de ressources de calcul du Mésocentre Moulon .
- Conception et implantation en Python d'un code d'optimisation appelant SEM3D. Le code d'optimisation sera lui-même parallélisé si son algorithme le permet (on aurait alors un code maître parallèle appelant à la demande un code fils parallèle).
- Test et mise au point du code complet d'optimisation sur machine parallèle du Mésocentre Moulon, sur des petits et moyens problèmes (basse fréquence et/ou petite taille du domaine).
- Application à un cas réel (en termes de taille de la zone étudiée, et de fréquence maximale) :
 - Expérimentation de plus gros problèmes sur un plus grand nombre de nœuds et de cœurs de calcul (démarche de passage à l'échelle),
 - Analyse de la qualité de la solution trouvée et de la performance des calculs,
 - Optimisation du code pour améliorer la solution trouvée ET, si besoin, la performance des calculs,
- Estimation du nombre minimal de capteurs nécessaires pour trouver une solution traitable en fonction des ressources disponibles et de la durée maximale de l'étude.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer : la qualité de la solution trouvée, l'efficacité et l'extensibilité du code de recherche d'une solution optimale, et la gestion du quota de ressources de calcul durant le projet.
-

Rmq : Les différents groupes d'étudiants mettront en œuvre des méthodes d'optimisation différentes, mais testeront tous plusieurs exemples de *Reverse Time Migration* (prospection géophysique terrestre et marine).

Déroulement, organisation du cours

Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 et 2 : compléments de cours, prise en main de ressources de calculs, formalisation du problème, choix d'un algorithme d'optimisation.
- Etapes 3 et 4 : implémentation numérique (Python) de l'algorithme d'optimisation pour la méthode de *Reverse Time Migration*. Interprétation des résultats de campagnes de prospection géophysique pour le choix des paramètres à optimiser, la compréhension des sources d'incertitude et de bruit expérimental.
- Etape 5 : première implantation sur machine parallèle de l'algorithme d'optimisation, évaluation de la qualité des résultats et des performances des calculs sur des problèmes de petites et moyennes tailles et vérification sur solution analytique de référence.
- Rapport intermédiaire (slides et résumé d'avancement) et présentation d'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

Partie 2 – *sprint final* (40HEE) :

- Etape 6 : expérimentation sur des problèmes réels dans des configurations différentes, identification des sources de blocages ou de pertes de performances, et (si besoin) amélioration du code pour repousser les limites de taille de problème traitable.
- Etape 7 : estimation du nombre de capteurs/enregistrements nécessaires à une optimisation stable, en fonction des ressources de calculs disponibles et des contraintes de durée maximale de l'étude.
- Rapport final (slides et résumé étendu) et présentation orale complète de l'étude.

Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

Moyens

Equipe enseignante :

- **F. Gatti** (CentraleSupélec & MSSMat)
- **M. Bertin** (CEA-DAM)

Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi (hors cas de confinement)
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des **clusters de PC** distants au **Mésocentre Moulon**.
- La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :

- **AA1** : d'identifier et de paramétrer une méthode d'optimisation adaptée au cas où chaque évaluation/itération demande beaucoup de ressources informatiques et de temps de calcul,
- **AA2** : d'implanter et de mettre au point un code Python séquentiel ou parallèle sur supercalculateur (par développement explicite et/ou par assemblage de bibliothèques), appelant des noyaux de calculs C eux-mêmes distribués,
- **AA3** : de déployer des applications de calcul intensif sur des ressources distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles,
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

2SC7692 – Optimisation de formes et réduction de la trainée en aéronautique

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"

Sujet en partenariat avec l'ONERA

Dominantes : Informatique (IN) & Math, Data Sciences (MDS)

Le trafic aérien est en constante augmentation chaque année au point que, sans améliorations des performances des avions en termes de consommation d'énergie, la part du transport aérien dans les émissions de gaz à effet de serre risque de devenir insupportable dans le futur.

La baisse de la consommation des avions passe d'une part par l'augmentation des rendements des moteurs et d'autre part par l'amélioration des qualités aérodynamiques des aéronefs et de la diminution de leur poids. Les outils numériques sont largement utilisés depuis longtemps dans le domaine aéronautique pour aider à la conception et à l'optimisation des systèmes. Par exemple la forme d'une aile peut être améliorée de façon à diminuer sa trainée, à portance constante, ou sa structure intérieure peut être allégée.

Détails techniques du système et méthodologie :

Les méthodes d'optimisation nécessitent des calculs successifs pour différentes géométries d'ailes, ainsi que sur des *modèles adjoints*. Les coûts de calcul pour chaque étape sont d'autant plus élevés que les modèles numériques sont précis.

La seule façon de réduire les temps de calcul de façon à obtenir des temps de réponse suffisamment courts pour pouvoir intégrer les méthodes d'optimisation dans le cycle de conception industriel consiste à utiliser des calculateurs parallèles. Dans le cas de méthodes d'optimisation de type méthodes de descente efficaces (comme par exemple la méthode du gradient ou la méthode de Newton), les différentes configurations ne sont pas connues a priori mais déterminées successivement par l'algorithme. Il faut donc paralléliser chaque calcul du *problème primal* puis du *problème adjoint*.

L'objectif de ce projet est de réaliser la parallélisation de la phase la plus coûteuse de la boucle d'optimisation, à savoir la résolution des grands systèmes linéaires issus de modèles de discrétisation de type éléments finis sur des maillages de grande taille, et d'expérimenter différents jeux de paramètres d'optimisation.

Pour cela, la parallélisation sera réalisée, dans un environnement de programmation par échanges de messages adaptées à l'utilisation de très grands calculateurs avec des nœuds de calcul en réseau, par une approche par décomposition de domaine. La méthode de résolution itérative globale sera accélérée par la résolution des équations locales dans chaque sous-domaine. Le code parallèle développé sera exécuté et évalué sur des machines parallèles de CentraleSupélec.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

Plan détaillé du cours (contenu)

Principales étapes de l'étude :

- Complément d'information sur le sujet au début de la première partie du projet (intervention de l'ONERA) :
 - Présentation des outils théoriques fondamentaux en optimisation utilisés en aéronautique
 - Présentation des enjeux scientifiques liés à la conception des ailes d'avions, à l'évaluation de la traînée et à l'estimation du risque associé lors de la réduction du poids des matériaux utilisés.
- Formalisation du problème et de la grandeur représentant la géométrie et la structure afin de caractériser la traînée d'une aile d'avion. Utilisation d'une méthode d'optimisation fixe adaptée au problème (méthode d'optimisation de la géométrie utilisant la forme d'Hadamard de dérivée de la géométrie). Mise au point de l'algorithme sur un cas de vérification supporté par la solution analytique.
- Identification des paramètres du code FENICS (OpenSource) de résolution des équations aux dérivées partielles, et de leurs impacts sur la qualité de la solution du calcul des écoulements et sur la durée d'exécution.
- Conception et implantation en Python d'un code d'optimisation appelant FENICS ; code d'optimisation qui sera ensuite parallélisé par échanges de messages basés sur une approche par décomposition de domaines.
- Test et mise au point du code complet d'optimisation sur machine parallèle du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec, sur des petits et moyens problèmes (courte durée de simulation physique, petite taille du domaine).
- Application à un cas réel (en termes de taille de la zone étudiée, et de géométrie) :
 - Expérimentations de plus gros problèmes sur un plus grand nombre de nœuds et de cœurs de calcul (démarche de passage à l'échelle),
 - Analyse de la qualité de la solution trouvée et de la performance des calculs,
 - Optimisation du code pour améliorer la solution trouvée ET, si besoin, la performance des calculs,
- Estimation de la forme optimale de l'aile ou des volets afin de réduire la traînée de l'écoulement.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer : la qualité de la solution trouvée, l'efficacité et l'extensibilité du code de recherche d'une solution optimale, et la gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

Rmq: Les différents groupes d'étudiants mettront en œuvre des méthodes d'optimisation différentes, chacune testée sur un exemple différent.

Déroulement, organisation du cours

Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 et 2 : compléments de cours, prise en main de ressources de calculs, formalisation du problème, présentation de la méthode d'optimisation.
- Etapes 3 et 4 : implémentation numérique (Python) de l'algorithme. Interprétation des résultats pour le choix des paramètres à optimiser et la compréhension de la qualité de la solution.
- Etape 5 : première implantation sur machine parallèle de l'algorithme d'optimisation, évaluation de la qualité des résultats et des performances des calculs sur des problèmes de petites et moyennes tailles et vérification sur solution analytique de référence.
- Rapport intermédiaire (slides et résumé d'avancement), et présentation de l'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

Partie 2 – *sprint final* (40HEE) :

- Etape 6 : expérimentation sur des problèmes réels dans des configurations différentes, identification des sources de blocages ou de pertes de performances, et si besoin amélioration du code pour repousser les limites de taille de problème traitable.
- Etape 7 : estimation de la forme optimale de l'aile ou des volets afin de réduire la traînée, en fonction des ressources de calculs disponibles et des contraintes de durée maximale de l'étude.
- Rapport final (slides et résumé étendu) et présentation orale complète de l'étude.

Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

Moyens

Equipe enseignante :

- **F. Magoules** (CentraleSupélec & MICS), et **S. Vialle** (CentraleSupélec & LISN)
- **S. Claus** et **F.-X. Roux** (ONERA)

Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des clusters de PC distants au Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec.
- La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :

- **AA1** : d'identifier et de paramétrer une méthode d'optimisation adaptée au cas où chaque évaluation/itération demande beaucoup de ressources informatiques et de temps de calcul,
- **AA2** : d'implanter et de mettre au point un code Python séquentiel ou parallèle sur supercalculateur (par développement explicite et/ou par assemblage de bibliothèques), appelant des noyaux de calculs C eux-mêmes distribués,
- **AA3** : de déployer des applications de calcul intensif sur des ressources distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles,
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

2SC7693 – Optimisation de détection d'ondes infrasonores pour la vérification du traité d'interdiction complète d'essais nucléaires

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"

Sujet en partenariat avec le CEA DAM

Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)

Rmq : Sujet proposé aux étudiants **Français**

Le CEA-DAM utilise des moyens de calcul à haute performance pour ses diverses missions, notamment dans le domaine de la surveillance de l'environnement (ex : phénomènes de propagation d'ondes sismiques, acoustiques, ...). Le centre d'Ile de France situé à Bruyères-le-Châtel est ainsi le centre d'alerte français pour les tsunamis et les forts séismes. Dans le cadre de ses missions, le CEA-DAM apporte également son expertise, fondée sur sa connaissance du nucléaire et son savoir-faire dans les domaines des technologies de détection et d'identification dans la lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme. Afin d'informer les autorités nationales en cas d'essai nucléaire, le CEA participe ainsi à la mise en œuvre des moyens de vérification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE).

L'étude proposée ici concerne : la conception d'un plan de sécurité d'une installation de type seveso dont le système de protection a été dégradé en raison d'événements climatiques catastrophiques.

Scénario de l'étude : Des événements climatiques catastrophiques ont dégradé le système de protection d'une installation de type seveso. En conséquence, il ne joue plus son rôle. La situation est critique car le site contient des endroits connus où des explosions peuvent se produire pendant la reconstruction du système de protection initial. Dans le pire des cas, une onde de souffle pourrait se développer et blesser les personnes se trouvant à proximité. Cela n'est pas acceptable et il a été décidé de mettre en place un système temporaire afin de protéger les personnes potentiellement exposées dans les zones publiques. Une solution consisterait à fermer toutes les zones touchées en cas d'explosion ; néanmoins, cela pourrait avoir un coût financier trop élevé en fonction des activités économiques de la zone fermée et de la durée d'une telle mesure. Une meilleure solution devrait exister et nous aimerions examiner si différents articles commerciaux peuvent être utiles pour réduire les zones où l'onde de souffle se développerait en limitant le(s) périmètre(s) de sécurité. Ces articles ont été présélectionnés pour des raisons de disponibilité (barrières amovibles en métal, barrières amovibles en béton, muret...). Votre équipe est chargée d'élaborer la carte nécessaire à la mise en place de ce plan de sécurité temporaire. Vous devez donc répondre aux questions suivantes :

- Quel type d'éléments doit-on utiliser ? Combien en faut-il ? Où doivent-ils être placés ?
- Quel périmètre de sécurité doit être créé et où ?

La solution proposée doit minimiser le coût financier et toute plainte potentielle en supposant que son premier objectif non négociable est de protéger les personnes de l'onde de souffle potentielle. Vous disposez des articles commerciaux présélectionnés qui peuvent être utilisés, de la carte du site et de son voisinage. Vous pouvez utiliser les données d'une autre équipe pour connaître le coût financier associé à la décision de fermer une zone. Vous savez alors où se trouvent les routes, les piétons, les activités économiques, etc. Un modèle numérique permettant de simuler l'onde de souffle qui pourrait se développer et les effets de l'installation d'éléments temporaires est fourni par le CEA. Pour le faire fonctionner, vous avez accès au code Armen qui utilise le supercalculateur Inti mis à votre disposition pour le projet. La suppression maximale admissible est également une donnée d'entrée.

Parmi les domaines techniques développés dans ce sujet, on trouvera notamment les suivants : Système d'optimisation, Problème hyperbolique (équations d'Euler), Calcul haute performance, Mathématiques numériques

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Cours de 1A :

Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)

Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

Plan détaillé du cours (contenu)

Principales étapes de l'étude :

- Complément d'information sur le sujet au début de la première partie du projet (intervention du CEA-DAM) :
 - Présentation des principes physiques et des mathématiques numériques utilisées dans le code d'hydrodynamique compressible fourni pour simuler la propagation d'ondes acoustiques,
 - Identification des paramètres du code d'hydrodynamique compressible et de leurs impacts sur sa durée d'exécution parallèle,
 - Prise en main de ressources dans un centre de calcul distant (au CEA).
- Formalisation du problème et des grandeurs à optimiser. Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème.
- Conception et implantation en Python d'un code d'optimisation appelant le code de simulation intensive et parallèle. Le code d'optimisation sera lui-même parallélisé si son algorithme le permet (on aurait alors un code maître parallèle appelant à la demande un code fils parallèle).
- Test et mise au point du code complet d'optimisation sur machine parallèle du CEA, sur des petits et moyens problèmes : reliefs ou bâtis simplifiés sur des cartes réduites, sans météo et en 2D axisymétrique (beaucoup plus rapide).
- Passage à l'échelle en termes de taille de terrain couvert, ajout du relief et/ou du bâti et de cartes de vent :
 - Expérimentations sur de plus gros problèmes sur un plus grand nombre de nœuds et de cœurs de calcul,
 - Analyse de la qualité de la solution trouvée et de la performance des calculs,
 - Optimisation du code pour améliorer la solution trouvée ET la performance des calculs.
- Estimation de la taille maximale de problème traitable en fonction des ressources disponibles et de la durée maximale de l'étude. Analyse de la faisabilité de l'extension au cas 3D dans le temps imparti pour le projet.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer : la qualité de la solution trouvée, l'efficacité et l'extensibilité du code de recherche d'une solution optimale, et la gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

Rmq : Les différents groupes d'étudiants travailleront sur des sujets différents (sujets 1 et 2) et mettront en œuvre des méthodes d'optimisation différentes.

Déroulement, organisation du cours

Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 et 2 : compléments de cours, prise en main de ressources de calculs, formalisation du problème, choix d'un algorithme d'optimisation.
- Etape 3 : implémentation numérique (Python) de l'algorithme d'optimisation appelant le code parallèle d'hydrodynamique compressible fourni par le CEA DAM.
- Etape 4 : premières exécutions sur des simulations en 2D avec configuration simple, mise au point sur machine parallèle de l'algorithme et du code d'optimisation, évaluation de la qualité des résultats et des performances des calculs sur des problèmes de petites et moyennes tailles et vérification par comparaison à une solution de référence.
- Rapport intermédiaire (slides et résumé d'avancement) et présentation d'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

Partie 2 – *sprint final* (40HEE) :

- Etape 5 : expérimentation sur des problèmes plus complexes et/ou plus grands proches de problèmes réels, analyse de la qualité de la solution trouvée, identification des sources de blocages ou de pertes de performances, et (si besoin) amélioration du code pour repousser les limites de taille de problème traitable.
- Etape 6 : estimation de la taille de problème traitable en fonction des ressources de calculs disponibles et des contraintes de durée maximale de l'étude, analyse de la faisabilité d'une simulation en 3D.
- Rapport final (slides et résumé étendu) et présentation orale complète de l'étude.

Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

Moyens

Equipe enseignante :

- **J. Cagnol** (CentraleSupélec & MICS) et **S. Vialle** (CentraleSupélec & LISN)
- T. Chantrait (CEA DAM)

Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi.
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des **ressources de calculs importantes opérées par le CEA DAM**.

La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :
- **AA1** : d'identifier et de paramétrer une méthode d'optimisation adaptée au cas où chaque évaluation/itération demande beaucoup de ressources informatiques et de temps de calcul,
- **AA2** : d'implanter et de mettre au point un code Python séquentiel ou parallèle sur supercalculateur (par développement explicite et/ou par assemblage de bibliothèques), appelant des noyaux de calculs C eux-mêmes distribués,
- **AA3** : de déployer des applications de calcul intensif sur des ressources distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles,
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

2SC7694 – Optimisation énergétique et accélération d'un graphe de calculs financiers sur cloud

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,60**

Présentation, objectifs généraux du cours

Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"

Sujet en partenariat avec ANEO

Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)

Contexte applicatif

Les **assureurs** modernes ont un champ d'activité très réglementé mais relativement large en même temps : différents types d'assurance, services bancaires, etc. Une des difficultés dans l'appréciation des comptes d'une assurance (ou d'une banque) réside dans la valorisation des actifs financiers (ex : action EDF, contrat d'assurance vie ou voiture, etc.) et des risques sous-jacents. L'approche généralement utilisée consiste à évaluer pour chaque actif le coût d'une dévaluation ainsi que le risque associé. Pour les actifs simples comme les actions, le calcul est simple. Pour les actifs plus complexes (produits d'assurance ou produits dérivés), ce calcul est plus complexe puisqu'il repose en général sur la prise en compte de nombreux facteurs. En fonction de la valorisation des risques pris, les réglementations résultant des diverses crises économiques, comme Solvency II ou IFRS17, obligent l'assurance ou la banque à immobiliser une certaine quantité de fonds propres. Certains risques peuvent s'annuler entre différents actifs (ex : le risque d'un actif d'assurance vie basé sur le taux euro/dollars peut être couvert par d'autres actifs basés sur les taux euro/yen et yen/dollars). Afin de maximiser ce potentiel de compensation à travers les actifs possédés, ces organismes vont consolider les comptes à l'échelle la plus large possible, le groupe en général. C'est à dire qu'ils vont effectuer les analyses de risque comme si l'ensemble des actifs appartenaient à une seule entité. Une des difficultés de l'exercice consistant alors à répartir le besoin de fonds propres entre les différentes entités juridiques dont les comptes ont été consolidés, ce process est donc en réalité plus complexe qu'une simple union des actifs suivis d'une analyse de risque globale.

Le **processus de construction des comptes consolidés pour une assurance engendre donc de nombreux calculs**. Ces calculs concernent donc d'un côté la modélisation du coût de remboursement des contrats en fonction de différents facteurs et d'un autre côté la modélisation des placements effectués avec l'argent disponible. A titre d'exemple pour un contrat d'assurance vie, la modélisation du risque s'appuie sur les tables de mortalités fournies par l'INSEE et prenant en compte différents facteurs comme la géographie, la catégorie socio-professionnelle, la situation familiale, etc. Pour ce faire, la vie du contrat est simulée année après année afin de prendre en compte l'évolution de ces facteurs. Différents scénarios d'évolution sont joués afin de refléter l'ensemble des évolutions de situations possibles (déménagements, évolution de la situation familiale, etc.). Ces scénarios sont ensuite agrégés. Ce processus est bien sûr une vue simplifiée et ne prend pas en compte différents éléments comme l'agrégation des contrats afin de réduire la volumétrie de calcul, laquelle agrégation fait l'objet en soi de différents travaux d'optimisation. Parmi les autres éléments du processus, citons la consolidation des risques actif/passifs par typologie de contrat, la consolidation par entité légale et prenant en compte les spécificités réglementaires de chaque pays ou encore l'exploitation de ces simulations pour optimiser le risque des contrats proposés ainsi que leur prix.

Problème traité dans ce projet

Le processus de construction des comptes consolidés se déroule sur plusieurs semaines et comprend des étapes de calcul ainsi que des étapes manuelles ; nous considérerons ici ces dernières comme instantanée. Les étapes de calcul correspondent à l'équivalent de 413177 heures de calcul, soit un peu plus de 10 jours pleins sur une infrastructure de 1700 cœurs. Cependant, en réalité, le processus ne peut se dérouler en 10 jours sur une telle infrastructure à cause des dépendances entre les tâches de calcul : il arrive qu'à certains moments, il n'y ait

pas assez de tâches pour occuper la grille. Une analyse fine des dépendances montre que la durée du chemin critique est de 11h30. Cette durée serait celle de l'ensemble du calcul si une infrastructure de taille infinie était disponible.

Sujet du projet : Afin d'optimiser les coûts sans pour autant investir dans une grille de calcul de très grande dimension qui ne serait finalement que très peu utilisée, nous souhaitons utiliser des ressources à la demande disponibles dans le cloud. Pour en tirer le meilleur parti, nous souhaitons **optimiser l'exécution du graphe de tâches** en recherchant :

- La meilleure stratégie d'allumage/extinction des nœuds de calcul.
- Le meilleur ordonnancement des tâches sur les nœuds disponibles.

L'étude devra prendre en compte les éléments suivants :

- Les dépendances entre les tâches
- La durée des tâches, connue à l'avance
- La durée du transfert des résultats entre les tâches (seuls les fichiers significatifs seront listés)
- La capacité du cœur de réseau que l'on supposera proportionnelle au nombre de nœuds.

Il convient de noter ici que le coût mentionné peut aussi bien être énergétique que financier et que les deux sont très liés : à l'usage, plus de la moitié du coût de possession d'une infrastructure de calcul correspond au coût de l'électricité, même en France avec l'énergie nucléaire. Nous ferons l'hypothèse (très simplificatrice) que le réseau n'a pas de coût.

Objectif du projet : fournir une application d'optimisation travaillant sur deux fichiers décrivant d'une part le graphe de tâches (durées et dépendances) et d'autre part les caractéristiques de l'infrastructure de calcul, et qui fournira en sortie un fichier décrivant l'ordonnancement de l'infrastructure (allumage et extinction des nœuds) ainsi que l'ordonnancement des tâches (placement d'une tâche sur un nœud à un moment donné).

Seront fournis aux étudiants :

- Une documentation décrivant les formats d'entrée, de sortie et les critères d'évaluation de la performance
- Des exemples de graphes et d'infrastructures
- Une API REST (fonction de calcul callable directement depuis Internet) permettant d'évaluer la qualité de la solution proposée
- Un accès à des ressources de calcul distribuées

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

Plan détaillé du cours (contenu)

Principales étapes de l'étude :

- Complément de cours en architecture matérielle des systèmes informatique, y compris les aspects énergétiques.
- Formalisation du problème et de la fonction de coût à optimiser.
- Choix d'une méthode d'optimisation par méta-heuristique adaptée au problème, exemples : algorithmes génétiques, colonies de fourmis, méthode à voisinages variables...
- Prise en main de ressources de calculs distantes (dans cloud ou supercalculateur sur lesquels ANEO possède des accès).
- Conception d'un algorithme parallèle de la méthode d'optimisation choisie, apte à passer à l'échelle en termes de taille ou de complexité du graphe de tâches traité.
- Implantation d'un code Python parallèle supportant le passage à l'échelle prévu.

- Exécution du code de résolution parallèle sur des jeux de données réels fournis par ANEO, et dans la limite des ressources de calculs allouées à l'étude.
- Analyse de la qualité des résultats du code de résolution, des performances des calculs de résolution effectués (vitesse de calcul, capacité d'extensibilité), et du coût associé dans une perspective d'exploitation industrielle.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer la pertinence globale de la solution trouvée et expérimentée, et la gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

Rmq : Les différents groupes d'étudiants seront confrontés à des hypothèses différentes sur les plates-formes de calcul visées, menant à des choix et des mises en œuvre de méthodes d'optimisation également différentes.

Déroulement, organisation du cours

Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 à 4 : compléments de cours, formalisation du problème, choix d'une méthode d'optimisation, et prise en main de ressources de calculs.
- Etapes 5 et 6 : première implantation parallèle fonctionnelle de l'algorithme de résolution, tests à petite échelle.
- Rapport intermédiaire et présentation d'avancement et du travail prévu en 2ème partie

Part 2 - *sprint final* (40HEE):

- Etapes 7 et 8 : exécution de l'algorithme de résolution sur des ressources de calcul intensif, et évaluation des résultats obtenus et des performances mesurées.
- Rebouclage au point 5 pour l'amélioration de l'algorithme de résolution et de son implantation parallèle.
- 1. Rapport final et présentation orale complète

Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

Moyens

Equipe enseignante :

- **A. Rimmel** (CentraleSupélec & LISN)
- **W. Kirschenmann** (ANEO)

Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des ressources de calculs distantes (cloud ou supercalculateur sur lesquels ANEO possède des accès).
- La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure de :

- **AA0** : d'identifier les parties consommatrices de CPU dans une chaîne d'optimisation, et de modéliser le coût énergétique d'un calcul distribué,
- **AA1** : d'identifier des méthodes d'optimisation adaptées à la minimisation du temps d'exécution d'un graphe de tâches, et adaptées à une parallélisation large échelle,
- **AA2** : de concevoir un algorithme parallèle supportant le passage à l'échelle, de l'implanter et de mettre au point son code sur une architecture distribuée,
- **AA3** : de déployer des simulations intensives sur des ressources de calculs distantes
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier
- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

2SC7695 – Optimisation à faible coût des performances d'un code de propagation d'ondes acoustiques

Responsables : **Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DOMINANTE - MATHÉMATIQUES, DATA SCIENCES, DOMINANTE - INFORMATIQUE ET NUMÉRIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Projet de la ST7 "Simulation à Haute Performance pour la réduction d'empreintes"

Sujet en partenariat avec INTEL

Dominantes : Informatique (INFONUM) & Math, Data Sciences (MDS)

Quel que soit le type d'application s'exécutant sur des machines parallèles dans un cadre « HPC » (*high performance computing*) et quel que soit leur niveau d'efficacité (en termes de performances ou d'empreinte énergétique), nous nous apercevons très facilement que l'impact des paramètres d'entrées est en général non négligeable. On peut notamment agir sur :

- Les paramètres de l'algorithme parallèle utilisé, comme la taille et la forme des domaines réalisant un découpage en sous-problèmes,
- Les paramètres de l'implantation HPC contrôlant par exemple le blocage des données en mémoire cache (*cache blocking*) pour diminuer les temps d'accès aux données,
- Les paramètres du déploiement de l'application parallèle, contrôlant la répartition processus-MPI vs threads-OpenMP et le placement de ces tâches de calculs pour occuper efficacement les cœurs CPU,
- Les paramètres contrôlant la politique de *scheduling* des threads (habituellement contrôlée par l'intermédiaire de variables d'environnements).
-

Ces différents paramètres d'entrée permettent d'améliorer l'exécution d'un code HPC sur une plate-forme de calcul. Mais il reste extrêmement difficile de comprendre exactement le comportement de l'application dans l'architecture des processeurs et quand bien même nous pourrions rendre l'application plus efficace par modification du code source, la dépendance aux cas tests et à l'environnement d'exécution resterait prépondérante.

Dans ce contexte où l'espace des paramètres peut être de dimension importante, l'utilisation d'algorithmes d'optimisation apparaît fondamentale pour converger vers un minimum global (ou au moins local) d'une fonction de coût exprimant le temps d'exécution et l'empreinte énergétique. On va donc utiliser des méthodes et algorithmes d'optimisation pour optimiser le fonctionnement d'un code de calcul HPC.

Cependant, chaque exécution d'un cas test d'une application de calcul intensif peut être longue, même sur une machine parallèle. Or l'espace des paramètres est grand et un algorithme d'optimisation peut requérir des dizaines de milliers d'exécutions de l'application (voire plus). Ce qui est réalisable à l'échelle d'un noyau de calcul reste insupportable à l'échelle d'une application complète.

Il devient donc nécessaire de choisir des méthodes d'optimisation pas trop gourmandes en nombre d'expérimentations, puis d'optimiser leur usage pour arriver à réduire l'empreinte du code HPC ciblé, sans que cette pré-étude ne consomme elle-même trop de ressources de calculs ! Ce qui revient à « **rechercher la méthode d'optimisation la moins coûteuse** » pour trouver un optimum entre vitesse de convergence (de l'algorithme d'optimisation) et qualité de la minimisation du temps d'exécution et de l'empreinte énergétique (de l'application HPC ciblée).

Détails techniques du système :

Nous démarrerons ce projet à partir :

- D'un code de calcul à haute performance (code HPC) qui simule l'équation des ondes 3D acoustiques en milieu homogène isotropique par différences finies, et qui s'exécute sur des clusters de PC multicœurs (en MPI + OpenMP),
- D'un algorithme génétique capable d'itérer sur de nombreux paramètres du code HPC tels que : taille et formes des domaines et du *cache blocking*, flags de compilation, variables d'environnement, nombre et placement des threads..., mais qui reste séquentiel et limité à une seule machine.

L'algorithme génétique appelle donc successivement le code de simulation d'ondes acoustiques dans différentes configurations, et ne peut l'appeler qu'en version multithreadée sur une machine (pas en version distribuée sur cluster). Cela permet néanmoins de rechercher la configuration optimale sur chaque PC, et de l'appliquer ensuite sur chaque PC lors d'une exécution sur un cluster de PC.

Les *différences finies* étant tout à fait explicites en termes de nombre d'opérations flottantes, nous pouvons facilement compter le nombre de points traités ou le nombre d'opérations flottantes réalisées lors d'une exécution, et en déduire une vitesse de traitement en Giga points/s ou GFlops/s. Nous pouvons alors chercher à minimiser le temps de la simulation (ou à maximiser la vitesse de traitement). Nous pouvons également consacrer et collecter quelques compteurs hardware pour obtenir la consommation énergétique exacte du processeur et de la mémoire, pour étudier finement l'impact énergétique de nos optimisations.

Mais un algorithme génétique est une méthode d'optimisation par population qui est gourmande en ressources de calculs, et l'implantation fournie n'exploite qu'un seul PC. La recherche d'une configuration optimale du code peut donc être très longue et rédhibitoire. Pour dépasser cette limitation nous adopterons deux approches :

- Tout d'abord identifier des méthodes d'optimisation ayant a priori des chances de converger en relativement peu d'essais vers un paramétrage efficace du code HPC (c-a-d menant à des exécutions rapides et peu gourmandes en énergie). On pourra étudier des méthodes d'optimisation à trajectoires (Hill Climbing, Simulated Annealing, Tabu search..., avec ou sans comportement glouton), ou d'autres méthodes à population moins gourmandes que les algorithmes génétiques (colonies de fourmis...). On recherchera ainsi une très bonne solution en un temps assez long, qui permettrait ensuite d'exécuter de nombreuses simulations de propagations d'ondes acoustiques très optimisées.
- On cherchera ensuite à expérimenter une méthode d'optimisation, ou une variante de celle expérimentée précédemment, qui convergerait « très rapidement » vers une solution de qualité seulement « assez bonne ». Une telle optimisation (très rapide) pourrait alors être intégrée à l'application sous la forme d'un pre-processing dynamique, en début ou en cours d'exécution sur machines parallèles, et constituer un mécanisme d'auto-optimisation de l'application.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Cours de 1A :

- Cours commun "Systèmes d'Information et Programmation" de SG1 (1CC1000)
- Cours commun "Algorithmique et complexité" de ST2 (1CC2000)

Cours de la ST :

- Cours commun "Optimisation" de la ST7 (2CC3000)
- Cours spécifique "Méthodes et algorithmes parallèles pour l'optimisation" de la ST7 (2SC7610)

Autres prérequis :

- Eléments du cours commun "CIP - Convergence, Intégration et Probabilités" (1SL1000)
- Eléments du cours commun "EDP - Equations aux dérivées partielles" (1SL1500)
- Des connaissances d'algèbre linéaire seront également nécessaires

Plan détaillé du cours (contenu)

Principales étapes de l'étude :

- Présentation du noyau de calcul fourni, complément de cours sur les méthodologies de caractérisation et d'accélération de code HPC (*compteurs hardware, modelé roofline, placement NUMA, vectorisation...*), prise en main des ressources de calculs distantes du Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec avec expérimentation des codes fournis par INTEL.
- Identification de méthodes d'optimisation prometteuses pour le problème, et ne lançant pas trop de simulations HPC d'ondes acoustiques. Le développement de méthodes hybrides pourra être envisagé.
- Développement d'une 1ère solution en Python séquentiel avec appel du code C de simulation fourni pour l'étude.
- Déroulement d'une première campagne d'optimisation-simulation sur machines multi-cœurs, avec une gestion d'un quota hebdomadaire d'heures de calculs. Identification d'une solution réduisant au mieux l'empreinte du code HPC de simulation d'ondes acoustiques
- Développements et expérimentations d'une 2nd solution, permettant de rechercher « très rapidement » une configuration « d'assez bonne » qualité, afin d'intégrer cette recherche à l'application de simulation en étape de pre-processing.
- Déroulement d'une seconde campagne d'optimisation-simulation sur machines multi-cœurs, avec une gestion d'un quota hebdomadaire d'heures de calculs.
- L'étude se terminera par la remise d'un rapport et une présentation orale visant à évaluer :
 - La démarche d'investigation adoptée,
 - La qualité de la solution trouvée : en termes de vitesse de convergence de chaque algorithme d'optimisation testé, et de temps de calcul et de consommation énergétique de la simulation parallèle optimisée,
 - La gestion du quota de ressources de calculs qui aura eu lieu durant le projet.

Rmq : Les différents groupes d'étudiants mettrons en œuvre des méthodes d'optimisation différentes.

Déroulement, organisation du cours

Partie 1 (40HEE) :

- Etapes 1 et 2 : complément de cours sur les optimisations de code HPC et sur les paramètres de configuration du code de simulation fourni, prise en main des ressources de calcul distantes du Data Center d'Enseignement avec expérimentation de la solution initiale, et identification de deux méthodes d'optimisation prometteuses.
- Etape 3 : implantation séquentielle en Python d'une première méthode d'optimisation appelant le code de simulation parallèle et HPC, première campagne d'optimisation-simulation sur un serveur de calcul multi-cœurs.
- Etape 4 : déroulement d'une campagne d'optimisation-simulation sur machines parallèles, avec la gestion d'un quota d'heures. Analyse des performances obtenues.
- Rapport intermédiaire, et présentation de l'avancement et du travail prévu en 2ème partie.

Partie 2 - *sprint final* (40HEE) :

- Etape 5 : identification d'une méthode permettant de rechercher « très rapidement » une configuration « assez bonne ». Nouvelle implantation en Python.
- Etape 6 : nouvelle campagne d'optimisation-simulation sur machines parallèles, avec la gestion d'un quota d'heures. Analyse des performances obtenues.
- Rapport final et présentation orale complète.

Organisation de l'évaluation

Le projet sera évalué par une soutenance intermédiaire en fin de partie 1 (40HEE), et une soutenance finale en fin de partie 2 (*sprint final* de 40HEE). Les soutenances se feront en groupe, mais pourront mener à des notes individualisées en cas d'hétérogénéité forte au sein du groupe. A chaque soutenance on évaluera la qualité globale de la présentation orale, des slides et du résumé d'activité. Chaque soutenance comptera pour 50% de la note finale.

Moyens

Equipe enseignante :

- **S. Vialle** (CentraleSupélec & LISN), **G. Quercini** (CentraleSupélec & LISN), **H. Talbot** (CentraleSupélec & CVN)
- **Ph. Thierry** (INTEL)

Lieu de travail et moyens de calculs :

- Les étudiants travailleront à CentraleSupélec, dans une salle équipée de prises électriques et d'un accès internet wifi
- Les étudiants utiliseront leurs PC portables pour accéder à des clusters de PC distants au Data Center d'Enseignement de CentraleSupélec.
- La soutenance finale se fera le dernier après-midi à CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet les étudiants seront en mesure :

- **AA0** : d'identifier les paramètres impactant l'exécution d'un code parallèle, et de configurer son exécution,
- **AA1** : de choisir et de paramétrer des méthodes d'optimisation convergeant avec un nombre limité d'expérimentations,
- **AA2** : de mettre au point un code Python séquentiels, appelant des codes parallèles sur des architectures parallèles,
- **AA3** : de déployer des simulations intensives sur des ressources de calculs distantes,
- **AA4** : d'identifier les limites de l'étude en fonction des ressources de calculs disponibles
- **AA5** : de gérer un quota de ressources de calculs lors d'une campagne de calculs intensifs.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C7 : Savoir convaincre
- C8 : Mener un projet, une équipe

ST7 - EFFICACITE DES SYSTEMES D'ENERGIE EMBARQUES

Dominante : **ENE (Energie)**

Langue d'enseignement : **Français**

Campus où le cours est proposé : **Paris-Saclay**

Problématique d'ingénieur

L'optimisation des systèmes d'énergie embarqués est une problématique rencontrée quotidiennement dans le monde industriel.

Que ce soit dans un objectif de réduire les coûts de production ou d'utilisation, pour participer à la transition énergétique en minimisant l'empreinte carbone, l'optimisation est incontournable dans le monde de l'énergie.

Gain de volume, de coût (conception optimale ou coût d'opération), de performances ou d'efficacité sont des objectifs que l'on retrouvera aussi bien dans les systèmes aéronautiques, spatiaux ou automobiles. L'aspect système et multiphysique de la conception est désormais pris en compte afin de satisfaire au mieux à un cahier des charges de plus en plus exigeant.

Lors de cette séquence des exemples industriels seront abordés : optimisation du rendement et du coût d'une chaîne de traction électrique sur quelques points de fonctionnement où sur des cycles routier, gestion optimale des sources d'énergie d'un système hybride.

Prérequis conseillés

Il est conseillé d'avoir suivi le cours « Energie électrique ».

Modules contexte et enjeux : ces modules comprennent une conférence introductive de la thématique, une table ronde impliquant les partenaires de la séquence, des interventions portant sur les verrous technologiques et scientifiques, ainsi qu'un atelier d'innovation.

Cours spécifique (60 HEE) : Optimisation des systèmes d'énergie embarqués

- Brève description : Après une description et formulation du problème ainsi qu'une présentation des modèles relatifs à l'optimisation, seront examinées les techniques d'optimisation de systèmes d'énergie, optimisation stochastique, estimation de paramètres, optimisation multi-source et optimisation multicritères.

Projet n°1 : Efficacité énergétique de machines électriques

- Partenaire associé : Leroy-Sommer
- Lieu : Paris-Saclay
- Brève description : La problématique de l'optimisation énergétique des machines électriques est posée d'une part par une recherche de la baisse des coûts d'utilisation mais aussi par la réglementation qui impose des rendements de plus en plus élevés afin de maîtriser la demande électrique.

Il est donc nécessaire d'optimiser le rendement des machines électriques. Bien entendu cette maximisation du rendement va à l'encontre d'une autre optimisation : celle du coût de fabrication. Une optimisation multicritère entre l'efficacité et le coût sera donc mise en place.

Projet n°2 : Optimisation de chaîne de traction sur cycle routier

- Partenaire associé :
- Lieu : Campus Paris-Saclay
- Brève description : La hausse du prix des énergies fossiles ainsi que les contraintes environnementales poussent le secteur automobile et de la mobilité à se tourner de plus en plus vers la traction électrique en remplacement ou complément du moteur thermique.

Le moteur électrique dans le véhicule n'est pas utilisé sur un unique point de fonctionnement comme c'est le cas pour une application statique mais doit répondre aux sollicitations de la conduite. Pour modéliser ces comportements, de nombreux cycles tests routiers sont utilisés. L'optimisation de la chaîne de traction en tant que système est rendu donc compliquée et coûteuse par le grand nombre de points de fonctionnement engendré par

ces cycles. Des techniques de réduction seront donc utilisés pour optimiser les rendements ou les masses des systèmes.

Projet n°3 : Gestion optimale d'un générateur hybride

- Partenaire associé :
- Lieu : Campus Paris-Saclay
- Brève description : Un générateur de production énergétique convertit une source en énergie. Un générateur est dit hybride lorsqu'il y a plusieurs sources à disposition (dans le cas électrique, il peut s'agir d'une batterie et d'un couple moteur thermique et alternateur). Le choix de la source d'énergie primaire est donc posé lors de l'utilisation.

Sur un cycle de fonctionnement (courbe de puissance demandée par exemple), il est nécessaire de trouver la consigne optimale conduisant à la meilleure gestion du générateur hybride : savoir si l'électricité est produite à partir de la batterie ou au contraire du générateur thermique.

Une optimisation est donc nécessaire pour réduire les coûts de fonctionnement ou augmenter les rendements. Par la suite une optimisation du système en fonction de cette gestion optimale est envisageable.

Projet n°4 : Optimisation d'une chaîne de propulsion navale sur cycle

- Partenaire associé : DCNS
- Lieu : Campus Paris-Saclay
- Brève description : 90% du commerce mondial se fait par voie maritime. En conséquence, le transport maritime est l'un des principaux contributeurs à la pollution atmosphérique : 3 % des émissions totales de gaz à effet de serre dans le monde. La propulsion navale électrique est l'un des candidats pour remplacer les systèmes de propulsion thermique conventionnels.

Dans un navire électrique, des turbines à gaz ou des générateurs diesel produisent de l'électricité qui est ensuite utilisée pour alimenter à la fois les moteurs de propulsion électriques et les charges auxiliaires. Le réseau électrique à bord peut être AC ou DC. Un tel système doit être optimisé afin de minimiser son coût et d'optimiser son efficacité. En particulier, si le navire suit un itinéraire fixe (comme un ferry), l'optimisation peut prendre en compte le cycle d'exploitation.

2SC7710 – Méthodes numériques et résolution des problèmes d'optimisation des systèmes d'énergies embarqués

Responsables : **Maya Hage Hassan, Philippe Dessante**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'optimisation des systèmes d'énergie embarqués est une problématique rencontrée quotidiennement dans le monde industriel. Que ce soit dans un objectif de réduire les coûts de production ou d'utilisation, pour participer à la transition énergétique en minimisant l'empreinte carbone, l'optimisation est incontournable dans le monde de l'énergie.

Gain de volume, de coût (conception optimale ou coût d'opération), de performances ou d'efficacité sont des objectifs que l'on retrouvera aussi bien dans les systèmes aéronautiques, spatiaux ou automobiles. L'aspect système et multiphysique de la conception est désormais pris en compte afin de satisfaire au mieux à un cahier des charges de plus en plus exigeant.

Lors de cette séquence des exemple industriels seront abordés via les projets : optimisation du rendement et du coût d'une chaîne de traction électrique sur quelques points de fonctionnement où sur des cycles routiers, conception optimale des actionneurs électriques, dimensionnement des convertisseurs pour des systèmes embarqués, conception de chaîne de traction navale et aéronautique, le dimensionnement d'un vélo électrique.

Plan global du cours (contenu)

- 1) Définition de l'activité de conception
- 2) Formulation du problème
- 3) Résolution : méthode déterministe, stochastique
- 4) Reformulation : Multi en mono objectif, et avec /sans contraintes
- 5) TP : modélisation multiphysique d'un transfo, optimisation (reformulation avec SQP) et NSGA-II
- 6) Évaluation des compétences (C6,C2) : 3h travail en autonomie salle imposée, CR à rendre à la fin de la séance**
- 7) Eco-Conception

Dans le cadre de cette séquence thématique, on vous propose des projets sous trois thèmes :

- Efficacité énergétique // Partenaires WattandWell, SafranTech, GeePs
- Gestion optimale du réseau // Partenaire SRD energies, GeePs
- Optimisation d'une chaîne de propulsion // GeePs

Vous êtes invité à choisir le projet qui vous intéresse le plus sous chaque thème. A la fin on vous attribuera un seul projet.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Énergie Électrique conseillé
Science des transferts conseillé

Plan détaillé du cours (contenu)

Formulation du problème
Modèles relatifs à l'optimisation
Optimisation de systèmes d'énergie
Optimisation stochastique (recruit simulé, algorithmes génétiques, evolution différentielle)
Estimation de paramètres
Programation dynamique
Optimisation multisource
Optimisation multicritère

Déroulement, organisation du cours

Cours
TD/TP : 9h
Evaluations des compétences : 3h

Organisation de l'évaluation

Examen écrit de 2h
Note de TP
Evaluations des compétences

Support de cours, bibliographie

Les présentations de cours
Les fichiers Matlab

Moyens

Cours, TD, TP, Evaluation des compétences, Projet de la ST

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Optimisation
Aspect Système
Optimisation des systèmes embarqués
Optimisation stochastique

Description des compétences acquises à l'issue du cours

L'étudiant sera capable de mettre en œuvre une optimisation d'un système embarqué.

- Formalisation du problème
- Optimisation mathématique
- Analyse des résultats
- Multi objectifs

2SC7790 – Efficacité des systèmes d'énergie embarqués

Responsables : **Philippe Dessante, Maya Hage Hassan**

Département de rattachement : **DOMINANTE - ENERGIE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

ST7 - CONCEPTION EN FABRICATION ADDITIVE

Dominante : CVT (Construction, Ville et Transports)

Langue d'enseignement : Anglais

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

Depuis ses débuts, la fabrication additive s'est avérée être un changement fondamental parmi les procédés de fabrication, permettant une personnalisation totale et une qualité artisanale au prix et avec la précision d'un procédé industrialisé moderne. C'est toutefois un procédé jeune, et par conséquent, pas encore totalement maîtrisé. C'est pourquoi le développement de méthodes (analytiques et numériques) capables de prévoir les caractéristiques finales de la pièce en optimisant le processus de conception semble une nécessité.

La séquence se concentre sur l'optimisation de la conception par fabrication additive :

- Choix optimal de matériau et de microstructure ;
- Optimisation de la géométrie par rapport aux contraintes multiphysiques ;
- Optimisation des paramètres du procédé (trajet d'impression, puissance du laser, caractéristiques des poudres...)
- Evaluation des enjeux économiques et sociaux de la FA par rapport aux procédés standards (Temps de fabrication, coût des matériaux, mains-d'œuvre employées, compatibilité environnementale...)

Cette conception présente un défi majeur de par la nature multiphysique du procédé de fabrication additive (thermique, mécanique, électromagnétique, métallurgique, changement de phase) et pose un problème multi-échelle tant dans l'espace que dans le temps (caractère évolutif du procédé).

Prérequis conseillés

Il est conseillé d'avoir suivi le cours SPI « Mécanique des milieux continus » et au moins un cours parmi les cours suivants : Matériaux, Science des transferts, Thermodynamique.

Modules contexte et enjeux

Ces modules comprennent des conférences et une étude de cas autour de l'écodesign, visant à présenter la problématique et les enjeux sociaux-de l'impression 3D.

Cours spécifique (60 HEE) : Couplages multiphysiques

Brève description : Ce cours abordera au sens large les concepts et les enjeux du couplage multiphysique. Les sujets suivants seront, entre autres, abordés pendant le cours :

- Couplage fort – faible
- Couplage de formulations différentes
- Couplage d'échelles différentes
- Puis nous nous intéresserons à des couplages particuliers, d'intérêt pour la fabrication additive :
- Laser sur poudre : couplage électro-thermique
- Fusion du lit de poudre : couplages discret-continu, solide-fluide et thermo-mécanique
- Phase de refroidissement : couplage aéro-thermique-mécanique

Le cours se finira par une réflexion sur la mécanique de la pièce finale (contrainte résiduelles, porosités, microstructure...)

Un fort accent est mis sur la pratique grâce à des TDs et une étude de cas sur le logiciel de simulation multiphysiques COMSOL. Les compétences acquises sont évaluées par l'étude de cas et un examen final.

Projet :

Brève description : La séquence est construite autour de divers projets portés par la dominante CVT. Les élèves, par groupe de 6 maximum, devront répondre à une problématique proposée par leur partenaire industriel autour de la conception d'une pièce en fabrication additive. Il pourra s'agir d'optimiser sa géométrie, de réfléchir à sa conception, de concevoir un système pour une utilisation donnée, d'analyser la performance de la pièce conçue par fabrication additive ... La plupart des sujets impliquent de la simulation éléments finis sur COMSOL

ou sur le logiciel de choix des élèves. Certains sujets peuvent proposer de l'expérimental.

Tous les projets devront suivre les étapes suivantes :

- Etape 1 : prise en main du sujet
- Etape 2 : Représentation simplifiée du problème pour arriver à une première solution
- Etape 3 : Optimisation du système dans un espace de paramètres donné
- Etape 4 : Analyse des coûts/bénéfices de la solution proposée par rapport à une solution initiale ou classique.

Exemple de partenaires et thématiques associées : Safran pour des pièces aéronautiques en fabrication additive métallique, ESA pour la conception de structures pour applications spatiales, XtreeE pour l'optimisation de structures génie civil en fabrication additive plâtre ou béton, Michelin pour la réalisation de bandes de roulement optimisées en fabrication additive polymère mais aussi des sujets de recherche avec le laboratoire LMPS.

2SC8110 – Couplages multiphysiques

Responsables : **Camille Gandiolle, Andrea Barbarulo**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours abordera au sens large les concepts et les enjeux du couplage multiphysique et de sa simulation numérique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Avoir suivi le cours SPI "Mécanique des milieux continus" et au moins un cours parmi les suivants : Matériaux, Science des transferts, Thermodynamique.

Plan détaillé du cours (contenu)

Ce cours abordera au sens large les concepts et les enjeux du couplage multiphysique.

Les sujets suivants seront, entre autres, abordés pendant le cours :

- Couplage fort – faible ;
- Couplage de formulations différentes ;
- Couplage d'échelles différentes.

Puis des couplages particuliers, d'intérêt pour la fabrication additive, seront étudiés plus en détail :

- Laser sur poudre : couplage électro-thermique
- Fusion du lit de poudre : couplages discret-continu, solide-fluide et thermo-mécanique
- Phase de refroidissement : couplage aéro-thermique-mécanique

Le cours se finira par une réflexion sur la mécanique de la pièce finale (contrainte résiduelles, porosités, microstructure...)

Déroulement, organisation du cours

- 1 remise à niveau en MMC et un tutoriel COMSOL à réaliser en autonomie.
- 1ère partie du cours : format CM + TD applicatifs
- 2nde partie du cours : étude de cas supervisée

Organisation de l'évaluation

Les connaissances et les compétences acquises seront testées par une étude de cas en groupe de 4 consistant à mettre en œuvre un système couplé par simulation éléments finis sur comsol (examen obligatoire N1) et un examen final (N2);

Nf= 50%N1+ 50%N2

Support de cours, bibliographie

- Zhang, Qun, and Song Cen, eds. "Multiphysics Modeling: Numerical Methods and Engineering Applications". Tsinghua University Press Computational Mechanics Series. Elsevier, 2015. <https://univ-scholarvox-com.ezproxy.universite-paris-saclay.fr/catalog/book/docid/88831751?searchterm=multiphysics>
- Peksen, Murat. "Multiphysics Modeling: Materials, Components, and Systems". Academic Press, 2018

Moyens

Les outils numériques suivant seront utilisés en support du cours : COMSOL

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Maîtriser les différents types de couplage ;
- Savoir justifier un choix de modélisation dans un système multiphysique ;
- Savoir formuler un modèle intégrant un couplage ;
- Savoir simuler ce couplage sous COMSOL et utiliser le logiciel de manière pertinente pour en tirer des conclusions sur comment optimiser le système

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C6 Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

2SC8190 – Optimisation de structure en fabrication additive

Responsables : **Camille Gandiolle**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Optimisation des propriétés physiques (mécaniques, acoustiques, thermiques...) d'une pièce proposée par un partenaire industriel ou académique. La conception optimisée devra intégrer les contraintes liées au procédé de fabrication additive.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Avoir suivi le cours SPI « Mécanique des milieux continus » et au moins un cours parmi les cours suivants : Matériaux, Science des transferts, Thermodynamique.

Plan détaillé du cours (contenu)

La séquence est construite autour de divers projets portés par la dominante CVT. Les élèves, par groupe de 6, devront répondre à une problématique proposée par leur client partenaire autour de la conception d'une pièce en fabrication additive. Il pourra s'agir d'optimiser sa géométrie, de réfléchir à sa conception, de concevoir un système pour une utilisation donnée, d'analyser la performance la pièce conçue par fabrication additive. Les domaines d'applications possibles sont l'aéronautique, le biomédical, le génie civil, le spatial... La plupart des sujets impliquent de la simulation éléments finis sur COMSOL ou sur le logiciel de choix des élèves. Certains sujets peuvent proposer de l'expérimental.

Tous les projets devront suivre les étapes suivantes :

- Etape 1 : prise en main du sujet
- Etape 2 : Représentation simplifiée de la pièce étudiée pour arriver à une première solution
- Etape 3 : Optimisation du système dans un espace de paramètres donné
- Etape 4 : Analyse des coûts bénéfiques de la solution proposé par rapport à une solution initiale ou classique.

Déroulement, organisation du cours

Les étudiants auront l'opportunité de pratiquer une première optimisation mécanique simple et de découvrir la mise en donnée pour la fabrication additive grâce à une activité en collaboration avec la fabrique. La pièce sera ensuite imprimée et testée. Valider cette activité permet de valider la compétence C6.

Organisation de l'évaluation

Les compétences C2 et C8 seront évalués tout au long du projet qui se finira par une soutenance en présence du partenaire industriel. Les compétences C2 et C7 seront évaluées lors de la soutenance. Le partenaire évaluera la compétence C4.

Contrôle continu pendant le projet (C2, C8) : N1

Note des enseignants pour la soutenance orale (C2, C7) : N2

Note des partenaires industriels (C2, C4, C7) : N3

Note sur la qualité scientifique du projet par les enseignants : N4

Note sur le travail à la Fabrique (C6) : N5

$$NF = 20\%N1 + 20\%N2 + 20\%N3 + 20\%N4 + 20\%N5$$

Moyens

Logiciels de l'école ou en accès libre, notamment COMSOL et OneShape

Moyens expérimentaux du LMPS

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C2 Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers
- C4 Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients
- C6.2 Pratiquer la conception collaborative au travers d'outils de conception et de prototypage de produits (CAO, imprimante 3D) ;
- C7 Savoir convaincre ;
- C8 Mener un projet, une équipe

ST7 – OPTIMISATION DANS LE CONTEXTE DE LA PROGRAMMATION QUANTIQUE

Dominante : **Informatique**

Langue d'enseignement : **Anglais**

Campus où le cours est proposé : **Paris-Saclay**

Problématique d'ingénieur

Optimisation dans le contexte de la programmation quantique.

Prérequis conseillés

Le cours et les projets s'appuient fortement sur l'algèbre linéaire et une expérience en programmation est nécessaire. En revanche il n'est pas nécessaire de connaître la physique quantique : la ST est uniquement orientée vers l'informatique, avec un peu de mathématiques.

Vue d'ensemble et objectifs

L'informatique quantique est un nouveau paradigme informatique dans lequel l'information est codée sur l'état des objets régis par les lois de la mécanique quantique. Par rapport à l'informatique classique, l'information quantique peut être dans un état de superposition et d'enchevêtrement, ce qui entraîne un parallélisme naturel dans les algorithmes quantiques. Il a été prouvé que ces propriétés de l'informatique quantique peuvent théoriquement améliorer la vitesse, la précision (c'est-à-dire trouver des solutions de meilleure qualité à un problème d'optimisation) et les capacités de passage à l'échelle des algorithmes classiques (parallèles) fonctionnant sur des superordinateurs. L'informatique quantique devrait permettre de résoudre efficacement des problèmes très complexes, tels que les problèmes "NP-complets/difficiles", pour lesquels les ordinateurs classiques s'appuient principalement sur des heuristiques pour rechercher des solutions sous-optimales.

De nombreux domaines scientifiques et techniques peuvent bénéficier de l'informatique quantique pour résoudre des problèmes à grande échelle. Aujourd'hui, des entreprises technologiques de premier plan investissent massivement dans la recherche et le développement afin d'exploiter la puissance de l'informatique quantique pour des applications industrielles : Volkswagen et BMW utilisent l'informatique quantique pour optimiser les itinéraires de transport, les chaînes d'approvisionnement et les processus de production ; La Poste l'utilise pour améliorer ses algorithmes de recherche opérationnelle et sa chaîne d'approvisionnement ; BASF, Merck, ExxonMobil et Total-EN l'utilisent pour modéliser des systèmes chimiques complexes et découvrir de nouveaux matériaux, produits chimiques et médicaments ; Samsung l'utilise pour améliorer la conception des semi-conducteurs en simulant des processus à l'échelle atomique ; ...

L'objectif principal de cette ST est de maîtriser la puissance des coprocesseurs quantiques (QPU), qui deviennent pertinents pour concevoir des algorithmes hybrides CPU-QPU et résoudre des cas d'utilisation quasi-réels. Les QPU ont encore des limites en termes de nombre de qubits disponibles, de durée maximale d'intrication, de profondeur maximale de circuit avant que trop de bruit quantique ne s'accumule... Il est donc nécessaire (1) d'optimiser les algorithmes hybrides CPU-QPU contrôlant l'utilisation de circuits quantiques sur les QPU, et (2) d'optimiser les circuits quantiques pour qu'ils fonctionnent sur du matériel quantique existant (ou sur le point d'être construit).

Modules contexte et enjeux

Les trois sessions d'une demi-journée intitulées "Contexte et enjeux" seront organisées comme suit :

1. Présentation de la ST, du cours spécifique et des thèmes des projets. Ces derniers seront présentés avec les partenaires industriels.
2. Visite du TGCC (organisée par le CEA DAM), qui abrite les premières machines quantiques installées en France dans un environnement de calcul intensif. Présentation des machines (classiques et quantiques) et de la stratégie d'association des machines quantiques aux supercalculateurs (intégration des QPUs dans la pile logicielle HPC). Présentation des métiers du calcul haute performance et premiers retours d'expérience HPC-QPU.
3. Visite d'un site industriel français de conception/production de machines quantiques, ou séminaire sur l'informatique quantique avec des contributions d'entreprises françaises du domaine (principalement situées en région parisienne). Discussion sur les défis industriels et l'écosystème de l'informatique quantique.

Cours spécifique (60 HEE) :

Brève description : Le cours est composé de 10 sessions, comme suit.

1. Vue d'ensemble du matériel informatique quantique, introduction aux notions de qubit, d'informatique quantique et de correction d'erreur quantique. (3h, leçon)
2. Le modèle de coprocesseur quantique : Portes quantiques, circuits quantiques, manipulation de la mémoire, mesure, structure de haut niveau des algorithmes quantiques. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
3. Expressivité, synthèse et optimisation de circuits, jeux de portes universels (Clifford+T, Clifford+Toffoli). (1h30 de cours + 1h30 de TD)
4. Exemples d'algorithmes quantiques basés sur des oracles : Deutsch-Jozsa, Grover. (1h30 de cours + 1h30 de TP)
5. Algorithmes quantiques variationnels (VQE, QAOA) et apprentissage automatique quantique. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
6. Modèles alternatifs de calcul quantique : MBQC. (1h30 de cours + 1h30 de TP)
7. Modèle alternatif de calcul quantique : L'informatique quantique à base d'optique linéaire. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
8. Focus : Calcul quantique et optimisation avec des qubits volants. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
9. Focus : Calcul quantique et optimisation avec des qubits statiques. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
- 10- Revoir et approfondir les points difficiles du cours (1h30 de cours)

Les sessions de laboratoire utiliseront la boîte à outils Qiskit (à l'exception des 7ème et 8ème sessions, où l'outil Perceval sera privilégié car il est axé sur les qubits volants).

La dernière session (1h30) est consacrée à la révision et à l'approfondissement des points difficiles du cours.

Projet 1 : Optimisation des circuits quantiques pour les qubits de chat résistants aux erreurs

- **Partenaires associés** : CEA, Alice&Bob
- **Lieu** : CentraleSupélec, campus de Saclay
- **Brève description** :

La start-up française Alice & Bob (A&B) propose une technologie d'informatique quantique basée sur le paradigme du "qubit de chat". Celle-ci offre des avantages en termes de gestion des erreurs.

Les technologies quantiques actuelles sont naturellement bruyantes : les valeurs des qubits peuvent être modifiées par l'environnement et les portes quantiques peuvent produire des résultats erronés. Les erreurs peuvent être modélisées mathématiquement par des portes de Pauli X et Z, puis corrigées par des méthodes algorithmiques très complexes et l'ajout de nombreuses portes et qubits redondants. En revanche, les qubits de chat sont structurellement peu sensibles aux erreurs de type X, ce qui simplifie les mécanismes de résilience aux erreurs puisqu'il ne reste qu'un seul type d'erreur (de type Z) à prendre en compte. Les algorithmes de correction sont donc beaucoup plus simples et consomment moins de portes et de qubits supplémentaires !

Cependant, cette technologie impose un ensemble de portes quantiques de base différent des autres technologies, ce qui a un impact sur l'étape finale de la génération de circuits quantiques. Le sujet proposé consiste à optimiser cette dernière étape de "transpilation" et à étudier les problèmes suivants : Concevoir une transpilation optimale d'un circuit standard en un circuit conforme à l'ensemble de portes A&B, qui n'a pas de portes de Hadamard (H) mais qui permet aux qubits d'être initialisés à $|+\rangle$ et $|-\rangle$ et qui a nativement la porte de Toffoli (CCNOT).

Pour un problème donné et identifié, déterminer le coût minimum en termes de nombre de qubits et de portes quantiques, pour l'implémenter en qubits de chat avec les outils de programmation A&B. Dériver une méthodologie générique pour calculer le coût minimum.

Identifier les éléments qui doivent être ajoutés à un circuit de qubits de chat (cat-qubit) pour prendre en compte un type de bruit et effectuer une correction d'erreur initiale à faible coût. Faire ensuite varier le bruit modélisé et étudier comment les paramètres des algorithmes de correction doivent évoluer pour maintenir la résilience.

Moyens informatiques : Cluster INTI du CEA pour les simulations et/ou Data Center d'Enseignement (DCE) de CentraleSupélec.

Projet 2 : Chaîne de conversion d'un circuit quantique classique vers un circuit photonique optimisé

(transpilation)

- **Partenaires associés** : Quandela
- **Lieu** : CentraleSupélec, campus de Saclay
- **Brève description** :

La start-up Quandela travaille à la création d'un ordinateur quantique utilisant la technologie photonique. Les photons sont des particules particulièrement robustes et peu sensibles à la décohérence, ce qui en fait des candidats prometteurs pour l'exécution d'algorithmes quantiques. Ils interagissent peu avec l'environnement, ce qui permet d'isoler facilement la mémoire quantique du monde extérieur à des fins de calcul. L'inconvénient est que les photons interagissent peu entre eux et qu'il est compliqué de générer une intrication. Avec les codages photoniques standard, par exemple, il est impossible de réaliser une porte CNOT de manière déterministe.

Pour surmonter ce problème, il est possible de créer l'intrication directement à la source qui génère les photons. Nous disposons ainsi d'un état de ressources hautement intriquées en entrée de notre calcul, sur lequel il est possible d'effectuer le calcul souhaité en utilisant uniquement des opérations sur les photons de manière isolée (portes à 1 qubit, et mesures). Nous aboutissons à un modèle de calcul alternatif, appelé MBQC (Measurement Based Quantum Computing), où l'intrication est réalisée au début du calcul et où une série de mesures sur les photons nous permet d'effectuer le même calcul que le modèle de circuit classique.

Ce projet se concentrera sur la chaîne de conversion impliquée dans le passage d'un circuit quantique à un circuit photonique en utilisant le formalisme MBQC. Il sera divisé en deux parties :

Partie 1 : Réécriture d'un circuit quantique comme une série d'instructions de calcul dans le modèle MBQC. En particulier, les algorithmes dérivés du calcul de mesure (une formalisation du modèle MBQC) seront étudiés.

Partie 2 : Traduire un calcul MBQC en un circuit photonique optimisé. Il sera alors possible de vérifier la validité de la chaîne complète circuit -> MBQC -> photonique à l'aide des outils de simulation de Perceval.

Ressources informatiques : Les étudiants auront accès aux crédits QPU lorsqu'ils s'inscriront sur le cloud de Quandela.

Pour un problème donné et identifié, déterminer le coût minimum en termes de nombre de qubits et de portes quantiques, pour l'implémenter en qubits de chat avec les outils de programmation A&B. Dériver une méthodologie générique pour calculer le coût minimum.

Identifier les éléments qui doivent être ajoutés à un circuit de qubits de chat (cat-qubit) pour prendre en compte un type de bruit et effectuer une correction d'erreur initiale à faible coût. Faire ensuite varier le bruit modélisé et étudier comment les paramètres des algorithmes de correction doivent évoluer pour maintenir la résilience.

Moyens informatiques : Cluster INTI du CEA pour les simulations et/ou Data Center d'Enseignement (DCE) de CentraleSupélec.

Projet 3 : Regroupement de données basé sur des circuits quantiques et des algorithmes d'optimisation

hybrides

- **Partenaires associés** : CA-CIB
- **Lieu** : CentraleSupélec, campus de Saclay
- **Brève description** :

Notre objectif est de prédire le comportement de certaines entités (clients, transactions...) à l'aide d'algorithmes prédictifs. Mais ces algorithmes prennent du temps et consomment beaucoup de ressources informatiques et d'énergie. Pour les accélérer, nous commençons par regrouper nos données en "groupes homogènes", en créant efficacement des clusters optimales de données à l'aide d'un algorithme quantique de regroupement de données. Ensuite, nous pouvons exploiter ces informations comprimées pour prédire les comportements des entités à l'aide d'algorithmes prédictifs qui fonctionneront plus rapidement grâce à l'exploitation des clusters en tant que variables explicatives.

Ce projet propose d'implémenter dans qiskit (l'environnement d'IBM) un algorithme de regroupement de données adapté à une architecture hybride CPU-QPU, en tenant compte des limitations actuelles de la technologie NISQ (noisy intermediate-scale quantum), qui impose des circuits peu profonds et un nombre limité de qubits. Une approche possible consiste à utiliser un algorithme d'optimisation itératif sur le CPU, qui transfère des calculs limités sur le QPU à chaque itération en modifiant la configuration (paramètres) du circuit quantique si nécessaire. Nous pouvons donc envisager :

- Un algorithme quantique variationnel (VQA), qui exécute un circuit quantique paramétré à chaque itération et fait évoluer ses paramètres pour converger vers le comportement correct du circuit. Un VQA associé à des circuits de réseaux neuronaux de type génératif ou GAN a donné de bons résultats pour le regroupement de données. Cependant, ce type d'algorithme d'apprentissage automatique quantique prend du temps et le réglage des hyperparamètres peut être délicat.
- Une approche plus conventionnelle est un algorithme itératif de Dürr-Hoyer pour calculer les distances et trouver les valeurs minimales à l'aide d'un algorithme quantique de Grover. Mais cette approche suppose l'existence d'une QRAM (simulable) et nécessite la construction d'un nouveau circuit Oracle pour chaque itération, ce qui peut également entraîner de longs délais d'exécution.

D'autres approches existent, et l'une d'entre elles sera choisie au début du projet et mise en œuvre par la suite.

Ressources informatiques :

- Des serveurs informatiques équipés de l'environnement Qiskit au Data Center d'Enseignement (DCE) sur le campus de Metz, pour les simulations.
- Des machines quantiques réelles disponibles gratuitement (en durée limitée) auprès d'IBM, pour les tests élémentaires.

Projet 4 : Recherche optimale de signaux faibles dans des traces réseau à l'aide de l'apprentissage

automatique quantique

- **Partenaires associés** : Orange
- **Lieu** : CentraleSupélec, campus de Saclay
- **Brève description** :

L'intelligence artificielle (IA) est très efficace pour détecter les logiciels malveillants. Cependant, aujourd'hui, la tendance est à l'utilisation de modèles gigantesques, entraînés sur des quantités massives de données, ce qui génère des besoins en ressources exorbitants, tant en termes de données que d'énergie. Il est donc nécessaire de travailler sur une utilisation raisonnable de cette technologie. Dans notre domaine, par exemple, nous ne disposons pas toujours d'une grande quantité de données, mais nous voulons extraire le maximum d'informations de manière efficace.

C'est dans cette optique que nous nous tournons vers l'apprentissage automatique quantique (QML). Nous basons nos recherches sur de petits algorithmes et de petits ensembles de données, pour rester cohérent avec les capacités actuelles des ordinateurs quantiques, qui ne disposent que d'un nombre limité de qubits. Nous devons ensuite trouver des moyens de mieux utiliser nos données, d'en extraire plus d'informations, d'adapter nos architectures, etc. L'avantage de QML sur ces problèmes vient de sa construction même, basée sur des mathématiques identifiables, permettant d'interpréter les résultats. Ainsi, la théorie de Lie et les représentations de groupes peuvent être utilisées pour sélectionner les modèles quantiques à utiliser, en fonction de certaines caractéristiques observées dans les données d'entrée.

Calendrier du projet :

- Un ensemble de données sera fourni au début du projet, et un rapide état des lieux des algorithmes/modèles de ML quantique sera effectué.
- Un modèle "raisonnable" (adapté aux machines existantes) sera ensuite choisi, mis en oeuvre (avec Qiskit) et évalué pendant le reste du projet.
- Diverses optimisations dans la mise en oeuvre du circuit quantique sur le QPU et dans le mécanisme d'apprentissage piloté par le CPU seront testées.

Ressources informatiques :

- Serveurs de calculs d'IBM et serveurs du Data Center d'Enseignement (DCE) équipés de l'environnement Qiskit, pour les simulations.
- Machines quantiques réelles disponibles gratuitement (en durée limitée) auprès d'IBM, pour les tests élémentaires.

2SC8310 – Programmation, Algorithmes et Optimisation Quantique

Responsables : **Benoît VALIRON, Stéphane Vialle**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'informatique quantique est un nouveau paradigme informatique dans lequel l'information est codée sur l'état des objets régis par les lois de la mécanique quantique. Par rapport à l'informatique classique, l'information quantique peut être dans un état de superposition et d'enchevêtrement, ce qui entraîne un parallélisme naturel dans les algorithmes quantiques. Il a été prouvé que ces propriétés de l'informatique quantique peuvent théoriquement améliorer la vitesse, la précision (c'est-à-dire trouver des solutions de meilleure qualité à un problème d'optimisation) et les capacités de passage à l'échelle des algorithmes classiques (parallèles) fonctionnant sur des superordinateurs. L'informatique quantique devrait permettre de résoudre efficacement des problèmes très complexes, tels que les problèmes "NP-complets/difficiles", pour lesquels les ordinateurs classiques s'appuient principalement sur des heuristiques pour rechercher des solutions sous-optimales.

De nombreux domaines scientifiques et techniques peuvent bénéficier de l'informatique quantique pour résoudre des problèmes à grande échelle. Aujourd'hui, des entreprises technologiques de premier plan investissent massivement dans la recherche et le développement afin d'exploiter la puissance de l'informatique quantique pour des applications industrielles : Volkswagen et BMW utilisent l'informatique quantique pour optimiser les itinéraires de transport, les chaînes d'approvisionnement et les processus de production ; La Poste l'utilise pour améliorer ses algorithmes de recherche opérationnelle et sa chaîne d'approvisionnement ; BASF, Merck, ExxonMobil et Total-EN l'utilisent pour modéliser des systèmes chimiques complexes et découvrir de nouveaux matériaux, produits chimiques et médicaments ; Samsung l'utilise pour améliorer la conception des semi-conducteurs en simulant des processus à l'échelle atomique ; ...

Prérequis

Le cours et les projets s'appuient fortement sur l'algèbre linéaire et une expérience en programmation est nécessaire. En revanche il n'est pas nécessaire de connaître la physique quantique : la ST est uniquement orientée vers l'informatique, avec un peu de mathématiques.

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours est composé de 10 sessions comprenant 16,5h de cours, 1,5h de TD et 10,5h de TP (total: 28,5h), comme suit :

1. Vue d'ensemble du matériel informatique quantique, introduction aux notions de qubit, d'informatique quantique et de correction d'erreur quantique. (3h, leçon)
2. Le modèle de coprocesseur quantique : Portes quantiques, circuits quantiques, manipulation de la mémoire, mesure, structure de haut niveau des algorithmes quantiques. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
3. Expressivité, synthèse et optimisation de circuits, jeux de portes universels (Clifford+T, Clifford+Toffoli). (1h30 de cours + 1h30 de TD)
4. Exemples d'algorithmes quantiques basés sur des oracles : Deutsch-Jozsa, Grover. (1h30 de cours + 1h30 de TP)
5. Algorithmes quantiques variationnels (VQE, QAOA) et apprentissage automatique quantique. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
6. Modèles alternatifs de calcul quantique : MBQC. (1h30 de cours + 1h30 de TP)
7. Modèle alternatif de calcul quantique : L'informatique quantique à base d'optique linéaire. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)

- 8. Focus : Calcul quantique et optimisation avec des 'qubits volants'. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
- 9. Focus : Calcul quantique et optimisation avec des 'qubits statiques'. (1h30 de cours + 1h30 de laboratoire)
- 10. Révision et approfondissement des points difficiles du cours (1h30 de cours)

Déroulement, organisation du cours

Le cours alternera entre présentations théorique et mises en application sur machine.

Organisation de l'évaluation

La note de 1ère session sera obtenue à partir d'un contrôle continu (rapports de certains TPs) et examen écrit individuel de 2h.

Le calcul est comme suit: MAX (50% EXAM + 50% CC , 75% EXAM + 25% CC)

En cas de rattrapage, l'évaluation se fera entièrement à partir d'un examen écrit individuel de 2nd session de 1h30 (100%).

Support de cours, bibliographie

Un polycopié sera mis à disposition des étudiants. Un livre usuel pour le domaine est sinon Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge university press.

Moyens

Les séances de laboratoire utiliseront la bibliothèque QisKit (à l'exception des 7ème et 8ème séances, où l'outil Perceval sera privilégié car il est axé sur les qubits volants), les ordinateurs des étudiants ou des moyens de calcul dans le Cloud.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

L'objectif principal de cette ST est de maîtriser la puissance des coprocesseurs quantiques (QPU), qui deviennent pertinents pour concevoir des algorithmes hybrides CPU-QPU et résoudre des cas d'utilisation quasi-réels. Les QPU ont encore des limites en termes de nombre de qubits disponibles, de durée maximale d'intrication, de profondeur maximale de circuit avant que trop de bruit quantique ne s'accumule... Il est donc nécessaire (1) d'optimiser les algorithmes hybrides CPU-QPU contrôlant l'utilisation de circuits quantiques sur les QPU, et (2) d'optimiser les circuits quantiques pour qu'ils fonctionnent sur du matériel quantique existant (ou sur le point d'être construit).

Description des compétences acquises à l'issue du cours

L'évaluation des compétences est faite dans les enseignements d'intégration

2SC8391 – Optimisation des circuits quantiques pour les qubits de chat résistants aux erreurs

Responsables : **Benoît VALIRON, Stéphane Vialle**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet est proposé en collaboration avec le CEA-DAM, et sera encadré par des Enseignants-Chercheurs de CentraleSupélec et par des chercheurs du CEA-DAM, en liaison avec des ingénieurs et chercheurs de la start-up française Alice & Bob (A&B).

Cette start-up française propose une technologie d'informatique quantique basée sur le paradigme du "qubit de chat". Celle-ci offre des avantages en termes de gestion des erreurs. Les technologies quantiques actuelles sont naturellement bruyantes : les valeurs des qubits peuvent être modifiées par l'environnement et les portes quantiques peuvent produire des résultats erronés. Les erreurs peuvent être modélisées mathématiquement par des portes de Pauli X et Z, puis corrigées par des méthodes algorithmiques très complexes et l'ajout de nombreuses portes et qubits redondants. En revanche, les qubits de chat sont structurellement peu sensibles aux erreurs de type X, ce qui simplifie les mécanismes de résilience aux erreurs puisqu'il ne reste qu'un seul type d'erreur (de type Z) à prendre en compte. Les algorithmes de correction sont donc beaucoup plus simples et consomment moins de portes et de qubits supplémentaires !

Toutefois, cette technologie impose un ensemble de portes quantiques de base différent de celui des autres technologies, ce qui a une incidence sur l'étape finale de la génération de circuits quantiques (la dernière étape de "transpilation").

Prérequis

Ce projet s'appuie fortement sur l'algèbre linéaire et sur le cours spécifique de la ST (2SC8310 : Programmation, Algorithmes et Optimisation Quantique).

Une expérience en programmation est également nécessaire pour implanter les algorithmes de transpilation qui seront développés dans le projet.

Plan détaillé du cours (contenu)

Le sujet proposé consiste à optimiser la dernière étape de « transpilation » et à étudier les problèmes suivants : Concevoir une transpilation optimale d'un circuit standard en un circuit conforme à l'ensemble de portes A&B, qui ne possède pas de portes de Hadamard (H) mais qui permet d'initialiser les qubits à $|+\rangle$ et $|-\rangle$ et qui possède nativement la porte de Toffoli (CCNOT).

Calendrier du projet :

- Pour un problème donné et identifié, déterminer le coût minimum en termes de nombre de qubits et de portes quantiques, pour l'implémenter en qubits de chat avec les outils de programmation d'A&B.
- Dérivez ensuite une méthodologie générique pour calculer le coût minimum.
- Identifier les éléments qui doivent être ajoutés à un circuit de qubits de chat pour prendre en compte un type de bruit et effectuer une correction d'erreur initiale à faible coût.
- Faire varier le bruit modélisé et étudier comment les paramètres des algorithmes de correction doivent évoluer pour maintenir la résilience.

Déroulement, organisation du cours

Des équipes de 4 ou 5 étudiants seront constituées. Chaque équipe traitera le sujet de ce projet, mais avec une approche différente des autres.

Le projet commencera par une rapide étude bibliographique des algorithmes quantiques permettant de résoudre le problème étudié, ou au moins des problèmes similaires. Un type d'algorithme sera alors choisi, compatible avec la technologie des machines quantiques d'A&B, puis implanté, simulé et testé.

Tout au long du projet des réunions avec les encadrants auront lieu au moins une fois par semaine, et une présentation à mi-parcours permettra d'analyser les premiers résultats et éventuellement d'infléchir les développements si besoin. Un rapport et une présentation finale permettra de présenter la démarche et les résultats obtenus, et de lister les difficultés rencontrées et les limites de la solution proposée.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fait a priori pour l'ensemble du groupe d'étudiant, mais des notations individuelles peuvent apparaître en cas de forte diversité d'investissement et de résultats entre les membres du groupe.

L'évaluation à mi-parcours comptera pour 30% de la note, et l'évaluation finale pour 70%. Chaque évaluation tiendra compte de la clarté de la présentation et des documents rendus, de la qualité de la solution proposée, de la qualité des développements et des résultats obtenus. La cohésion du groupe lors du déroulement du projet et des présentations sera également prise en compte.

En cas de note finale inférieure à 10 mais supérieure ou égale à 7, un complément de travail en autonomie et une nouvelle présentation des résultats (écrite et orale) sera demandée aux étudiants concernés pour tenter de rattraper leur projet de ST7.

En cas de note finale inférieure à 7, ou de note de rattrapage inférieure à 10, l'étudiant effectuera un "électif expérimental" à une date ultérieure pour tenter de valider son projet de ST7.

Moyens

Le projet sera réalisé dans l'environnement de développement d'Alice & Bob pour la programmation de systèmes hybrides CPU+QPU avec des « qubits de chat », et les serveurs de calcul du cluster INTI du CEA et/ou du Data Center for Education (DCE) de CentraleSupélec seront utilisés pour effectuer des simulations de cat qubits.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet de ST7 les étudiants sauront :

- Développer un algorithme de transpilation pour une architecture donnée
- Implanter, tester et évaluer une chaîne de compilation quantique
- Évaluer la qualité et les performances des résultats obtenus, et évaluer les limites de leur approche,
- Présenter des travaux d'informatique quantique réalisés en équipe.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

C8 : Mener un projet, une équipe

2SC8392 – Chaîne de conversion d'un circuit quantique classique vers un circuit photonique optimisé (transpilation)

Responsables : **Benoit VALIRON, Stephane Vialle**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet est proposé en collaboration avec Quandela et sera encadré par des Enseignants-Chercheur de CentraleSupélec et par des Ingénieurs de Quandela.

La start-up Quandela travaille à la création d'un ordinateur quantique utilisant la technologie photonique : l'objectif est de proposer une chaîne de compilation permettant de mettre en oeuvre un circuit quantique "standard" avec des photons.

Prérequis

Ce projet s'appuie fortement sur l'algèbre linéaire et sur le cours spécifique de la ST (2SC8310 : Programmation, Algorithmes et Optimisation Quantique).

Une expérience en programmation est également nécessaire pour implanter les algorithmes quantiques qui seront développés dans le projet.

Plan détaillé du cours (contenu)

La start-up Quandela travaille à la création d'un ordinateur quantique utilisant la technologie photonique. Les photons sont des particules particulièrement robustes et peu sensibles à la décohérence, ce qui en fait des candidats prometteurs pour l'exécution d'algorithmes quantiques. Ils interagissent peu avec l'environnement, ce qui permet d'isoler facilement la mémoire quantique du monde extérieur à des fins de calcul. L'inconvénient est que les photons interagissent peu entre eux et qu'il est compliqué de générer une intrication. Avec les codages photoniques standard, par exemple, il est impossible de réaliser une porte CNOT de manière déterministe.

Pour surmonter ce problème, il est possible de créer l'intrication directement à la source qui génère les photons. Nous disposons ainsi d'un état de ressources hautement intriquées en entrée de notre calcul, sur lequel il est possible d'effectuer le calcul souhaité en utilisant uniquement des opérations sur les photons de manière isolée (portes à 1 qubit, et mesures). Nous aboutissons à un modèle de calcul alternatif, appelé MBQC (Measurement Based Quantum Computing), où l'intrication est réalisée au début du calcul et où une série de mesures sur les photons nous permet d'effectuer le même calcul que le modèle de circuit classique.

Déroulement, organisation du cours

Des équipes de 4 ou 5 étudiants seront constituées.

Ce projet se concentrera sur la chaîne de conversion impliquée dans le passage d'un circuit quantique à un circuit photonique en utilisant le formalisme MBQC. Il sera divisé en deux parties :

- Partie 1 : Réécriture d'un circuit quantique comme une série d'instructions de calcul dans le modèle MBQC. En particulier, les algorithmes dérivés du calcul de mesure (une formalisation du modèle MBQC) seront étudiés.
- Partie 2 : Traduire un calcul MBQC en un circuit photonique optimisé. Il sera alors possible de vérifier la validité de la chaîne complète circuit -> MBQC -> photonique à l'aide des outils de simulation de Perceval.

Tout au long du projet des réunions avec les encadrants auront lieu au moins une fois par semaine, et une présentation à mi-parcours permettra d'analyser les premiers résultats et éventuellement d'infléchir les développements si besoin. Un rapport et une présentation finale permettra de présenter la démarche et les résultats obtenus, et de lister les difficultés rencontrées et les limites de la solution proposée.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fait a priori pour l'ensemble du groupe d'étudiant, mais des notations individuelles peuvent apparaître en cas de forte diversité d'investissement et de résultats entre les membres du groupe.

L'évaluation à mi-parcours comptera pour 30% de la note, et l'évaluation finale pour 70%. Chaque évaluation tiendra compte de la clarté de la présentation et des documents rendus, de la qualité de la solution proposée, de la qualité des développements et des résultats obtenus. La cohésion du groupe lors du déroulement du projet et des présentations sera également prise en compte.

En cas de note finale inférieure à 10 mais supérieure ou égale à 7, un complément de travail en autonomie et une nouvelle présentation des résultats (écrite et orale) sera demandée aux étudiants concernés pour tenter de rattraper leur projet de ST7.

En cas de note finale inférieure à 7, ou de note de rattrapage inférieure à 10, l'étudiant effectuera un "électif expérimental" à une date ultérieure pour tenter de valider son projet de ST7.

Moyens

La programmation nécessaire pour ce projet sera faite en Python, dans l'outil Perceval développé par Quandela. Les étudiants auront accès à des crédits QPU lorsqu'ils s'inscriront sur le cloud de Quandela, afin de pouvoir réaliser des expérimentations dans le cloud.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet de ST7 les étudiants sauront :

- Modéliser du calcul dans des paradigmes physiques différents
- Développer un algorithme de compilation et d'optimisation de circuits quantique
- Implanter, tester et évaluer une chaîne de compilation quantique
- Évaluer la qualité et les performances des résultats obtenus, et évaluer les limites de leur approche,
- Présenter des travaux d'informatique quantique réalisés en équipe.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

C8 : Mener un projet, une équipe

2SC8393 – Regroupement de données basé sur des circuits quantiques et des algorithmes d'optimisation hybrides

Responsables : **Stephane Vialle, Benoit VALIRON**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet est proposé en collaboration avec Crédit-Agricole Credit Investment Banking (CA-CIB), et sera encadré par des Enseignants-Chercheur de CentraleSupélec et par des Ingénieurs de CA-CIB.

L'objectif est de prédire le comportement de certaines entités (clients, transactions...) à l'aide d'algorithmes prédictifs. Mais ces algorithmes prennent du temps et consomment beaucoup de ressources informatiques et d'énergie. Pour les accélérer, nous commençons par regrouper nos données en « groupes homogènes », en créant efficacement des grappes optimales de données à l'aide d'un algorithme quantique de regroupement de données. Ensuite, nous pouvons exploiter ces informations comprimées pour prédire les comportements des entités à l'aide d'algorithmes prédictifs qui fonctionneront plus rapidement grâce à l'exploitation des grappes en tant que variables explicatives.

Prérequis

Ce projet s'appuie fortement sur l'algèbre linéaire et sur le cours spécifique de la ST (2SC8310 : Programmation, Algorithmes et Optimisation Quantique).

Une expérience en programmation est également nécessaire pour implanter les algorithmes quantiques qui seront développés dans le projet.

Plan détaillé du cours (contenu)

Ce projet propose d'implémenter dans qiskit (l'environnement d'IBM) un algorithme de regroupement de données adapté à une architecture hybride CPU-QPU, en tenant compte des limitations actuelles de la technologie NISQ (noisy intermediate-scale quantum), qui impose des circuits peu profonds et un nombre limité de qubits. Une approche possible consiste à utiliser un algorithme d'optimisation itératif sur le CPU, qui transfère des calculs limités sur le QPU à chaque itération, en modifiant la configuration (paramètres) du circuit quantique si nécessaire. Nous pouvons ainsi envisager

- Un algorithme quantique variationnel (VQA), qui exécute un circuit quantique paramétré à chaque itération et fait évoluer ses paramètres pour converger vers le comportement correct du circuit. Un VQA associé à des circuits de réseaux neuronaux de type génératif ou GAN a donné de bons résultats pour le regroupement de données. Toutefois, ce type d'algorithme d'apprentissage automatique quantique prend du temps et le réglage des hyperparamètres peut être délicat.
- Une approche plus conventionnelle est un algorithme itératif de Dürr-Hoyer pour calculer les distances et trouver les valeurs minimales à l'aide d'un algorithme quantique de Grover. Mais elle suppose l'existence d'un QRAM (simulable) et nécessite la construction d'un nouveau circuit Oracle pour chaque itération, ce qui peut également entraîner des temps d'exécution longs.

D'autres approches existent, et l'une d'entre elles sera choisie au début du projet, puis mise en œuvre.

Déroulement, organisation du cours

Des équipes de 4 ou 5 étudiants seront constituées. Chaque équipe traitera le sujet de ce projet, mais avec une approche différente des autres.

Le projet commencera par une rapide étude bibliographique des algorithmes quantiques permettant de résoudre le problème étudié, ou au moins des problèmes similaires. Un type d'algorithme sera alors choisi, compatible avec la technologie des machines quantiques 'digitales', programmables par circuits quantiques. On privilégiera les algorithmes compatibles avec les architectures NISQ actuelles (architectures quantiques bruitées) pour de petites tailles de problèmes.

Une solution algorithmique complète sera développée puis implantée en qiskit, et testée en simulation parfaite et bruitée. Les limites de l'approche seront identifiées. Des expérimentations à petite échelle seront finalement expérimentées sur de vraies machines quantiques à travers Internet.

Tout au long du projet des réunions avec les encadrants auront lieu au moins une fois par semaine, et une présentation à mi-parcours permettra d'analyser les premiers résultats et éventuellement d'infléchir les développements si besoin. Un rapport et une présentation finale permettra de présenter la démarche et les résultats obtenus, et de lister les difficultés rencontrées et les limites de la solution proposée.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fait a priori pour l'ensemble du groupe d'étudiant, mais des notations individuelles peuvent apparaître en cas de forte diversité d'investissement et de résultats entre les membres du groupe.

L'évaluation à mi-parcours comptera pour 30% de la note, et l'évaluation finale pour 70%. Chaque évaluation tiendra compte de la clarté de la présentation et des documents rendus, de la qualité de la solution proposée, de la qualité des développements et des résultats obtenus. La cohésion du groupe lors du déroulement du projet et des présentations sera également prise en compte.

En cas de note finale inférieure à 10 mais supérieure ou égale à 7, un complément de travail en autonomie et une nouvelle présentation des résultats (écrite et orale) sera demandée aux étudiants concernés pour tenter de rattraper leur projet de ST7.

En cas de note finale inférieure à 7, ou de note de rattrapage inférieure à 10, l'étudiant effectuera un "électif expérimental" à une date ultérieure pour tenter de valider son projet de ST7.

Moyens

Ce projet sera réalisé dans l'environnement de développement 'qiskit', produit par IBM pour la programmation de systèmes hybride CPU+QPU, et basé sur Python.

Des serveurs de calculs du Data Center d'Enseignement (DCE) de CentraleSupélec seront utilisés pour exécuter en simulation les algorithmes développés en qiskit, et de vraies machines quantiques mises à disposition à travers Internet par IBM, permettront de réaliser certaines expérimentations en temps limité.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet de ST7 les étudiants sauront :

- Développer un algorithme hybride classique-quantique de clustering de données en réutilisant un circuit adapté,
- Planter, tester et évaluer un algorithme hybride à base de circuits quantiques, développé en qiskit,
- Lancer des simulations parfaites ou bruitées de systèmes quantiques,
- Lancer des codes hybrides sur de vraies machines quantiques à travers internet,
- Évaluer la qualité et les performances des résultats obtenus, et évaluer les limites de leur approche,
- Présenter des travaux d'informatique quantique réalisés en équipe.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

C8 : Mener un projet, une équipe

2SC8394 – Recherche optimale de signaux faibles dans des traces réseau à l'aide de l'apprentissage automatique quantique

Responsables : **Stephane Vialle, Benoit VALIRON**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet est proposé en collaboration avec Orange, et sera encadré par des Enseignants-Chercheur de CentraleSupélec et par des Ingénieurs et Chercheurs d'Orange.

L'intelligence artificielle (IA) est très efficace pour détecter les logiciels malveillants. Cependant, aujourd'hui, la tendance est à l'utilisation de modèles gigantesques, entraînés sur des quantités massives de données, ce qui génère des besoins en ressources exorbitants, tant en termes de données que d'énergie. Il est donc nécessaire de travailler sur une utilisation raisonnable de cette technologie. Par exemple dans le domaine d'Orange (Telecom, Cloud...) on ne disposons pas toujours d'une grande quantité de données, mais on souhaite extraire le maximum d'informations de manière efficace. C'est pourquoi nous nous tournons vers l'apprentissage automatique quantique (QML) pour détecter les logiciels malveillants.

Prérequis

Ce projet s'appuie fortement sur l'algèbre linéaire et sur le cours spécifique de la ST (2SC8310 : Programmation, Algorithmes et Optimisation Quantique).

Une expérience en programmation est également nécessaire pour implanter les algorithmes quantiques qui seront développés dans le projet.

Plan détaillé du cours (contenu)

Pour détecter les logiciels malveillants à l'aide d'algorithmes de ML quantique, nous basons nos recherches sur de petits algorithmes et de petits ensembles de données, afin de rester cohérents avec les capacités actuelles des ordinateurs quantiques, qui ne disposent que d'un nombre limité de qubits. Nous devons ensuite trouver des moyens de mieux utiliser nos données, d'en extraire plus d'informations, d'adapter nos architectures, etc. L'avantage de QML sur ces problèmes vient de sa construction même, basée sur des mathématiques identifiables, permettant d'interpréter les résultats. Ainsi, la théorie de Lie et les représentations de groupes peuvent être utilisées pour sélectionner les modèles quantiques à utiliser, en fonction de certaines caractéristiques observées dans les données d'entrée.

Calendrier du projet :

- Un ensemble de données sera fourni au début du projet, et un rapide état des lieux des algorithmes/modèles de ML quantique sera effectué.
- Un modèle « raisonnable » (adapté aux machines existantes) sera ensuite choisi, implémenté (avec Qiskit), et évalué pendant le reste du projet.
- Diverses optimisations dans l'implémentation du circuit quantique sur le QPU et dans le mécanisme d'apprentissage piloté par le CPU seront testées.

Ressources informatiques :

- Serveurs informatiques IBM et serveurs DCE (Data Center for Education) équipés de l'environnement Qiskit pour les simulations,
- Machines quantiques réelles disponibles gratuitement (en nombre limité) auprès d'IBM pour les tests de référence élémentaires.

Déroulement, organisation du cours

Des équipes de 4 ou 5 étudiants seront constituées. Chaque équipe traitera le sujet de ce projet, mais avec une approche différente des autres.

Le projet commencera par une rapide étude bibliographique des algorithmes quantiques permettant de résoudre le problème étudié, ou au moins des problèmes similaires. Un type d'algorithme sera alors choisi, compatible avec la technologie des machines quantiques 'digitales', programmables par circuits quantiques. On privilégiera les algorithmes compatibles avec les architectures NISQ actuelles (architectures quantiques bruitées) pour de petites tailles de problèmes.

Une solution algorithmique complète sera développée puis implantée en qiskit, et testée en simulation parfaite et bruitée. Les limites de l'approche seront identifiées. Des expérimentations à petites échelles seront finalement expérimentées sur de vraies machines quantiques à travers Internet.

Tout au long du projet des réunions avec les encadrants auront lieu au moins une fois par semaine, et une présentation à mi-parcours permettra d'analyser les premiers résultats et éventuellement d'infléchir les développements si besoin. Un rapport et une présentation finale permettra de présenter la démarche et les résultats obtenus, et de lister les difficultés rencontrées et les limites de la solution proposée.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fait a priori pour l'ensemble du groupe d'étudiant, mais des notations individuelles peuvent apparaître en cas de forte diversité d'investissement et de résultats entre les membres du groupe.

L'évaluation à mi-parcours comptera pour 30% de la note, et l'évaluation finale pour 70%. Chaque évaluation tiendra compte de la clarté de la présentation et des documents rendus, de la qualité de la solution proposée, de la qualité des développements et des résultats obtenus. La cohésion du groupe lors du déroulement du projet et des présentations sera également prise en compte.

En cas de note finale inférieure à 10 mais supérieure ou égale à 7, un complément de travail en autonomie et une nouvelle présentation des résultats (écrite et orale) sera demandée aux étudiants concernés pour tenter de rattraper leur projet de ST7.

En cas de note finale inférieure à 7, ou de note de rattrapage inférieure à 10, l'étudiant effectuera un "électif expérimental" à une date ultérieure pour tenter de valider son projet de ST7.

Moyens

Ce projet sera réalisé dans l'environnement de développement 'qiskit', produit par IBM pour la programmation de systèmes hybride CPU+QPU, et basé sur Python.

Des serveurs de calculs d'IBM et du Data Center d'Enseignement (DCE) de CentraleSupélec seront utilisés pour exécuter en simulation les algorithmes développés en qiskit, et de vraies machines quantiques mises à disposition à travers Internet par IBM, permettront de réaliser certaines expérimentations en temps limité.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce projet de ST7 les étudiants sauront :

- Développer un algorithme hybride classique-quantique de clustering de données en réutilisant un circuit adapté,
- Planter, tester et évaluer un algorithme hybride à base de circuits quantiques, développé en qiskit,
- Lancer des simulations parfaites ou bruitées de systèmes quantiques,
- Lancer des codes hybrides sur de vraies machines quantiques à travers internet,
- Évaluer la qualité et les performances des résultats obtenus, et évaluer les limites de leur approche,
- Présenter des travaux d'informatique quantique réalisés en équipe.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 : Développer ses compétences dans un domaine d'ingénieur et dans un métier

C4 : Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients

C6 : Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

C7 : Savoir convaincre

C8 : Mener un projet, une équipe

ST7 – SOUTENABILITE ABSOLUE DES TERRITOIRES

Dominante : GSI (Grands Systèmes en Interaction), VSE (Vivants-Santé-Environnement), CVT (Construction, Ville et Transport)

Langue d'enseignement : Anglais

Campus où le cours est proposé : Paris-Saclay

Problématique d'ingénieur

La France, comme beaucoup d'autres pays, est confrontée à l'urgence climatique et à l'impératif de respecter les engagements pris dans l'Accord de Paris (ONU, 2015)¹. Malgré les différentes mesures déployées dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), les émissions de gaz à effet de serre (GES) restent insuffisamment réduites pour l'atteinte de la neutralité carbone, avec un dépassement plus global de six limites planétaires sur les neuf identifiées².

Ce décalage entre les objectifs et les trajectoires réelles souligne la nécessité d'une transformation systémique, dans laquelle les territoires jouent un rôle central. Les collectivités territoriales sont en première ligne pour définir, optimiser et mettre en œuvre des actions concrètes de décarbonation dans des secteurs clés (bâtiment, mobilité, énergie, agriculture, etc.). Elles traduisent les objectifs nationaux en objectifs régionaux et locaux, puis conçoivent et mettent en œuvre des documents de planification adaptés au contexte de leur territoire.

Cependant, elles manquent encore de ressources techniques et humaines pour concevoir, coordonner et évaluer efficacement les plans climat³. Dans ce contexte, il est essentiel de soutenir les territoires dans l'élaboration de trajectoires soutenables à l'aide de méthodes et outils robustes. Le cours aborde ainsi les différents défis rencontrés dans les processus de planification climatique : diagnostic, modélisation, définition des actions et leur évaluation.

1 UN. (2015). Paris Agreement (p. 27). United Nations.

2 Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

3 Bouillass, G., Baltazar, J., & Yannou, B. (2025). On the path towards carbon neutrality? A comprehensive analysis of local climate plans in France. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115240>

Objectifs

Cette séquence thématique permet aux étudiants de développer les compétences nécessaires en termes de méthodes et outils pour contribuer en tant qu'ingénieur à l'accompagnement des territoires dans leur transition écologique et en tant qu'expert en modélisation et optimisation des différents leviers de décarbonation dans un contexte global de soutenabilité.

- Appréhender les problématiques liées à la décarbonation territoriale dans un contexte de soutenabilité absolue, tenant compte des limites planétaires, en adoptant une approche systémique, pluridisciplinaire, multi-acteur et multi-sectorielle.
- Mobiliser les méthodes et outils adaptés pour diagnostiquer, construire des stratégies et modéliser des scénarios de décarbonation sur trois axes principaux (bâtiment, énergie, mobilité).
- Proposer des solutions pour soutenir les collectivités territoriales à construire des plans d'actions et évaluer leur soutenabilité.

Prérequis conseillés

Aucun

Module contexte et enjeux

L'introduction de la séquence est organisée autour de trois demi-journées visant à présenter la séquence, les projets et à introduire le cours. Trois sessions d'introduction visent à définir le contexte dans lequel les cours et les projets sont contextualisés. Elles sont dédiées à (1) la compréhension de la mise en œuvre pratique de la décarbonation allant de l'échelle internationale à l'échelle locale, et (2) comment une approche systémique peut contribuer à optimiser les décisions et à résoudre les défis rencontrés par les territoires pour atteindre les objectifs climatiques tout en contribuant à un avenir plus durable.

- Décarbonation à l'échelle internationale : Simulation de la COP | Léo Police (atelier de 3h)
- Décarbonation & transition écologique : Etat des lieux sur la SNBC | Ministère de la Transition écologique (conférence de 3h)
- Accompagnement des territoires dans la décarbonation : défis et solutions (conférence de 3h – en discussion)

Cours spécifique (60 HEE) : Planification pour des territoires soutenables

Les cours sont structurés selon les quatre phases de la planification territoriale. Ils abordent l'ensemble des problématiques rencontrées par les territoires et sont orientés vers la pratique où les étudiants sont activement impliqués à travers différents ateliers pour comprendre le processus de planification, la phase de diagnostic, la modélisation de scénarios et l'évaluation des impacts. Des cours thématiques sont proposés pour aborder des secteurs spécifiques, à savoir : la mobilité, l'énergie et le bâtiment. Enfin, les approches d'évaluation de la soutenabilité sont étudiées et explorées afin d'examiner les impacts environnementaux et sociaux potentiels des différents leviers de décarbonation.

DIAGNOSTIC

- Introduction au processus de planification territoriale : Diagnostic, Modélisation, Actions, Évaluation | Agglomération Paris-Saclay (Atelier 3h)
- Comment réaliser un diagnostic territorial (atténuation et adaptation) ? | Agglomération Paris-Saclay et Efficacity (cours 1h + Atelier 2h)

STRATÉGIE

- Modélisation et optimisation des leviers de décarbonation : dynamique des systèmes - plateforme ENROADS
- Classe inversée (1,5h) + atelier ENROADS (3h)
- Challenge modélisation et optimisation – Transport : scénarios et leviers de décarbonation du transport | CS (cours + tutoriel, 3h)
- Challenge modélisation et optimisation – Bâtiment : bâtiments et villes face au changement climatique | CSTB (cours + tutoriel, 3h)
- Challenge Modélisation et optimisation – Énergie : décarbonation et développement des énergies renouvelables | CS (cours + tutoriel, 3h)

ACTIONS ET ÉVALUATION

- Évaluation environnementale et sociale des systèmes sociotechniques | CS (cours + TD, 3h)
- Évaluation absolue de durabilité environnementale : Approches intégrant les limites planétaires appliquées aux territoires | CS (cours + TD, 3h).

Projet 1 : Optimisation des circuits quantiques pour les qubits de chat résistants aux erreurs

La séquence s'articule autour d'un projet territorial en collaboration avec l'Agglomération Paris-Saclay. Les projets sont organisés autour de trois axes thématiques clés : la mobilité, l'énergie et bâtiment - des secteurs qui sont à la fois au cœur des stratégies d'atténuation du changement climatique et essentiels pour assurer une production et une consommation plus soutenables. Ces trois secteurs sont profondément interdépendants. Il est donc essentiel de comprendre cette interdépendance afin de relever les défis complexes auxquels sont confrontées les collectivités territoriales lors de la conception des plans. Bien que des plans sectoriels spécifiques puissent exister parallèlement aux plans climat, il est essentiel de garantir la cohérence et l'intégration de ces documents.

Une modélisation et une optimisation efficaces doivent refléter la nature interconnectée de ces domaines. Par exemple, pour déterminer le déploiement optimal d'une infrastructure de recharge de véhicules électriques, il faut tenir compte à la fois des systèmes énergétiques existants et de la distribution des installations résidentielles. Ces interdépendances sont au cœur de la collaboration proposée avec l'agglomération Paris-Saclay, où les étudiants exploreront ces dynamiques dans le cadre d'un projet appliqué. Ci-dessous quelques exemples des projets proposés :

- **Modélisation de la décarbonation du bâtiment** : projet d'optimisation de la rénovation des bâtiments pour atteindre les objectifs locaux et nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ce

projet est proposé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en collaboration avec l'agglomération Paris-Saclay.

- **Modélisation de la décarbonation du transport** : projet d'optimisation des scénarios de transport selon la stratégie territoriale du territoire de Paris-Saclay et en cohérence avec les objectifs de réduction des émissions de GES.
- **Modélisation de la décarbonation énergétique** : projet d'optimisation des scénarios de développement des énergies renouvelables sur le territoire.
- **Stratégie et aide à la décision : Agglomération Paris Saclay**
 - Projet de développement d'un outil pour le territoire afin d'assurer un suivi cohérent des objectifs climat dans les trois secteurs : énergie, bâtiment et mobilité.
 - Projet d'analyse des impacts environnementaux et sociaux des leviers de décarbonation en intégrant les limites planétaires, à travers les approches de soutenabilité environnementale absolue (AESAs).

L'objectif principal est de développer des solutions holistiques et systémiques pour les collectivités territoriales, d'intégrer les considérations climatiques dans les processus de planification territoriale en s'assurant que les plans sectoriels sont cohérents avec les limites planétaires.

Pour mener à bien leurs projets, les étudiants auront accès à toutes les sources de données et à tous les outils de modélisation nécessaires. Le cours est conçu pour les doter d'une expérience pratique en matière de modélisation de scénarios, d'optimisation des actions climatiques et d'évaluation d'impact, tout en développant les compétences analytiques requises pour soutenir la décarbonation territoriale. Un accent particulier est mis sur l'évaluation des plans d'action à travers le prisme de la soutenabilité, en incorporant les dimensions environnementales, sociales et économiques.

Partenaires :

- Agglomération Paris-Saclay : coordination des projets et intégration transversal
- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) : proposition de projet pour l'axe des bâtiments
- Discussions en cours avec Efficacity, l'ADEME et un bureau d'études pour des projets supplémentaires.

Evaluation :

- Évaluation par groupe (50 %) : évaluation des livrables attendus des projets et cours spécifiques.
- Évaluation individuelle (50 %) :
 - Évaluation orale à la suite de la présentation du projet
 - Examen final

2SC8410 – Planification pour des territoires soutenables

Responsables : Ghada Bouillass, Marija JANKOVIC

Département de rattachement : DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS

Langues d'enseignement : ANGLAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 60

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 30,50

Présentation, objectifs généraux du cours

La France, comme beaucoup d'autres pays, est confrontée à l'urgence climatique et à l'impératif de respecter les engagements pris dans l'Accord de Paris (ONU, 2015) [1]. Malgré les différentes mesures déployées dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), les émissions de gaz à effet de serre (GES) restent insuffisamment réduites pour l'atteinte de la **neutralité carbone**, avec un dépassement plus global de six **limites planétaires** sur les neuf identifiées [2].

Ce décalage entre les objectifs et les trajectoires réelles souligne la nécessité d'une **transformation systémique**, dans laquelle les **territoires** jouent un rôle central. Les **collectivités territoriales** sont en première ligne pour définir, optimiser et mettre en œuvre des actions concrètes de **décarbonation** dans des secteurs clés (bâtiment, mobilité, énergie, agriculture, etc.). Elles traduisent les objectifs nationaux en objectifs régionaux et locaux, puis conçoivent et mettent en œuvre des documents de **planification** adaptés au contexte de leur territoire.

Cependant, elles manquent encore de ressources techniques et humaines pour concevoir, coordonner et évaluer efficacement les plans climat [3]. Dans ce contexte, il est essentiel de soutenir les territoires dans l'élaboration de trajectoires soutenables à l'aide de méthodes et outils robustes. Le cours aborde ainsi les différents défis rencontrés dans les processus de planification climatique : **diagnostic, définition de la stratégie, définition des actions et leur évaluation**.

Les cours sont structurés selon les quatre phases de la planification territoriale. Ils abordent l'ensemble des problématiques rencontrées par les territoires et sont orientés vers la pratique où les étudiants sont activement impliqués à travers différents ateliers pour comprendre le processus de planification, la phase de diagnostic, la modélisation de scénarios et l'évaluation des impacts. Des cours thématiques sont proposés pour aborder des secteurs spécifiques, à savoir : **la mobilité, l'énergie et le bâtiment**. Enfin, les approches d'évaluation de la **soutenabilité** sont étudiées et explorées afin d'examiner **les impacts environnementaux et sociaux** potentiels des différents **leviers de décarbonation**.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun.

Plan détaillé du cours (contenu)

DIAGNOSTIC

- Introduction au processus de planification territoriale : Diagnostic, Modélisation, Actions, Évaluation | Agglomération Paris-Saclay (Atelier 3h)
- Comment réaliser un diagnostic territorial (atténuation et adaptation) ? | Agglomération Paris-Saclay et Efficacity (cours 1h + Atelier 2h)

STRATÉGIE

- Modélisation et optimisation des leviers de décarbonation : dynamique des systèmes - plateforme ENROADS
- Classe inversée (1,5h) + atelier EN-ROADS (3h)
- Challenge modélisation et optimisation – Transport : scénarios et leviers de décarbonation du transport | CS (cours + tutoriel, 3h)
- Challenge modélisation et optimisation – Bâtiment : bâtiments et villes face au changement climatique | CSTB (cours + tutoriel, 3h)
- Challenge Modélisation et optimisation – Énergie : décarbonation et déploiement des énergies renouvelables | CS (cours + tutoriel, 3h)

ACTIONS ET ÉVALUATION

- Évaluation environnementale et sociale des systèmes sociotechniques | CS (cours + TD, 3h)
- Évaluation absolue de durabilité environnementale : Approches intégrant les limites planétaires appliquées aux territoires | CS (cours + TD, 3h)

Déroulement, organisation du cours

La ST propose différentes modalités pédagogiques :

- Conférences incluant des moments de débat ou d'exercices interactifs
- Ateliers interactifs : simulation de la COP, processus de planification et simulation des scénarios de décarbonation sur la plateforme EN-ROADS.
- Des cours thématiques fournissant les clés de compréhension de la modélisation des stratégies de décarbonation sur les secteurs étudiés: mobilité, énergie et bâtiment.
- Une classe inversée poursuivie d'un atelier en présence de mise en pratique.
- Des travaux en groupe lors des séances projet et une mise en cohérence globale de tous les livrables de la ST.

Organisation de l'évaluation

- **Évaluation du groupe (50 %) :** les résultats des différentes tâches effectuées tout au long du cours et des projets sont évalués.
 - Rapport du groupe comprenant les outils développés et d'autres documents d'appui.
 - Présentation finale
- **Évaluation individuelle (50 %) :**
 - Évaluation orale incluant la contribution individuelle à la réussite du projet et l'engagement aux cours, aux conférences et à la participation générale
 - Examen final

Support de cours, bibliographie

[1] UN. (2015). Paris Agreement (p. 27). United Nations.

[2] Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

[3] Bouillass, G., Baltazar, J., & Yannou, B. (2025). On the path towards carbon neutrality? A comprehensive analysis of local climate plans in France. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115240>

Moyens

Équipe pédagogique :

- Ghada Bouillass |Maîtres de Conférences au Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec - université Paris Saclay
- Marija Jankovic |Professeure au Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec - université Paris Saclay
- Eva Pineau |Directrice du service de la transition écologique à la Communauté d'agglomération Paris Saclay
- Claire Biermé |Responsable de mission Economie circulaire et mobilisation des entreprises à la Communauté d'agglomération Paris Saclay
- Laurent Zimmer |Professeur à CentraleSupélec, chargé de recherche CNRS - université Paris Saclay
- Autres intervenants externes Efficacity, CSTB, Doctorants à CentraleSupélec.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Cette séquence thématique permet aux étudiants de développer les compétences nécessaires en termes de méthodes et outils pour contribuer en tant qu'ingénieur à l'accompagnement des territoires dans leur transition écologique et en tant qu'expert en modélisation et optimisation des différents leviers de décarbonation dans un contexte global de soutenabilité.

- Appréhender les problématiques liées à la décarbonation territoriale dans un contexte de soutenabilité absolue, tenant compte des limites planétaires, en adoptant une approche systémique, pluridisciplinaire, multi-acteur et multi-sectorielle.
- Mobiliser les méthodes et outils adaptés pour diagnostiquer, construire des stratégies et modéliser des scénarios de décarbonation sur trois axes principaux (bâtiment, énergie, mobilité).
- Proposer des solutions pour soutenir les collectivités territoriales à construire des plans d'actions et évaluer leur soutenabilité.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers : PASS si la note de l'examen (cours spécifiques et conférences) est supérieure à 10, ET la note moyenne du projet (tous les livrables du groupe) est supérieur à 10.

C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les livrables projets suivants : présentation finale par groupe 50%, rapport par groupe 50%.

C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde du numérique : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les livrables du projet suivant : outils mobilisés et/ou développés (75%) et le rapport (25%).

C7 - Savoir convaincre : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les éléments suivants : examen final (50%) et projet 50% (moyenne de la présentation finale et du rapport par groupe).

C8 - Mener un projet, une équipe : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les éléments suivants : rapport inter-groupe 30%, et l'évaluation orale individuelle 70%.

2SC8494 – Planification soutenable du territoire de Paris Saclay

Responsables : Ghada Bouillass, Marija JANKOVIC

Département de rattachement : DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS

Langues d'enseignement : ANGLAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 95

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 40,50

Présentation, objectifs généraux du cours

La séquence s'articule autour d'un projet territorial en collaboration avec l'**Agglomération Paris-Saclay**. Les projets sont organisés autour de trois axes thématiques clés : **la mobilité, l'énergie et bâtiment** - des secteurs qui sont à la fois au cœur des stratégies d'atténuation du **changement climatique** et essentiels pour assurer une production et une consommation plus soutenables. Ces trois secteurs sont profondément interdépendants. Il est donc essentiel de comprendre cette interdépendance afin de relever les défis complexes auxquels sont confrontées les collectivités territoriales lors de la conception des plans. Bien que des plans sectoriels spécifiques puissent exister parallèlement aux plans climat, il est essentiel de garantir la cohérence et l'intégration de ces documents. Une modélisation et une optimisation efficaces doivent refléter la nature interconnectée de ces domaines. Par exemple, pour déterminer le déploiement optimal d'une infrastructure de recharge de véhicules électriques, il faut tenir compte à la fois des systèmes énergétiques existants et de la distribution des installations résidentielles. Ces interdépendances sont au cœur de la collaboration proposée avec l'agglomération Paris-Saclay, où les étudiants exploreront ces dynamiques dans le cadre d'un projet appliqué.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

ST7

Prérequis

Aucun.

Plan détaillé du cours (contenu)

Exemples de projets proposés :

- **Modélisation de la décarbonation du bâtiment** : projet d'optimisation de la rénovation des bâtiments pour atteindre les objectifs locaux et nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ce projet est proposé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en collaboration avec l'agglomération Paris-Saclay.
- **Modélisation de la décarbonation du transport** : projet d'optimisation des scénarios de transport selon la stratégie territoriale du territoire de Paris-Saclay et en cohérence avec les objectifs de réduction des émissions de GES.
- **Modélisation de la décarbonation énergétique** : projet d'optimisation des scénarios de développement des énergies renouvelables sur le territoire.

Stratégie et aide à la décision : Agglomération Paris Saclay

- **Projet de développement d'un outil pour le territoire** afin d'assurer un suivi cohérent des objectifs climat dans les trois secteurs : énergie, bâtiment et mobilité.
- **Projet d'analyse des impacts environnementaux et sociaux** des leviers de décarbonation en intégrant les limites planétaires, à travers les approches de soutenabilité environnementale absolue (AESa).

L'objectif principal est de développer des solutions holistiques et systémiques pour les collectivités territoriales, d'intégrer les considérations climatiques dans les processus de planification territoriale en s'assurant que les plans sectoriels sont cohérents avec les limites planétaires.

Pour mener à bien leurs projets, les étudiants auront accès à toutes les sources de données et à tous les outils de modélisation nécessaires. Le cours est conçu pour les doter d'une expérience pratique en matière de modélisation de scénarios, d'optimisation des actions climatiques et d'évaluation d'impact, tout en développant les compétences analytiques requises pour soutenir la décarbonation territoriale. Un accent particulier est mis sur l'évaluation des plans d'action à travers le prisme de la soutenabilité, en incorporant les dimensions environnementales, sociales et économiques.

Déroulement, organisation du cours

Équipe pédagogique :

- Ghada Bouillass |Maîtres de Conférences au Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec - université Paris Saclay
- Marija Jankovic |Professeure au Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec - université Paris Saclay
- Eva Pineau |Directrice du service de la transition écologique à la Communauté d'agglomération Paris Saclay
- Claire Bierné |Responsable de mission Economie circulaire et mobilisation des entreprises à la Communauté d'agglomération Paris Saclay
- Martin Rit |Ingenieur recherche et expertise au CSTB
- Thomas Berthou |Chercheur en efficacité énergétique, Chef de projet au CSTB
- Laurent Zimmer |Professeur à CentraleSupélec, chargé de recherche CNRS - université Paris Saclay
- Autres intervenants externes Efficacy, CSTB, Doctorants à CentraleSupélec.

Organisation de l'évaluation

- **Évaluation du groupe (50 %) :** les résultats des différentes tâches effectuées tout au long du cours et des projets sont évalués.
 - Rapport du groupe comprenant les outils développés et d'autres documents d'appui.
 - Présentation finale
- **Évaluation individuelle (50 %) :**
 - Évaluation orale incluant la contribution individuelle à la réussite du projet et l'engagement aux cours, aux conférences et à la participation générale
 - Examen final

Moyens

Travail en groupes supervisés par les encadrants académiques, industriels et de la collectivité territoriale.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Cette séquence thématique permet aux étudiants de développer les compétences nécessaires en termes de méthodes et outils pour contribuer en tant qu'ingénieur à l'accompagnement des territoires dans leur transition écologique et en tant qu'expert en modélisation et optimisation des différents leviers de décarbonation dans un contexte global de soutenabilité.

- Appréhender les problématiques liées à la décarbonation territoriale dans un contexte de soutenabilité absolue, tenant compte des limites planétaires, en adoptant une approche systémique, pluridisciplinaire, multi-acteur et multi-sectorielle.
- Mobiliser les méthodes et outils adaptés pour diagnostiquer, construire des stratégies et modéliser des scénarios de décarbonation sur trois axes principaux (bâtiment, énergie, mobilité).
- Proposer des solutions pour soutenir les collectivités territoriales.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C2 - Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers : PASS si la note de l'examen (cours spécifiques et conférences) est supérieure à 10, ET la note moyenne du projet (tous les livrables du groupe) est supérieur à 10.

C4 - Avoir le sens de la création de valeur pour son entreprise et ses clients : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les livrables projets suivants : présentation finale par groupe 50%, rapport par groupe 50%.

C6 - Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde du numérique : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les livrables du projet suivant : outils mobilisés et/ou développés (75%) et le rapport (25%).

C7 - Savoir convaincre : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les éléments suivants : examen final (50%) et projet 50% (moyenne de la présentation finale et du rapport par groupe).

C8 - Mener un projet, une équipe : PASS si la moyenne est supérieure à 10 sur les éléments suivants : rapport inter-groupe 30%, et l'évaluation orale individuelle 70%.

PARCOURS COMPILATION / INFOSEC

2SC3000 – Compilation - Infosec

Responsables : **Pierre Wilke**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours vise à donner aux étudiants une meilleure compréhension des mécanismes mis en œuvre dans les compilateurs.

Il s'agit d'un sujet fondamental car les compilateurs sont omniprésents dans le monde numérique. Ils servent évidemment à produire tous les programmes exécutables, que ce soit sur un PC, un téléphone portable, ou même un calculateur embarqué. Même la conception des processeurs est issue d'un compilateur qui traduit une description "haut-niveau" du matériel en un circuit logique qui implémente le processeur. Plus généralement, tout processus de transformation partant d'un artefact décrit dans un langage donné, et devant produire un autre artefact dans un autre langage, souvent de plus bas-niveau, peut bénéficier des résultats obtenus depuis plus de 50 ans dans le domaine des compilateurs.

Nous étudierons les différentes phases d'un compilateur : les analyses lexicales, syntaxiques et sémantiques, la génération de code, les optimisations et les analyses de programme associées, ainsi que les formats d'exécutables courants.

Ces connaissances seront mises en pratique en TP, où les étudiants construiront un compilateur pour un petit sous-ensemble du langage C, vers l'assembleur RISC-V. Le compilateur sera écrit dans le langage fonctionnel OCaml.

Les premiers cours de ce module seront dédiés à l'apprentissage du langage C (le langage que l'on veut compiler) et du langage OCaml (le langage dans lequel on écrira le compilateur).

Prérequis

- Architecture des ordinateurs (2A, SG6)
- Algorithmique et complexité (1A)

Plan détaillé du cours (contenu)

- Le langage C
- Le langage OCaml
- Analyse lexicale
- Analyse syntaxique
- Génération de code et optimisations de programme
- Allocation de registres
- Édition de liens et assemblage, formats de fichiers exécutables

Déroulement, organisation du cours

8 CM de 3h

9 TP de 3h

1 TD de 3h

Organisation de l'évaluation

Examen écrit 1h30.

Chaque sous-compétence (Cij) ci-dessus sera évaluée par une partie de l'examen écrit.

Support de cours, bibliographie

- Modern Compiler Implementation in Java. Andrew W. Appel, Cambridge University Press, 2nd Edition.
- Compilers: Principles, Techniques, and Tools 2nd Edition. Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, Jeffrey D. Ullman
- Crafting Interpreters, Bob Nystrom
- Engineering a compiler, K. Cooper and L. Torczon

Moyens

- Enseignants : Frédéric Tronel et Pierre Wilke
- Matériel nécessaire : un ordinateur équipé d'un système d'exploitation Linux
- Logiciels nécessaires : opam, chaîne de cross-compilation gcc pour RISC-V, qemu-riscv64, docker (Un guide d'installation de ces différents outils sera fourni en introduction du cours)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce cours, l'étudiant devra :

- Savoir mettre en œuvre un analyseur lexical
- Mettre en œuvre un analyseur syntaxique pour une grammaire LL(1) donnée
- Concevoir et implémenter, par calcul de point-fixe, des analyses de programmes pour l'optimisation
- Mettre en œuvre un algorithme d'allocation de registres
- Comprendre l'organisation de la pile lors de l'exécution d'un programme

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- **C1.3 Résoudre** : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation
- C2.1 Approfondir un domaine spécifique

2SC3090 – Projet Compilation - Infosec

Responsables : **Pierre Wilke**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **80**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **40,50**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce projet a pour objectif d'améliorer le compilateur obtenu en fin de TP dans le cours de Compilation (2PC3000)

Le langage source du compilateur s'étoffera pour atteindre un langage très proche du langage C.

Le compilateur ainsi obtenu pourra produire un exécutable pour un petit jeu en mode graphique (Space Invaders).

Prérequis

Compilation

Plan détaillé du cours (contenu)

Les étudiants amélioreront leur compilateur selon les axes suivants :

- Appels de fonction
- Typage
- Pointeurs
- Tableaux
- Structures

Déroulement, organisation du cours

12 TP de 3h

Organisation de l'évaluation

Soutenance orale de projet

Code du projet

Moyens

- Enseignants : Frédéric Tronel et Pierre Wilke
- Matériel nécessaire : un ordinateur équipé d'un système d'exploitation Linux
- Logiciels nécessaires : opam, chaîne de cross-compilation gcc pour RISC-V, qemu-riscv64, docker (Un guide d'installation de ces différents outils sera fourni en introduction du cours)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Savoir compiler les constructions évoluées du langage C (appels de fonction, pointeurs, tableaux, structures)

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- C6.2 : Concevoir un logiciel
- C7.1 : Savoir convaincre Sur le fond : Structurer ses idées et son argumentation, être synthétique (hypothèses, objectifs, résultats attendus, démarche et valeur créée)

COURS en SEMAINE INTERCALAIRE 2A

2IN1510 – Comprendre la blockchain

Responsables : **Marc-Antoine Weisser**

Département de rattachement : **INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est de s'approprier la technologie blockchain, de la comprendre, d'être capable de l'expliquer, de savoir dans quel contexte l'utiliser et pourquoi elle n'est pas adaptée dans tous les contextes.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en SG6

Prérequis

Bonne connaissance des bases de Python 3.

Plan détaillé du cours (contenu)

Le cours se divise en 5 grandes parties.

I. Introduction sur la blockchain et éléments de cryptographie

- Le registre partagé
- Chainage de blocks
- Fonction à sens unique

II. Mise en œuvre de la blockchain

- Preuve de travail
- Nœuds et mineurs
- Composition d'une transaction
- Initialisation d'une chaîne
- Composition d'un block
- Processus de validation

III. Concepts avancés

- Minage
- Risque crypto
- Autres preuves
- Smart Contract
- Consensus
- Fork de la chaîne et résolution

IV. Enjeux

- Pool et gouvernance
- Vulnérabilités
- Éthiques et juridiques

V. TP

- Implémentation d'une blockchain simple en Python
- Proposition d'une application l'intégrant

Déroulement, organisation du cours

- Cours magistraux : 6x3h

- TP : 3x3h

Organisation de l'évaluation

La validation sur la base du TP et d'un rapport.

Moyens

- Cours magistraux
- TP
- Lecture de support et synthèse

Les cours et l'encadrement des TP sont assurés par Marc-Antoine Weisser.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de comprendre le fonctionnement d'un registre partagé utilisant la technologie "blockchain", de connaître ses possibilités, ses enjeux et ses limitations. L'élève aura acquis :

- Quelques notions de cryptographie asymétrique (fonction à sens unique, hachage, clef publique et clef privée, ...)
- Les éléments fondamentaux de la technologie "blockchain" (chainage de blocs, preuve de travail, les nœuds, le minage, la composition d'un bloc, ...)
- Quelques extensions et alternatives (preuve d'enjeu, smart contract, consensus, ...)
- Les enjeux (sécurité, gouvernance, vulnérabilité, ...).

Acquis d'apprentissage :

- Connaître les principes de la cryptographie asymétrique.
- Comprendre le fonctionnement des blockchains
- Implémenter une blockchain
- Distinguer les cas pertinents d'utilisation d'une blockchain
- Concevoir une application mettant en œuvre une blockchain

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.1 : Étudier un problème dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un problème dans ses dimensions scientifiques, économiques et humaines,

C1.4 : Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe

2IN1520 – Analyse de risques - INFOSEC

Responsables : **Valerie Viet Triem Tong**

Département de rattachement : **CAMPUS DE RENNES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cette semaine de cours alterne cours et études de cas pratiques pour présenter l'analyse des risques cyber.

L'analyse des risques en matière de cybersécurité consiste à comprendre, gérer, contrôler et atténuer les risques informatiques au sein d'une organisation numérique. L'analyse des risques est un élément crucial des efforts de protection des données.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Analyse de la menace

Qui sont les attaquants, quelles sont leur motivation et leur organisation, leurs caractéristiques
Cyber Threat Intelligence
Etude de quelques APT

Analyse de risques

- But de l'analyse de risque
- Présentation des différentes approches
- Focus sur Ebios-RM

Sécurité technique

Cadre légal

Sécurité physique

Etude du mode opératoire des attaques exploitant des vulnérabilités dans la mise en œuvre de la sécurité physique

Sécurité du monde industriel

Gestion de crise

Etude pratique de trois cas de cyberattaques et de la coordination de la réponse des acteurs internes et externes dans la gestion de crise associée

- Processus de gestion de crise (Attaque contre TV5 Monde)
- Communication de crise (Attaque contre Norsk Hydro)
- Remédiation (Attaque NotPetya contre Maersk)

Social Engineering

Analyse des moyens de pression reposant sur des techniques de social-engineering

Déroulement, organisation du cours

Semaine ponctuée de quelques cours classiques et de beaucoup d'interactions avec les intervenants à l'aide de

- Mise en situation concrète sur de nombreux petits exemples
- Etude de cas pratiques en petits groupes et restitution au groupe entier
- Discussion avec Philippe Thomazo, CEO du groupe ECOCERT qui viendra témoigner sur son expérience des risques cyber.

Organisation de l'évaluation

Evaluation des connaissances à l'écrit à l'aide d'un quizz et à travers les restitutions orales des études de cas faites dans la semaine.

Moyens

Support de cours, vidéos, témoignages, cas pratiques

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Prendre en compte le risque Cyber

Apprécier l'impact réel d'une cyber-attaque sur le métier de l'entreprise

Comprendre l'organisation de la menace

Envisager les différents aspects de la gestion d'une crise cyber

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

2IN1570 – Développement d'applications web et mobile

Responsables : **Benoît VALIRON**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT INFORMATIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les technologies actuelles du web vont au-delà de la simple création de sites : leurs capacités d'interaction sont telles qu'elles permettent de réaliser toutes sortes d'applications pour toutes sortes de supports, comme des téléphones mobiles par exemple. Connectées au web, ces applications échangent des données en s'appuyant sur un ensemble de formats de structuration et de manipulation de données, notamment la famille XML.

L'objectif de ce cours est de découvrir les technologies sur lesquelles s'appuient les applications web et mobiles, en s'appuyant sur la mise en application des concepts et la réalisation d'une petite application web complète.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG8

Prérequis

Le cours "Systèmes d'Information et Programmation" (SIP)

Plan détaillé du cours (contenu)

Il faut noter que les technologies web évoluent. Les exemples précis que nous donnons seront appelés à être modifiés au fur et à mesure des changements. On peut néanmoins poser que le schéma de cours suivant, basé sur les concepts sous-jacents, restera inchangé.

- Module 1 : Concepts et technologies de base du web
 - Architecture et protocoles du web : Client / serveur, couche HTTP
 - Pages web : structure et contenu (HTML), mise en forme (CSS)
 - Accessibilité : Clients non-conventionnels, gestion des tailles d'écran
- Module 2 : Interaction dynamique avec l'utilisateur dans le navigateur
 - Le langage du web : javascript
 - Le modèle du web : programmation événementielle
 - Spécificité des écrans mobiles et tactiles
- Module 3 : Échange de données structurées :
 - Format JSON : structure, manipulation
 - Format XML : structure et manipulation (DOM)
- Module 4 : Architecture d'une application web
 - Interaction asynchrone entre navigateur et serveur : AJAX
 - Interaction avec le serveur (par exemple Nodejs)
 - Réactivité des applications ; problèmes de connectivité

Nous attirons l'attention sur le fait que ce cours s'appuie sur de la **programmation en javascript**. S'il n'est pas nécessaire d'être un expert en programmation, il est préférable d'avoir une certaine appétence pour ce type de chose.

Déroulement, organisation du cours

L'accent est mis sur la pratique : chaque notion présentée est suivie d'une mise en application directe dans une série de tutoriels permettant de construire une application complète au fur et à mesure.

Organisation de l'évaluation

Une partie de l'évaluation consiste en du contrôle continu, la mise en œuvre étant remise pour évaluation. D'autre part, on demandera un projet aux élèves mettant en œuvre les concepts présentés en cours.

Support de cours, bibliographie

Le cours consiste en une série de tutoriels qui seront disponible en ligne au fur et à mesure.

On peut néanmoins citer la bibliographie suivante :

- W. S. Means, E. Rusty Harold, XML in a Nutshell: A Desktop Quick Reference. O'Reilly, 2001.
- A. T. Holdener III, Ajax: The Definitive Guide. O'Reilly, 2008.
- B. Bibeault, Y. Katz, jQuery in Action. Manning, 2008.
- D. Flanagan, JavaScript: The Definitive Guide. O'Reilly, 2011.

Moyens

Le cours se compose de 5 modules qui présentent de façon incrémentale les notions nécessaires. Chaque module comporte une partie théorique (CM) et une partie pratique de travail personnel et de mise en application de ces concepts (TPs sur machine).

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À la fin de cet apprentissage, les élèves seront capables de :

- Connaître et utiliser les techniques standards de développement web
 - Décrire les différentes parties composant une application web
 - Appliquer chaque technique du web présentée en cours à un cas simple
- Concevoir et développer une application web simple, avec serveur et client
 - Proposer l'orchestration des différentes composantes pour construire un tout cohérent
 - Gérer les différents modes d'accès au service en fonction du type de client
 - Évaluer et choisir les technologies pertinentes pour un projet donné

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C6

La compétence est évaluée en TP par la spécification, la conception, la réalisation la validation d'un logiciel complexe

2IN1600 – Design your way

Responsables : **Fabienne Gayet - Berge**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours aborde les fondamentaux de connaissance de soi (fonctionnement intellectuel et relationnel) et intègre les principes du Design Thinking au service de la construction de ses choix et de son parcours, en s'appuyant notamment sur les travaux du Life Design Lab de Stanford, bien apprécié des étudiants. Il permet de faire un travail sur l'estime de soi, et la préparation des choix importants à venir. Il offre également un cadre d'intégration de différents apprentissages réalisés à l'école (en cours, ateliers API et APP, associations, temps forts sportifs...).

Ce cours aborde la question de la liberté et responsabilité de chacun dans son parcours à l'école, ses choix d'orientation, ou bien la façon d'exercer son futur métier d'ingénieur, à partir de temps d'introspection guidée/réflexion sur des situations concrètes exposées (témoins, vidéos, apports théoriques). Il mène à une prise de conscience et une capacité de questionnement individuel sur l'adéquation entre ses actes et décisions, et ses valeurs propres.

Il implique un engagement et travail individuel conséquent (lectures, et Travaux Inter Séances).

Objectifs de l'électif : prise de conscience de son propre fonctionnement individuel ainsi que celui des autres, pour une meilleure autonomie et résilience face aux choix et différentes étapes de la vie étudiante, puis professionnelle. Eveiller les étudiants sur ce qui influence leur prise de décision, ceci dès leurs choix de cursus et d'emploi. Avoir confiance et inspirer confiance.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 (en semaine bloqué)

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

1 – Mon passé et mon présent :

Module connaissance de soi : Intro qui constate la difficulté de se relier à soi (ref à Edgard Morin, Henri Bergson) dans le monde actuel volatile, complexe, incertain - Questionnaire de préférences Myers Briggs Type Indicator qui permet de repérer nos préférences profondes (au quotidien, avec les autres, dans nos environnements de travail) – Cours sur les intelligences multiples : repérer ses ressources parmi les différentes formes d'intelligences recensées (8) afin de m'en servir au mieux – Temps de réflexion sur mes valeurs et leviers de motivation à mettre au cœur de mon projet de vie - temps d'intégration des différents apprentissages (cours, API, APP, associations, sports, rencontres entreprises, stage op...).

2 – Mon futur :

Utilisation d'outils de Design Thinking pour découvrir et développer sa capacité à générer des nouvelles idées lorsqu'on est bloqués face à un choix, et pour adopter la bonne attitude face à la fin d'un cycle (fin des études, fin d'un job ou d'un stage) afin de préparer le rebond vers le cycle suivant - Exercice de rédaction (life view / work view) - Travail de réflexion sur 3 scénarios futurs possibles (tranche de 5 ans) – Temps d'intégration des différents apprentissages à l'école (cours, API, APP, associations, sports, rencontres entreprise, stage op..).

Déroulement, organisation du cours

Alternance Découverte de nouveaux modèles théoriques et exercices pratiques. Alternance de réflexion individuelle et partage en petits groupes - Exercices d'entraînement à l'oral - rédaction de prises de recul individuelles ou à deux - conception de tableaux de bord visuels pour élaborer différents scénarios - production de vidéos. Lecture d'1 livre.

Organisation de l'évaluation

Présence – Implication – Productions personnelles et d'équipe (rédactions + vidéo) entre chaque séance - lecture de livre et présentations

Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Fabienne Bergé - Catherine Chapuis
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35 élèves maxi

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Mieux faire ses propres choix,
- Se présenter à des recruteurs,
- Être moins dépendant du regard des autres,
- Être agile dans un monde volatile et incertain où il faut savoir se situer,
- Mieux évaluer ses priorités et acquérir de bons réflexes pour gérer les ruptures ou rebonds à opérer au cours de la vie professionnelle,
- Acquérir une meilleure capacité de recul, développer sa capacité à générer des idées.

Compétences travaillées : C3, C7.2, C7.3, C9

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C3 : Agir, entreprendre, innover en environnement scientifique et technologique

C7.2 : Comprendre les besoins et les attentes de ses interlocuteurs. En tenir compte de façon évolutive. Susciter des interactions. Créer un climat de confiance

C7.3 : Convaincre en travaillant sur soi. Être à l'aise. Se montrer convaincu. Manifester de l'empathie. Gérer ses émotions ; Convaincre en travaillant les techniques de communication

C9 : Agir en professionnel responsable. Penser, agir de façon éthique.

2IN1610 – Enjeux contemporains du monde rural à l'heure de la transformation écologique et énergétique

Responsables : **Jean-Marc Camelin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

22 millions de Françaises et de Français vivent dans la ruralité. Ce sont des paysages, un patrimoine, des initiatives, des villages d'avenir, l'un des cœurs battants de l'économie et de la souveraineté alimentaire, un atout essentiel pour permettre la transition écologique de notre pays. Mais le monde rural est également confronté à des défis immenses à relever pour lutter contre une démographie vieillissante, une attractivité délicate, la désertification des territoires, l'enclavement, les difficultés d'accès aux services publics et aux soins de santé. L'objectif de ce cours est de comprendre les enjeux contemporains du monde rural à l'heure de la transformation écologique et énergétique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

1 - Le monde rural : les défis des politiques publiques pour valoriser les atouts et lutter contre les fragilités : Présentation de l'action de l'État dans le département de la Nièvre. Le soutien financier de l'État aux territoires ruraux : DGF, subventions, fonds vert et exemple de la loi de finances pour l'année 2024. Découverte de la ville de Nevers - activité cohésion / course d'orientation.

2 - La ruralité à l'heure de la transformation écologique et énergétique : La sobriété en matière énergétique et de consommation d'eau. Les enjeux et les moyens pour l'accélération des énergies renouvelables (présentation du photovoltaïque, de l'agrivoltaïsme et de l'éolien) ; La stratégie du « zéro artificialisation nette » des sols en pratique. Visite de la Centrale nucléaire de Belleville sur Loire.

3 - La filière « bois et forêts » : La place de la forêt en France et dans la Nièvre : de la dimension géographique aux enjeux de la biodiversité. L'organisation de la lutte contre les feux de forêt. La filière bois : enjeux économiques et formation. Le rôle des agences de l'État : Office Français de la Biodiversité et Office National des Forêts. Visite du groupe Charlois à Murlin, au cœur de la forêt des Bertranges. Visite du Pôle Véhicule du Futur à Magny-Cours : Les enjeux de la filière automobile à l'heure de l'électrique et de l'hydrogène.

4 - Les transports à l'heure de la transition écologique : Le ferroviaire : La supply chain, l'ingénierie embarquée et les conversions d'énergie ; La recherche : présentation du laboratoire DRIVE de l'ISAT sur les rails connectés ; Les transports routiers et le défi écologique. Visite du Technicentre de la SNCF Nevers Languedoc (le plus important des 10 technicentres français avec près de 1 000 professionnels) à Varennes-Vauzelles.

5 - Le big Data et l'analyse prédictive : un atout pour demain : Visite du pôle ingénierie du matériel du Technicentre à l' Inkub de Nevers : ingénierie des pièces de roulement, aménagement intérieur, tram-trains, big data et analyse prédictive. Evaluation du stage.

Déroulement, organisation du cours

Alternance d'apports sur le fond, d'échanges interactifs, de visites de sites et d'entretiens sur le terrain

Organisation de l'évaluation

Evaluation Individuelle : 1 QCM de synthèse : 20 % de la note finale

Evaluation des travaux de groupe : 1 question de réflexion à présenter sous format vidéo portant sur un des thèmes étudiés : 80 % de la note finale

Moyens

Cours réalisé hors campus, à Nevers : CCI de la Nièvre

Les cours théoriques se dérouleront tous les matins, Ils sont dispensés par des membres du corps préfectoral, des directeurs et des ingénieurs de l'administration territoriale de l'État, des industriels et des chefs d'entreprise. Les après-midis sont consacrées à des mises en perspective et des rencontres de terrain (visites de sites, d'entreprises, d'exploitations, échanges avec des acteurs institutionnels).

Les soirées seront organisées sous forme de réceptions offertes par les différents partenaires du projet.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Acquérir les connaissances empiriques portant sur la déclinaison des grandes politiques publiques dans les territoires ruraux
- Comprendre les défis auxquels est soumis le monde rural, afin de valoriser ses atouts et lutter contre ses fragilités

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5 multiculturel : Evoluer et agir dans un environnement international, interculturel et de diversité

C7 convaincre : Savoir convaincre

C9 éthique soutenabilité : Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales

2IN2120 – Accès aux services essentiels dans les pays en développement

Responsables : **Simon Meunier**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Des centaines de millions de personnes à travers le monde n'ont pas d'accès fiable aux services essentiels, tels que les infrastructures de santé, l'assainissement, l'eau potable et l'électricité. Le dérèglement climatique accentue ces inégalités en fragilisant davantage les conditions d'accès. Cette situation a des conséquences majeures sur le développement humain, la qualité de vie et la santé publique. Pour faire face à ces défis, de nombreux programmes et initiatives sont mis en place à différentes échelles – locale, régionale, nationale et internationale. La réussite de ces projets repose sur une approche holistique intégrant les dimensions sociétales, techniques, économiques et environnementales. L'ingénieur joue un rôle important dans ces dynamiques et doit travailler en synergie avec des professionnels issus d'autres disciplines telles que les sciences humaines et sociales et les sciences de l'environnement, afin de proposer des solutions adaptées et durables.

Ce cours vise à :

- Comprendre les conditions actuelles d'accès aux services essentiels dans les pays en développement et les défis associés.
- Comprendre l'impact du dérèglement climatique sur ces services et les vulnérabilités qu'il engendre.
- Explorer l'écosystème des acteurs (gouvernements, responsables locaux et régionaux, ONGs, institutions internationales...) impliqués sur ces sujets et analyser le rôle de chacun.
- Apprendre à concevoir des projets favorisant l'accès aux services essentiels, en collaboration avec des spécialistes d'autres disciplines.

Le programme repose sur une combinaison d'apports théoriques et d'apprentissage par la pratique :

- Cours et interventions d'experts et d'acteurs du secteur.
- Mise en situation à travers un projet appliqué en groupe (majoritairement sous *Python*) : conception d'un réseau de distribution d'eau pour un village isolé d'Afrique, en intégrant les aspects sociétaux, techniques, environnementaux et économiques. Les étudiant·e·s apprendront également à répondre à un appel d'offres pour la mise en place d'un tel système.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours et interventions d'experts et d'acteurs du secteur :

- Définir les services essentiels, comprendre leurs indicateurs de mesure et les méthodes d'évaluation de leur accessibilité.
- Examiner l'état actuel de l'accès aux services essentiels à travers différentes régions du monde et analyser son évolution dans le temps.
- Comprendre l'impact du dérèglement climatique sur l'accès aux services essentiels et les défis qui en découlent.
- Identifier les acteurs clés du secteur et leurs interactions.
- Apprendre les principes fondamentaux de la conception de projets d'accès aux services essentiels : identification des besoins, élaboration de solutions adaptées aux contextes locaux et évaluation de leur impact social et environnemental.

Projet appliqué en groupe : conception d'un réseau de distribution d'eau pour un village isolé en Afrique

- Analyser et cartographier les besoins de la population locale (à l'aide notamment d'outils de visualisation) pour une meilleure compréhension des enjeux sociétaux.
- Concevoir et modéliser une solution technique en utilisant Python, en tenant compte des spécificités locales et des objectifs de durabilité.
- Établir un budget prévisionnel, évaluer la faisabilité économique du projet et apprendre à répondre à un appel d'offre. Analyser l'impact environnemental du projet afin d'assurer sa soutenabilité à long terme.

Déroulement, organisation du cours

Les cours et interventions d'experts, permettent d'appréhender le contexte et les enjeux. En complément, un projet appliqué en groupe offre une mise en situation concrète. Des outils numériques (notamment Python) sont utilisés dans le cadre du projet. Le travail collaboratif favorise l'interdisciplinarité et l'acquisition de compétences en gestion de projet.

Organisation de l'évaluation

Projet en groupe (85%) & présence aux 2 séances de cours (15%)

Moyens

Cours, conférences, projet en groupe

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

À l'issue de ce cours, les étudiants auront acquis une vision globale des enjeux liés à l'accès aux services essentiels dans les pays en développement, en intégrant les dimensions sociétales, techniques, économiques et environnementales. Ils seront en mesure de comprendre l'impact du dérèglement climatique sur ces services et de décrypter les rôles et interactions des acteurs du secteur impliqués. Grâce à une approche alliant théorie et mise en pratique, ils apprendront à concevoir un projet favorisant l'accès à un service essentiel. Enfin, ils développeront des compétences en collaboration interdisciplinaire, en mobilisant les apports des sciences humaines et sociales ainsi que des sciences de l'environnement pour élaborer des solutions adaptées et durables.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 - Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques.

C8 - Mener un projet, une équipe.

C9 - Agir en professionnel responsable. Penser, agir de façon éthique.

2IN2310 – Individus, Travail, Organisations

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

A partir des fondamentaux de la sociologie, de la psychologie, de la philosophie, de la science politique, il s'agit de :

- Mieux connaître l'entreprise et les différents cadres de travail de l'ingénieur sous l'angle de leur organisation et de leur gestion,
- Les contextes sociaux et politiques et économiques de ces différents cadres de travail,
- Comprendre les dimensions techniques, scientifiques, sociales, humaines, économiques et managériales du travail et leurs relations,
- Comprendre les comportements individuels et collectifs dans le travail,
- Comprendre les relations et les mécanismes de pouvoir dans des situations de coopération, de négociation, de conflits,
- Comprendre les phénomènes de déviance et de fraude,
- Comprendre les échecs et les réussites des démarches de changement dans les organisations.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Quelques exemples de cours proposés :

- Négociation et management
- Eléments de psychosociologie appliqués au monde professionnel
- Entreprises, fraudes et déviances : perspectives managériales et sociologiques

Organisation de l'évaluation

- Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)
- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes

En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

2IN2320 – Enjeux de Société

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les cours de ce séminaire ont pour objectif principal d'aider les élèves à orienter leurs actions face aux « grands défis contemporains ».

Pour cela, les fondamentaux de la psychologie, de la sociologie, de la science politique, de l'économie, de l'anthropologie seront mobilisés pour les amener à

- Comprendre et analyser les enjeux liés aux problématiques environnementales, humaines et sociales contemporaines : par exemple : réchauffement climatique, défis énergétiques, justice sociale, participation de la société civile...
- Comprendre les effets des pratiques humaines sur l'environnement naturel, économique, social.
- Comprendre les dimensions éthiques, politiques sociales et économiques des actions de l'ingénieur face à ces problématiques.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Parmi les cours proposés :

- Entreprises, fraudes et déviances : perspectives managériales et sociologiques
- Exclure/Inclure dans les sociétés contemporaines : le regard des sciences sociales
- Les médias : dispositifs sociotechniques de contrôle social ?

Déroulement, organisation du cours

Les cours alternent apports théoriques, études de cas, mise en situation.

Les supports utilisés sont variés : textes (articles scientifiques et de vulgarisation), vidéos, podcasts.

Organisation de l'évaluation

Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)

- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes

Moyens

Les cours sont donnés en classe de trente élèves maximum par un.e enseignant.e spécialiste du sujet proposé.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Capacité d'analyse : savoir identifier les différentes composantes et acteurs de la situation, les examiner de manière à comprendre les relations entre eux, faire apparaître les liens non évidents

Capacité de synthèse : synthétiser les éléments d'une situation, en dégager les points d'appuis et les difficultés.

2IN2330 – Science, Technologie, Société

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les enseignements proposés ont pour objectif principal d'aider les élèves ingénieurs à mieux comprendre les représentations de la science et du progrès technique pour mieux situer leur action et ses effets. Ils s'appuient principalement sur la sociologie des sciences, la sociologie de l'innovation, l'histoire des sciences et des techniques, la science politique, la philosophie et l'éthique.

Comprendre et analyser dans différents contextes et situations :

- L'élaboration des savoirs scientifiques et techniques
- Leur diffusion,
- Leur appropriation,
- Leurs usages
- Leurs effets sur les individus et la société, notamment en termes de controverses sur les risques qu'ils génèrent.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

SG6 et SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Parmi les enseignements proposés :

- Historical, Philosophical and Ethical Perspectives on AI and Data Science
- An introduction to philosophy of science from the perspective of measurement
- Introduction aux controverses scientifiques et techniques

Organisation de l'évaluation

- Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)
- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes

Moyens

Les cours sont donnés en classe de trente élèves maximum par un.e enseignant.e spécialiste du sujet proposé.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- Mieux contextualiser les problèmes auxquels les ingénieurs seront confrontés dans leur travail, en appréhender les différentes dimensions (techniques, managériales, humaines, organisationnelles...) et leur prise directe avec les dynamiques de la société
- Identifier les cadres normatifs, les visions du monde, les enjeux économiques, éthiques et sociétaux des différents acteurs concernés (collaborateurs, citoyens, scientifiques ou institutionnels), et par conséquent leurs positions respectives
- Comprendre des situations d'innovation, d'incertitude, de controverses, de crise, de mutations économiques, technologiques...pour construire les solutions les plus pertinentes.
- Savoir concilier, articuler et intégrer dans ses analyses, ses décisions et ses actions, les savoirs techniques et scientifiques (« durs ») et les savoirs traitant les dimensions humaines, sociales et culturelles.

2IN2340 – Innovation, Arts et créativité

Responsables : **Cynthia Colmellere**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le principal objectif des cours proposés dans ce séminaire est d'aborder l'innovation à travers le travail de création artistique. Pour cela, les différents enseignements amèneront les élèves ingénieurs à :

- Comprendre les relations des différents domaines de la création artistique avec la science et la technique
- Appréhender le travail de production d'oeuvres artistiques dans différents domaines : architecture, peinture, littérature, design...
- Aborder les dimensions individuelles et collectives de ce travail
- Mieux comprendre l'influence des contextes culturels, sociaux, économiques et politiques dans lesquels ils se déroulent.

Les principales disciplines mobilisées sont la sociologie, l'histoire de l'art, l'architecture, la science politique, la philosophie.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et SG8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Parmi les cours proposés :

- Art, territoires, écologie
- Addressing Fiction : storytelling, literacy and fake news
- From cradle-to-grave : Tech won't save us

Déroulement, organisation du cours

Les cours sont donnés en classe de trente élèves maximum par un.e enseignant.e spécialiste du sujet proposé.

Organisation de l'évaluation

- Travail écrit à rendre une semaine à dix jours après le cours (au moins 50% de la note finale)
- Participation orale
- Travaux intermédiaires individuels ou en groupes

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Capacité d'analyse :

- Savoir identifier les différentes composantes et acteurs d'une situation, d'un lieu, d'un milieu de création/innovation,
- Les examiner de manière à comprendre les relations entre eux,
- Faire apparaître les liens non évidents

2IN4000 – Jeux d'entreprise

Responsables : **Éléonore MOUNOUD**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les jeux d'entreprise proposent une approche pratique, ludique et synthétique de la gestion d'entreprise et de la psychosociologie. Ils constituent une expérience de la décision collective, de l'interdépendance et de l'organisation d'équipe, de la gestion des conflits, de la prise de rôle et du positionnement personnel dans un groupe.

Les objectifs principaux sont :

- Découvrir l'entreprise et ses principales fonctions
- Pratiquer les bases de gestion et de comptabilité vues en cours communs
- Expérimenter et prendre conscience des processus qui se développent dans une équipe de travail (décision, organisation, etc.)
- Analyser sa contribution à un groupe de travail
- Savoir convaincre

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine intercalaire avant la ST5

Prérequis

Des connaissances de base en gestion et une expérience du travail en groupe sont utiles

Plan détaillé du cours (contenu)

Les jeux d'entreprise sont des simulations de la vie de plusieurs entreprises en concurrence sur un même marché. Une unité de jeu est constituée de 9 équipes de 6 joueurs chacune.

Chaque joueur prend une responsabilité particulière : production, finances, ressources humaines, marketing, direction générale. Au départ la situation des entreprises est identique. La tâche de chaque équipe est d'analyser cette situation de départ et de prendre des décisions : objectifs de vente, de production, prix, etc. Les décisions de chaque équipe, agrégées et confrontées entre elles, dessinent alors un nouvel état du marché où les situations des entreprises se différencient. L'analyse de cette nouvelle situation donne lieu à de nouvelles décisions et plusieurs cycles se succèdent ainsi.

Déroulement, organisation du cours

Les jeux se déroulent sur 4 journées consécutives, alternant des séquences de simulation et de débriefing.

Organisation de l'évaluation

Trois dimensions sont prises en compte dans l'évaluation des jeux :

- Les apprentissages réalisés en économie gestion et en sciences humaines et sociales
- La participation (leadership, implication dans le rôle)
- La qualité des analyses lors des débriefings tant sur le plan stratégie/gestion que sur celui de la vie de l'équipe au-delà d'une journée d'absence injustifiée, les élèves ne valident pas le jeu d'entreprise

Support de cours, bibliographie

Voir Edunao

Moyens

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Il y a deux types d'enseignants, les animateurs en charge des sessions de jeu et les coaches en charge des sessions de discussion et débriefing

- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : sans objet
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : sans objet
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : sans objet

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Pratiquer la gestion d'entreprise
- Comprendre les conditions de croissance et de difficultés d'une entreprise
- Utiliser des documents comptables de synthèse
- Comprendre l'interdépendance entre stratégie et décisions opérationnelles
- Comprendre les articulations de fonctions dans un groupe
- Comprendre les phénomènes humains se produisant dans un groupe
- Situer sa contribution personnelle dans une équipe

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Développer une posture de professionnel pertinent, réflexif et éthique (C9)

Apprendre à convaincre (C7)

2IN5010 – Bridge Building challenge

Responsables : **Guillaume PUEL**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS, FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le principe de ce module expérimental est de construire, selon un cahier des charges donné, une maquette de pont en carton capable de supporter la charge la plus grande possible. L'objectif principal est de souligner les interactions entre modélisation, expérimentation et simulation numérique.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et en fin de SG8

Prérequis

1EL5000 (Mécanique des milieux continus) ou 1EL4000 (Matériaux) ou ST2 CVT (MECANIQUE ET CONCEPTION DE VEHICULES ET STRUCTURES) ou ST4 CVT (Adaptation des infrastructures au changement climatique)

Plan détaillé du cours (contenu)

Lundi, toute la journée (en parallèle) :

- Caractérisation des propriétés mécaniques du carton
 - Essais de traction sur éprouvettes de carton découpées selon différentes directions, afin de déterminer les modules d'élasticité, coefficient de Poisson (par suivi de marqueurs) et les contraintes à la rupture (chaque groupe propose deux éprouvettes différentes et contribue ainsi à l'élaboration d'une base expérimentale collective)
- Réflexions sur les architectures possibles pour le pont
 - Utilisation d'un logiciel d'optimisation topologique (TopOpt)
 - Étude de premiers modèles simples sur Comsol

Mardi, toute la journée (en parallèle) :

- Essais « structurels »
 - Essais de compression sur poutres « profilées »
 - Essais de traction sur poutres assemblées par collage
 - (Éventuellement) essais d'assemblages quelconques
- Conception des maquettes de ponts
 - Dimensionnement précis des maquettes à l'aide de modèles numériques plus fins sur Comsol et des essais structurels

Mercredi, toute la journée (en parallèle) :

- Construction des maquettes de ponts (découpe laser des pièces dimensionnées à la Fabrique)
- Modèles numériques (voire essais expérimentaux) complémentaires
- Préparation des présentations du lendemain matin

Jeudi (matin) :

- Présentation des différentes maquettes
 - Chaque groupe d'étudiants doit annoncer la charge que pourra supporter leur maquette
 - Les groupes votent également pour la maquette qu'ils pensent voir gagner
- Finalisation des maquettes de ponts

Vendredi :

- Matin : test des maquettes de ponts dans une configuration « concours », analyse des résultats des tests et interprétation des écarts avec les prédictions
- En hors présentiel : rédaction d'une note de synthèse sur les apprentissages de l'activité

Organisation de l'évaluation

travail au sein du projet + soutenance intermédiaire + note de synthèse finale.

Moyens

- Outils logiciels : Comsol (module Structural Mechanics)
- Salles de TP : laboratoire LMPS (bloc Matière du bâtiment Eiffel) pour effectuer les essais

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, les élèves seront capables de :

- Mener des essais de caractérisation mécanique d'un matériau ou d'une structure
 - Déterminer expérimentalement les propriétés mécaniques d'un matériau en vue de son utilisation dans une structure réelle
 - Mener des essais sur des structures réelles afin d'évaluer leurs performances mécaniques
- Dimensionner une structure du point de vue mécanique
 - Proposer des modèles, analytiques ou numériques, et de complexité croissante, de structures réelles
 - Obtenir, à l'aide de ces modèles, des quantités pertinentes pour faire des choix de conception
- Présenter de façon convaincante et argumentée une démarche de conception mécanique
 - Présenter les choix de modélisation et les résultats issus d'un dimensionnement mécanique
 - Expliquer les différences de performances de la structure réelle par rapport au(x) modèle(s) développé(s)

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Les validations des jalons 2 des compétences C1, C2 et C8 sont liées à l'évaluation du travail individuel tout au long de la semaine, et de la soutenance intermédiaire et de la note de synthèse d'un point de vue collectif.

2IN5020 – Innovation des semi-conducteurs

Responsables : **Tanguy Phulpin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Le marché des semi-conducteurs, de 1947 à nos jours, a connu une croissance hors du commun. Ils sont aujourd'hui un **pilier** de nos sociétés, et **indispensable** dans quasiment toutes les **innovations**.

Cet électif, d'ouverture sur le sujet est indispensable, afin de comprendre l'origine de ces dispositifs et son évolution, ainsi que leur fonctionnement, leurs verrous et leur réalisation à travers différentes étapes expérimentales.

Le programme est le suivant, avec en introduction le jeudi après-midi précédent des conférences introductives du directeur de la recherche du CEA et de SOITEC et l'IPVF, ... puis le lundi, 6h de cours permettant d'aborder l'aspect physique du sujet : Introduction à l'étude des semi-conducteurs, principe des bandes d'énergie, étude d'une jonction PN et du contrôle par champ électrique, procédés de fabrication des semi-conducteurs et fabrication des composants électroniques.

Dès le mardi, les étudiants seront invités à se rendre dans le laboratoire partenaire du C2N et ou GeePs à Saclay pour manipuler ces composants : fabrication, caractérisation, simulation à tour de rôle

Le vendredi sera destiné à la rédaction d'un rapport sur les mesures réalisées.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Suite à des conférences introductives par le directeur technique du CEA mais aussi SOITEC et l'IPVF, P. Molinié fera le lundi un cours de 2*3h sur la physique des semi-conducteurs. Vous y verrez le modèle de bandes d'énergie, les matériaux utilisés en électronique, les différents courants, les interfaces dans un composant électrique avec notamment l'étude d'une jonction PN, base de l'électronique. Enfin ce cours vous permettra de comprendre le fonctionnement d'un composant bipolaire et d'un composant MOSFET, base des circuits intégrés certes mais pas que, base de nombreux capteurs et notamment de cellules solaires.

Suite à cette approche, les élèves iront pour 3 jours en laboratoire pour faire un projet de fabrication de composant MOSFET. Les élèves seront séparés en 3 groupes de 6 élèves qui feront une journée fabrication, une journée caractérisation et une journée simulation.

A la suite de ce projet, un temps est réservé pour la rédaction d'un rapport à remettre le vendredi après-midi.

A noter que des possibilités de stage et de césure sont souvent proposés par les industriels à l'issue de cet enseignement

Déroulement, organisation du cours

Attention : 2 jeudi après-midi seront occupés. L'un pour des conférences introductives. Et l'autre durant le projet.

En gros, conf le jeudi après-midi, puis cours le lundi avant de travailler en projet au C2N ou au GeePs jusqu'à jeudi soir. Ensuite le vendredi est libre pour la rédaction d'un rapport

Organisation de l'évaluation

Rapport

Moyens

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : P. Molinié, T. Phulpin
- Taille des groupes : 9 binômes soit 18 élèves

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Notions de physique des semi-conducteurs, bande d'énergie, champ électrique, densité de courant, effet de champ, résistance à l'état passant, jonction PN, cellule photovoltaïque
Par ailleurs, manipulation de semi-conducteur en salle blanche, caractérisation des composants ainsi que simulation des semi-conducteurs

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A l'issue de cours, les élèves auront acquis les bases pour comprendre le fonctionnement de base des semi-conducteurs.

Ils auront découvert différentes voies existantes pour travailler dans le domaine (réalisation et caractérisation) et quels impacts peuvent apporter ces matériaux dans le monde que nous voulons créer (osons inventer l'avenir!). Ils auront aussi appris à utiliser certains outils de laboratoire (salle blanche, microscopie, ...) et ils auront eu la possibilité d'échanger avec des chercheurs qui développent des solutions technologiques permettant d'améliorer la qualité et la structure de ces matériaux présents par milliards dans le monde qui nous entoure

Les compétences évaluées seront C1.2 et C1.3 et C2.3 correspondant à :

- Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes en utilisant correctement un modèle présenté en cours
- Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation en concevant un protocole de mesure pour accéder à une grandeur donnée ; en mettant au point une simulation numérique (par exemple : analyse de données, schéma numérique, discrétisation, etc.)
- Identifier et acquérir de façon autonome les nouvelles connaissances et compétences nécessaires en assimilant les nouvelles connaissances au sein d'outils ou méthodes opérationnels et efficaces pour le problème donné

2IN5025 – Introduction à la fatigue des matériaux

Responsables : **Camille Gandiolle**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS, ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Les pièces de structures et/ou de renforts sont souvent soumises à des sollicitations variables et répétées appelées fatigue. Cela peut entraîner un endommagement prématuré qu'il est important de prendre en compte pour éviter des ruptures catastrophiques. Ce cours a pour but de dériver les bases du dimensionnement de pièce vis-à-vis de la sollicitation mécanique de fatigue à partir d'un apprentissage expérimental. Un objectif secondaire est la formation aux bonnes pratiques de conduite d'essais expérimentaux de fatigue et leur analyse.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG6

Prérequis

Des connaissances de bases en mécanique des milieux continus sont nécessaires (connaître les notions de contrainte et déformation), en ayant par exemple suivi les électifs Matériaux et/ou Mécaniques ou une ST portée par CVT.

Plan détaillé du cours (contenu)

Lundi matin : Introduction de la semaine, présentation des 3 premiers ateliers, formation sur les outils expérimentaux

Lundi après-midi et mardi toute la journée : Travail par groupe sur 3 ateliers, tous les groupes passent par chaque atelier, ½ journée par atelier ;

- Simulation Numérique d'un essai de fatigue
- Essais de fatigue (expérimental – essai mécanique)
- Caractérisation d'une éprouvette rompue (expérimental – microscopie)

Mercredi matin : Mise en commun des résultats pour analyse et discussion, présentation d'approfondissements possibles

- Effet de la contrainte moyenne
- Effet de la nature du matériau
- Effet de la nature du défaut à l'origine de la rupture
- Modélisation de la propagation des fissures
- ...

Mercredi après-midi à vendredi midi : Chaque groupe travail sur son sujet spécifique d'approfondissement.

Vendredi après-midi : Présentation de chaque groupe sur son thème approfondi.

Déroulement, organisation du cours

Apprentissage encadré à partir de travaux pratiques expérimentaux et de simulation.

Organisation de l'évaluation

L'évaluation prend en compte 3 aspects :

- Rapport synthétique par groupe sur les notions communes acquises lors de la première partie de la semaine. (1/3)
- Travail pendant la semaine. (1/3)
- Qualité scientifique et pédagogique de la présentation finale. (1/3)

Moyens

- Outils logiciels : Comsol (module Structural Mechanics), post-traitement python ou matlab
- Outils expérimentaux : laboratoire LMPS (bloc Matière du bâtiment Eiffel)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A la fin de cet enseignement, les élèves auront acquis les bases de la fatigue des matériaux. Ils seront capables de :

- Mener des essais de caractérisation en fatigue d'un matériau
 - Connaître les outils de caractérisation et leurs limites pour en sortir des grandeurs fiables
 - Déterminer expérimentalement les propriétés mécaniques pertinente d'un matériau en vue de son utilisation dans une structure réelle
- Dimensionner une structure en fatigue
 - Proposer des modèles analytiques simples pour le dimensionnement de structure réelles
 - Obtenir, à l'aide de ces modèles, des quantités pertinentes pour faire des choix de conception
 - Faire le lien entre microstructure et propriétés mécaniques de fatigue
- Présenter de façon convaincante et argumentée une démarche de conception en fatigue

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C7 : Savoir Convaincre

C8 : Mener un projet, une équipe

2IN5030 – Travail expérimental de physique

Responsables : **Brahim Dkhil**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT PHYSIQUE**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences fondamentales**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

Il s'agit d'un apprentissage expérimental en physique qui a pour objectifs (i) d'illustrer et mettre en pratique expérimentalement le contenu de l'enseignement de physique de CentraleSupélec, (ii) de faire preuve de créativité et d'initiative, (iii) de travailler en groupe et de façon concertée, (iv) de transmettre le savoir. Pour atteindre ces objectifs, les élèves auront à disposition un ensemble d'équipements et d'appareillages à partir desquels, aidés de leurs enseignants-encadrants, ils devront imaginer et mettre en œuvre leurs propres expériences afin d'illustrer les 5 thèmes physiques suivants : structure de la matière, interaction rayonnement-matière, transition de phase, phénomène de transports, conversion d'énergie.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6 et de SG8

Prérequis

Physique de base

Plan détaillé du cours (contenu)

Chaque groupe sera formé de 10 élèves répartis en 5 binômes (un binôme = un thème physique) et devra avoir un fil rouge (ligne directrice) commun. Les capacités d'accueil et d'encadrement (4 enseignants) permettent d'accueillir 30 élèves au total.

En début de séquence, au cours de deux séances d'une demi-journée, séances qu'on appellera « préparatoires », et avec l'ensemble des encadrants, les élèves devront se répartir et auront le libre arbitre pour définir leur fil rouge et les expériences qu'ils auront à mettre en œuvre et à présenter en avril sur 4 journées.

Au cours des séances préparatoires, les élèves auront accès à une liste des appareillages et matériels (visite salle InnoPhysLab + équipements du laboratoire SPMS) qui leur seront mis pleinement à disposition pour mener à bien leurs expériences. Dans une certaine limite et en fonction des besoins émis, du petit matériel supplémentaire pourra être acheté afin de compléter le matériel déjà mis à disposition.

Chaque groupe aura 4 jours pour monter ses expériences en adéquation avec les thèmes physiques, faire les mesures, critiquer les résultats, et réaliser une vidéo type « youtube » qui sera soumise à un comité externe formé d'enseignants de physique de CentraleSupélec.

Déroulement, organisation du cours

- 2 séances de 3h de préparation du travail expérimental
- 4 journées de 7,5h de mise en œuvre du travail expérimental et présentation

Organisation de l'évaluation

L'évaluation se fera sur la base du comportement et travail réalisé au cours de l'ensemble des séances, et de la vidéo présentée.

Support de cours, bibliographie

Fiches sécurité des différents postes expérimentaux

Moyens

- Equipe enseignante : 4 enseignants pour 30 élèves
- Taille des groupes : 3 groupes de 10 élèves = 30
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : aucun a priori
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Physique, jusqu'à 30 élèves
- Accès à la salle InnoPhys et équipements du labo SPMS

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Consolider les acquis en physique
- Savoir mettre en place un protocole expérimental
- Travail en groupe, échange et organisation du travail
- Prise d'initiative et créativité
- Savoir transmettre

2IN5050 – Radio logicielle : décodage RF, brouillage et contremesure

Responsables : Jacques ANTOINE, Raul De Lacerda

Département de rattachement : DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION

Langues d'enseignement : FRANCAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 40

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 24,00

Catégorie d'électif : Sciences de l'ingénieur

Niveau avancé : Oui

Présentation, objectifs généraux du cours

Le spectre radio est une ressource rare partagée au niveau mondial par de nombreux acteurs pour des applications variées (diffusion de contenus multimédias, internet des objets, 2G/3G/4G/5G, systèmes de radionavigation par satellite, transports). Ce module expérimental a comme ambition de permettre aux élèves de faire une immersion dans le monde de la radio et de découvrir les technologies sous-jacentes par la pratique en participant à un défi qui consiste à échanger des informations par ondes radio, s'initier aux problématiques de mesure/contremesures (principes clés de la guerre électronique/cybersécurité) afin d'assurer la communication.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée SG6 et SG8

Prérequis

- Traitement du signal,
- Modélisation,
- Python. Cet électif pourra être l'occasion de mettre en pratique des notions abordées dans d'autres cours électifs (qu'il n'est pas nécessaire d'avoir suivi)
- Théorie de l'information,
- Principes des télécommunications sans fil,
- From information theory to IoT networks,
- Systèmes électroniques,
- Théorie des communications,
- Réseaux de communications mobiles.

Plan détaillé du cours (contenu)

Une première partie du module expérimental est consacrée à la découverte du spectre radio et des systèmes de radiocommunication. Elle introduit les concepts clés de la radio logicielle (SDR, Software Defined Radio). Les étudiants ont à leur disposition deux cartes de type SDR pour concevoir et réaliser un émetteur et un récepteur, établir un lien de communication numérique et tester ses performances. L'objectif est d'apprendre toutes les étapes nécessaires pour transformer des données numériques en un signal analogique RF, l'émettre puis détecter les signaux pour décoder et estimer les informations utiles, à la fois d'un point de vue théorique mais aussi en prenant en compte l'architecture fonctionnelle et matérielle.

Dans un deuxième temps, un défi est lancé aux étudiants : concevoir un décodeur (par exemple ADS-B : Automatic Dependent Surveillance-Broadcast ; FM : Frequency Modulation ; RDS : Radio Data System), concevoir un brouilleur (guerre électronique), concevoir un système de localisation de brouilleur (contre mesure / cybersécurité), ...

Planning de la semaine :

- Introduction à la technologie SDR
- Apport sur les systèmes de diffusion terrestres et sur l'utilisation du spectre radio
- Apport sur les modulations numériques et réalisation d'une transmission entre deux cartes SDR
- Défis : choix d'un système de diffusion et décodage et/ou brouilleur/localisation

Déroulement, organisation du cours

Travaux pratiques alimentés par quelques apports théoriques.

Organisation de l'évaluation

Un rapport sera remis sur les travaux expérimentaux réalisés. Une présentation sera effectuée à l'issue du défi pour expliquer les choix effectués pour décoder le système de diffusion choisi.

Support de cours, bibliographie

Présentation des normes étudiées.
Compléments de cours.

Moyens

Équipe enseignante : Jacques Antoine, Raul De Lacerda, Cyrille Morin
Outils logiciel (GNU radio) et matériel (carte SDR).

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de ce cours, les élèves seront capables de concevoir et d'implémenter des systèmes de communications numériques sans fil à partir des cartes radio logicielles. Ils seront familiarisés avec les paramètres principaux d'une architecture fonctionnelle RF et avec les différentes transformations analogiques/numériques présentes dans une chaîne d'émission-réception numérique.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1.2 Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
C1.3 Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation
C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique
C2.2 Importer des connaissances d'autres domaines ou disciplines
C6.3 Traiter des données
C8.1 Construire le collectif pour travailler en équipe

2IN5060 – Traitement du signal audio

Responsables : **Jose Picheral**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT SIGNAL, INFORMATION, COMMUNICATION**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

La branche du traitement du signal dédiée aux signaux sonores ouvre la voie à de nombreuses applications : séparation de sources, localisation de sources sonores, imagerie acoustique, étude de la réverbération des salles, annulation d'échos, codage et compression audio, reconnaissance vocale, etc.

Les signaux audios présentent l'avantage d'être facilement manipulables en contexte expérimental. Il est en effet simple de contrôler les sources sonores (via des haut-parleurs, générateurs ou synthèses logicielles) et de capturer les signaux à l'aide de microphones usuels.

Ce cours expérimental propose une approche concrète du traitement des signaux audio, sur des problématiques réelles. Les étudiants réaliseront eux-mêmes les acquisitions de signaux et mettront en œuvre les méthodes classiques pour traiter quatre applications différentes en traitement audio.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée SG6 et SG8

Prérequis

Traitement du Signal, Statistiques et Apprentissage

Plan détaillé du cours (contenu)

Quatre ateliers (un par jour) seront abordés dans le cadre de cet électif.

Acoustique des salles, réverbération

Le son perçu dans une salle est sensiblement différent du son émis en raison des réverbérations sur les objets et les murs de la pièce. Cet effet de réverbération peut être modélisé comme la convolution du signal émis avec la réponse impulsionnelle de la pièce.

L'objectif de cet atelier consiste à réaliser des mesures expérimentales et à mettre en œuvre les traitements nécessaires pour identifier la réponse impulsionnelle de différentes pièces afin de caractériser l'environnement acoustique (par exemple estimation du temps de réverbération) et de synthétiser des signaux réalistes tels qu'on pourrait les entendre dans la pièce.

Séparation de sources

Le mixage d'un enregistrement audio consiste à mélanger différentes pistes audios pour produire une piste mono, deux pistes stéréo, ou plus (5.1, etc.). Inversement, la séparation de sources a pour but de retrouver ces sources, sans connaissance des gains utilisés pour générer les pistes audios, et avec plus de sources que de pistes. Ce type de technique peut être utilisé pour démixer un enregistrement musical ou séparer des locuteurs dans une pièce.

Détection de points bruyants (imagerie acoustique)

L'imagerie acoustique consiste à établir une cartographie de la scène sonore considérée de manière à obtenir une image où chaque pixel correspond à l'intensité sonore émise par les sources acoustiques. Grâce à l'imagerie

acoustique, on peut ainsi détecter précisément la position de points bruyants sur un objet ou dans une scène acoustique quelconque.

Ce type de méthodes nécessite un réseau de microphones de taille importante afin d'avoir une résolution suffisante. Dans le cadre de cet électif, on disposera de réseaux de 16 et 32 micros.

Annulation d'échos

Dans de nombreuses applications audios, la présence d'échos peut fortement dégrader la qualité du signal perçu. C'est notamment le cas dans les systèmes de visioconférence, les téléphones mains libres ou les assistants vocaux, où le signal émis par le haut-parleur est capté à nouveau par le microphone, créant un écho indésirable. Pour améliorer l'intelligibilité et le confort d'écoute, des techniques de traitement du signal permettent d'annuler ces échos en temps réel.

Le traitement proposé repose sur l'utilisation d'un filtre adaptatif pour estimer en temps réel l'écho présent dans le signal enregistré et le soustraire. Les coefficients du filtre sont ajustés dynamiquement grâce à l'algorithme LMS (Least Mean Squares).

Déroulement, organisation du cours

Chaque atelier sera introduit par 1h30 de cours afin de présenter les fondements théoriques et les traitements associés à l'application, ensuite la majorité du temps sera dédiée aux travaux pratiques.

Organisation de l'évaluation

Le travail réalisé sera évalué à partir des comptes rendus de TP réalisés quotidiennement pour chaque application.

Moyens

Les systèmes d'acquisition nécessaires seront mis à disposition des étudiants. Les étudiants seront accompagnés pour développer sous Python les traitements nécessaires pour exploiter les signaux mesurés.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Pour chacun des ateliers, il s'agira de concevoir un protocole expérimental de mesure, de le réaliser et de traiter les signaux. L'objectif est de développer une méthodologie permettant de valider les résultats expérimentaux et d'évaluer les performances des traitements utilisés.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1. Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C2. Développer une compétence approfondie dans un domaine d'ingénieur et dans une famille de métiers

C6. Être opérationnel, responsable et innovant dans le monde numérique

2IN5070 – Semaine d'immersion dans les matériaux biosourcés

Responsables : **Pedro Esteves Duarte Augusto**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **HORS CAMPUS**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **Non**

Présentation, objectifs généraux du cours

La transition écologique est confrontée à différents défis croissants, tels que le développement d'alternatives à moindre impact environnemental pour les matériaux traditionnels. C'est le cas de différents matériaux dérivés du pétrole, des plastiques, des bétons et des mousses, qui peuvent être utilisés sous forme de films, de feuilles ou de blocs pour l'emballage, l'isolation thermique, la protection mécanique, les blocs de construction et les applications biomédicales, parmi de nombreuses autres utilisations. En fait, il est urgent de réduire l'impact de certains matériaux, tels que les plastiques à usage unique, et de faire évoluer l'industrie vers le concept d'utilisation intégrale des ressources naturelles.

Une alternative intéressante pour relever ce défi est la production de matériaux biosourcés à partir de la biomasse, en utilisant du carbone renouvelable pour structurer de nouveaux matériaux. Des propriétés intéressantes peuvent être obtenues en combinant la biomasse de différentes sources, qui peut être transformée avant ou après différentes stratégies de procédés d'assemblage. Cependant, certains inconvénients sont fréquemment observés, par rapport aux matériaux traditionnels, en ce qui concerne les propriétés physiques et la durabilité. Il est donc important pour les ingénieurs de CentraleSupélec de comprendre ce contexte et de développer des alternatives pour un monde en mutation.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée de SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

La semaine d'immersion débutera par une discussion sur la problématique et les principaux aspects de la science des matériaux biosourcés, afin de contextualiser et de préparer les étudiants aux activités pratiques (TP). Différentes conférences seront organisées et proposées par la Chaire de Biotechnologie de CentraleSupélec et ses partenaires (académiques et industriels).

Les jours suivants, les étudiants développeront les TPs, jusqu'à la rédaction d'un rapport final et d'une présentation.

Les étudiants seront répartis en groupes. Chaque groupe choisira trois TPs à suivre et un sujet à approfondir, en faisant une présentation. Exemples de sujets à développer (mis à jour annuellement, en fonction du nombre d'étudiants, des projets en cours, de la saison des biomasses, etc.)

- Production de plastiques biosourcés et de biocomposites par extrusion
- Production de matériaux biosourcés par moulage par compression / thermopression
- Biotransformation de la biomasse en matériaux : composite à base de mycélium

- Propriétés mécaniques, thermiques et hydriques des matériaux biosourcés
- Structure des bioproduits et des matériaux biosourcés: techniques d'évaluation et corrélation avec les propriétés
- Traitement et transformation de la biomasse : valorisation énergétique, récupération de molécules et production de matériaux biosourcés
- Relations structure-processus-propriétés des bioproduits

Déroulement, organisation du cours

La semaine d'immersion débutera par une discussion sur la problématique et les principaux aspects de la science des matériaux biosourcés, afin de contextualiser et de préparer les étudiants aux activités pratiques (TP). Différentes conférences seront organisées et proposées par la Chaire de Biotechnologie de CentraleSupélec et ses partenaires (académiques et industriels).

Les jours suivants, les étudiants développeront les TPs, jusqu'à la rédaction d'un rapport final et d'une présentation.

Les étudiants seront répartis en groupes. Chaque groupe choisira trois TPs à suivre et un sujet à approfondir, en faisant une présentation.

Organisation de l'évaluation

Le travail expérimental (soin apporté, autonomie, dynamisme) sera évalué par les superviseurs, avec des notes individuelles, ce qui représente 25% de la note finale. Une présentation orale de 10 à 15 minutes, suivie de questions, sera préparée par chaque groupe, portant sur un sujet parmi ceux étudiés - la présentation comptera pour 40% de la note finale. Enfin, un rapport de 5 pages, reprenant l'ensemble des données obtenues, représentera 35% de la note finale.

Moyens

Plateformes de la Chaire de Biotechnologie pour mener à bien les activités expérimentales.

Enseignement :

- Pedro Augusto : Professeur

+ autres IE et IR de la Chaire de Biotechnologie

+ conférenciers des partenaires académiques ou industriels de la Chaire de Biotechnologie

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Au cours de cette semaine d'immersion, les étudiants auront l'occasion de traiter, de produire et d'évaluer différents matériaux biosourcés (tels que les bioplastiques, les bétons végétaux, le bois, les aliments, les sous-produits agro-industriels, etc), pour différentes applications (telles que les emballages, la construction, l'automobile, la biomédecine, etc). En combinant conférences, activités pratiques et discussions, les étudiants développeront un jugement sur ce sujet, ce qui les aidera à développer des approches innovantes pour aider à la transition écologique.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1

C2

C6

2IN5080 – Physique des décharges électriques (plasmas froids)

Responsables : Michael Kirkpatrick, Giacomo GALLI, Emmanuel Odic

Département de rattachement : DÉPARTEMENT SYSTÈMES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Langues d'enseignement : FRANCAIS

Campus où le cours est proposé : CAMPUS DE PARIS - SACLAY

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : 40

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : 24,00

Catégorie d'électif : Sciences de l'ingénieur

Niveau avancé : Non

Présentation, objectifs généraux du cours

Le plasma, parfois qualifié de quatrième état de la matière, est un gaz ionisé globalement neutre d'un point de vue électrique. Cette neutralité implique que le nombre de porteurs de charge des deux signes est sensiblement égal sur une échelle spatiale dépendant à la fois de la pression et du degré d'ionisation du gaz. Ce dernier paramètre conditionne également la température du plasma. Dans les plasmas à fort degré d'ionisation, comme dans les étoiles ou les réacteurs de fusion nucléaire, la température peut atteindre plusieurs millions de Kelvins. Dans le cas de l'arc électrique, la température peut atteindre 5000 K et dans le phénomène de foudre, 30 000 K (produisant ainsi le tonnerre).

Mais il existe également des plasmas à faible degré d'ionisation (de l'ordre de 10^{-4}), pour lesquels la température des électrons est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de Kelvins alors que la température du gaz reste proche de l'ambiante, traduisant un caractère hors équilibre thermodynamique fort. Ces plasmas sont alors qualifiés de plasmas hors équilibre thermodynamique, également appelés plasmas non thermiques, ou encore plasmas froids.

Ces plasmas, dont le feu de Saint-Elme est un exemple illustrant l'activité électrostatique de l'atmosphère, ont trouvé de nombreuses applications industrielles. Ainsi, dans le domaine du traitement de surface, le bombardement ionique des surfaces au moyen d'un plasma basse pression est utilisé pour la gravure des substrats de silicium (wafers). On utilise également des plasmas à pression atmosphérique pour le traitement de surface de polymères afin d'augmenter leur énergie de surface et de leur conférer des propriétés hydrophiles. Dans le domaine du traitement de fumées, le précipitateur électrostatique ou électrofiltre (procédé Cottrell- 1907) met en œuvre un plasma froid pour collecter les particules. Enfin, le procédé Siemens est utilisé depuis le début du 20ème siècle pour la production industrielle d'ozone, notamment destinée au traitement d'eau. Enfin, les propriétés émissives des plasmas sont également exploitées, par exemple pour l'éclairage à l'aide de tubes fluorescents ou encore plus récemment avec les écrans de grandes dimensions.

Dans la majorité des cas, le plasma est produit par décharges électriques en imposant aux bornes d'un intervalle gazeux un champ électrique intense au moyen d'une paire (au moins) d'électrodes. Cette situation peut donc se rencontrer dès l'instant que des niveaux de tension élevés sont appliqués à un système. Des plasmas sont donc susceptibles d'être produits de façon involontaire dans le secteur de la production, du transport et de la distribution d'énergie électrique. Les décharges constituent alors une nuisance pouvant conduire à la défaillance de composants. Dans le cadre de l'électrification des transports (terrestre et aéronautique), le risque est amplifié par l'augmentation de la tension du réseau embarqué.

Qu'il s'agisse d'un phénomène mis en œuvre au sein d'un réacteur, ou accidentellement produit sur un système de transport/conversion d'énergie électrique, le plasma lui-même et son comportement peuvent être décrits et caractérisés à l'aide de la physique des gaz et de la mécanique des fluides, et en utilisant des grandeurs macroscopiques habituelles, telles que densité, la température, la pression, la vitesse d'écoulement.

Le plasma froid est un milieu à la fois très intéressant et très complexe, et le but de ce cours électif est de donner aux élèves un premier aperçu de la physique de ce phénomène physique en utilisant la décharge électrique comme objet d'étude pour mettre en œuvre des expériences.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en SG6

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Le premier jour, les élèves suivront un cours général sur les plasmas en classe entière. La classe sera ensuite divisée en deux groupes au sein desquelles des binômes seront constitués ; un groupe explorera la simulation numérique pendant que l'autre conduira des expériences. Les groupes seront par la suite interchangés afin que tous les élèves puissent pratiquer l'activité expérimentale et la simulation.

A la fin de chaque journée, la dernière heure sera utilisée pour avoir un échange constructif (Q&A) entre les élèves, avec le soutien des enseignants.

Déroulement, organisation du cours

Il s'agit d'un cours basé sur l'expérience qui vise à familiariser les élèves avec la physique des décharges, les questions relatives à la mesure, ainsi qu'à l'influence du profil de tension d'alimentation sur le comportement de la décharge.

La pratique expérimentale sera accompagnée de rappels et compléments théoriques, ainsi que de simulation multiphysique.

Organisation de l'évaluation

Soutenance de projet

Support de cours, bibliographie

Les étudiants auront à leur disposition :

- Tous les supports utilisés pendant les cours,
- Un document-guide comportant les informations nécessaires (expérience, simulation et théorie),
- Des articles scientifiques illustrant différents aspects de l'activité et l'état de l'art dans les différents domaines,
- La documentation relative aux instruments utilisés pendant les expériences (alimentation électrique, systèmes de vide, mesures électriques et de pression).

Moyens

Salle de cours (18 pers) reconfigurable, avec vidéoprotection et WiFi, COMSOL Multiphysics, Alimentations haute tension, enceintes à vide et groupe de pompage, systèmes de mesure des décharges électriques.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

L'objectif est de familiariser les élèves avec l'étude des décharges électrique (plasmas froid). Développer leur esprit critique lors de manipulations/simulations. Apprendre à travailler de concert dans un groupe en alternant et en reliant les concepts théoriques avec les résultats expérimentaux et de simulation. Apprendre à la fin de chaque journée à poser des questions et/ou à restituer/expliciter ce qui a été appris de manière claire et concise à ceux qui le demandent. Effectuer une présentation de 15 minutes (en respectant le temps imparti) en groupe, claire, concise et cohérente, dans laquelle les élèves décrivent et interprètent les résultats obtenus, critiquent de façon constructive les analyses réalisées et les méthodes employées.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C1 : Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes à composantes scientifiques, technologiques, humaines et économiques

C8 : Mener un projet, une équipe

C2 : Développer une compétence approfondie dans un domaine scientifique ou sectoriel et une famille de métiers

C7 : Savoir convaincre

2IN5110 – Ethique et Responsabilité

Responsables : **Jean-Marc Camelin**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **40**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **24,00**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'entreprise**

Niveau avancé : **Oui**

Présentation, objectifs généraux du cours

Ce cours aborde la question de l'éthique et de la responsabilité dans le métier d'ingénieur, à partir de situations concrètes exposées tout au long de la semaine de séminaire (témoins, vidéos, apports théoriques) telles que les ingénieurs les vivent, et mène à une prise de conscience et une capacité de questionnement individuel sur l'adéquation entre ses actes et décisions et ses valeurs propres.

Cet électif s'adresse aussi bien aux étudiants se dirigeant vers un métier de management, puis éventuellement de décideur à très haut niveau (exemple : prise de décision en conscience), qu'aux étudiants s'orientant vers les métiers de la recherche, y compris fondamentale (exemple : représentation des utilisations futures de sa recherche). Les objectifs sont les suivants :

- Confronter chaque étudiant aux conséquences d'ordre éthique, social, sociétal, économique et politique de son action future comme ingénieur, dans un contexte multiculturel de plus en plus important
- Aider les étudiants à développer leur conscience des grands enjeux éthiques et sociétaux actuels et dans leur carrière future
- Éveiller les étudiants sur ce qui influence leur prise de décision, ceci dès leurs choix de cursus et d'emploi

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Semaine bloquée en fin de SG6

Prérequis

API-2 et API-9

Plan détaillé du cours (contenu)

- Introduction à l'éthique : la responsabilité, le concept, historique, textes de référence, les "agir" concernés, le sens.
- Illustrations de la problématique : travail (concept, rôle, souffrance au travail, émancipation par le travail), environnement (développement durable, choix à poser, impact), grands enjeux mondiaux
- Compréhension du système : le système actuel (capitalisme, régulation économique, impact sur les actes posés par les décideurs, que mesure-t-on vraiment, PIB), les alternatives (comment penser autrement le monde, microcrédit, économie virtuelle), l'ingénieur du 21ème siècle et la science (rôle de l'ingénieur au sein du système, son influence sur les questions éthiques, la recherche et ses impacts)
- L'éthique comme action : aspect individuel (je prends mes décisions, je pose des actes en conscience), décision politique (donner des orientations à l'ensemble de la société), élargir le débat (échelons global-international-national-local, relation au temps court-moyen-long terme, le processus de prise de décision d'un Directeur Général : stratégie, innovation), vous comme étudiants (comment je comprends mon environnement et comment je me projette à l'avenir dans mon métier d'ingénieur, ma césure, mes rêves professionnels)

Déroulement, organisation du cours

Alternance de séances en plénières et d'ateliers en demi-promo, conférences, témoignages d'Alumnis

Organisation de l'évaluation

Présentation orale d'un projet en groupe réalisé tout au long du séminaire.

Prise en compte de la participation active lors des conférences.

Auto-évaluation et évaluation entre pairs sur les compétences

Support de cours, bibliographie

Support de cours, bibliographie : fournie aux étudiants en introduction du cours

Moyens

Support de cours, bibliographie : fournie aux étudiants en introduction du cours

Equipe enseignante :

- Fabienne Gayet-Bergé - enseignante coordinatrice de pôle projet et de l'électif DYW – psychologue du travail
- Bruno Lefèbvre - Associé Fondateur Alteralliance - spécialiste psycho-dynamique du travail
- Patricia Midy - enseignante APP/API - coach indépendante
- Gilles Lecerf - Enseignant HEC en Philosophie & technologie
- Conférenciers extérieurs

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Savoir prendre le recul nécessaire par rapport au contexte professionnel pour envisager l'aspect éthique de l'action
- Comprendre les contraintes issues du système socio-économique pour être capable de les questionner
- Faire preuve d'esprit critique et de discernement face au système
- Transformer les difficultés et contraintes en opportunités de mener sa carrière en respectant son éthique personnelle

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5 Écouter, se faire comprendre et travailler avec des acteurs de diversités, cultures, codes, formations, disciplines, etc. variés

C7 Convaincre

C9 Penser et agir en ingénieur éthique, responsable et intègre en prenant en compte les dimensions environnementales, sociales et sociétales

COURS de LANGUES et CULTURES

LC0100 – Anglais

Responsables : **Mark Pitt**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

En 1ère et 2ème années, deux cours par an sont proposés, s'étendant chacun sur deux séquences consécutives. En 3A des cours de durée variable sont proposés selon le profil de l'élève.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

Deux modules longs par an, chacun s'étendant sur deux séquences, 1 et 2 et/ou 3 et 4

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Des cours généraux et thématiques sont proposés, en fonction du niveau et de l'emploi du temps de l'élève

Déroulement, organisation du cours

Pédagogie active, utilisation du principe de la classe inversée, travail en classe entière ou en petits groupes. Une heure hebdomadaire minimum de travail maison est à prévoir, en renforcement ou en suivi de chaque cours.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu pour au minimum 80% de la note finale : divers exercices à l'oral et à l'écrit.

Support de cours, bibliographie

Des supports très variés, allant d'articles et exercices créés pour le cours aux œuvres littéraires et aux manuels d'anglais en fonction du cours choisi.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

- Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.
- C5 : Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.
- C7 : Travailler la compétence savoir convaincre
- Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage

Description des compétences acquises à l'issue du cours

- L'élève aura progressé vers (voire au-delà de) le niveau C1 requis pour le diplôme CentraleSupélec.
- L'élève aura travaillé et amélioré la compétence interculturelle (C5)
- L'élève aura travaillé et amélioré la compétence savoir convaincre (C7)

LC0200 – Français Langue Etrangère

Responsables : **Geraldine Offerdinger**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Cette fiche concerne l'ensemble des cours de 1re, 2e et 3e année.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S5 de septembre à janvier S6 de février à juin

Prérequis

Aucun.

Plan détaillé du cours (contenu)

Ces cours hebdomadaires sont organisés selon plusieurs niveaux en fonction des résultats obtenus au test de niveau de français. Les cours consistent en ateliers de travaux pratiques permettant de travailler systématiquement : compréhension et communication orale ; compréhension et communication écrite ; compétence structurale (grammaire, vocabulaire). Les étudiants seront amenés à travailler et à présenter en groupe et en individuel des dossiers thématiques variés concernant la culture française contemporaine dans sa relation au passé historique.

Déroulement, organisation du cours

Chaque élève, après un test de niveau, est placé dans un cours correspondant à son niveau : A1, A2, B1, B2, C1 (cadre européen commun de référence)

Organisation de l'évaluation

L'évaluation est organisée sous deux formes : contrôle continu et contrôle de fin de semestre.

Support de cours, bibliographie

Spécifique à chaque cours et établi en fonction du niveau du groupe par le professeur. Documents écrits (presse, littérature, ...), audiovisuels (films, enregistrements sonores, ...), manuels de cours, ...

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhensions écrite et orale, expressions écrite et orale) qui fourniront les outils pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel ou personnel internationalisé et varié. Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'international. Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Maîtriser le français comme langue d'enseignement supérieur, langue commune de communication internationale sur le campus et dans la communauté de l'école, langue de communication professionnelle. Maîtriser la langue française comme moyen de communication pour accéder aux différents aspects de la culture française contemporaine

LC0300 – Allemand

Responsables : **Daniela Moncys Moncevicus**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ALLEMAND**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **30**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Des cours d'allemand général allant du niveau A0 au niveau C1, avec une spécialisation (cours thématiques) possible à partir du niveau B1+.

Possibilité d'un E-Tandem avec la RWTH d'Aix-La-Chapelle pour des élèves de niveaux avancés.

Possibilité d'un cours d'allemand par le jeu théâtral avec représentation à la fin du semestre.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S5 de septembre à janvier S6 de février à juin

Prérequis

Des cours de niveau débutant (A0) ne sont possibles qu'au premier semestre de la première année.

Si l'on débute l'allemand à CS, le niveau à atteindre à la fin de la première année est le niveau A1, à la fin de la deuxième année le niveau A1+. Le niveau de sortie exigé à la fin de la troisième année est le niveau A2-.

Si l'on a étudié l'allemand précédemment, le niveau minimum requis à l'issue de la première année est le niveau A2+ et à l'issue de la deuxième année le niveau B1-. Le niveau de sortie minimum exigé à la fin de la troisième année est le niveau B1.

Plan détaillé du cours (contenu)

ALLEMAND GENERAL

Niveau débutant : Pratique des compétences orales et écrites. Introduction à la culture et à l'actualité des pays germanophones.

Niveau A1-B1 : Acquisition des compétences de base, avec une insistance particulière sur la langue orale et écrite. Approche interculturelle des pays et cultures germanophones.

COURS THEMATIQUES : A partir du niveau B1+ Pratique de la langue allemande à un niveau intermédiaire et avancé au moyen de séquences thématiques : économie, sciences, histoire, actualité, culture, arts et autres - en fonction aussi de la motivation des apprenants - et d'autre part au moyen de débats hebdomadaires. Tous les cours incluent des exercices de grammaire et de structure à l'écrit et à l'oral. Préparation aux certificats de l'Institut Goethe (B1 à C2) possible.

APPRENDRE L'ALLEMAND PAR LE JEU THEATRAL:

Dans le but de favoriser le plaisir d'utiliser une langue, nous proposons un cours de LV2 allemand à travers le jeu théâtral et la réalisation d'un spectacle. C'est un cours ludique et vivant, accessible à partir d'un niveau B1+, qui met l'accent sur l'interaction et favorise la compréhension et l'expression orale, doublée de l'expression scénique. Il prend en compte tous les aspects de la communication, verbale et non verbale, et fait appel aussi à tous les sens pour progresser encore davantage et développer ses capacités communicatives. Ce cours a lieu dans une atmosphère détendue et un climat de confiance. Aucun prérequis pour le jeu théâtral n'est nécessaire.

Déroulement, organisation du cours

Chaque élève rentrant à CS, après un test de positionnement, est placé dans un cours correspondant à son niveau, selon le cadre européen commun de référence. Ce niveau est mis à jour régulièrement. Pendant toute sa scolarité, il suivra - en progressant en niveau - des cours hebdomadaires d'1h30 entre lesquels il fournira un travail individuel ou de groupe d'1h environ. Les principes de la classe inversée peuvent être appliquées, laissant pendant la séance de cours pleinement place à l'interaction, à l'échange et à la mise en situation.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu et implication en cours au moins 80%, pouvant aller jusqu'à 100% ; possibilité d'un examen de fin de semestre (examen écrit/test auditif/oral) qui compte au maximum pour 20% de la note. En 3A, le niveau de sortie requis est évalué à travers le contrôle continu. Les compétences C5 et C7 sont évaluées par Pass ou Fail.

Support de cours, bibliographie

Des supports variés : manuels, documents audio, vidéo, documents écrits, exercices interactifs qui mettent l'accent sur la pratique de la langue et le travail en équipe.

Moyens

Des cours diversifiés, variés, communicatifs et interactifs adaptés aux intérêts et besoins des apprenants et tournés vers les grands thèmes et tendances de nos sociétés, la culture et l'actualité économique, politique et sociale dans les pays germanophones ainsi que l'interculturalité

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils pour communiquer dans un environnement universitaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié. Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International. Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie, la responsabilité, le travail en équipe et en mode projet ainsi que l'esprit critique dans le processus d'apprentissage. Proposer, tout au long des trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Comprendre et s'exprimer en allemand à l'écrit et à l'oral, aussi bien dans la vie quotidienne que dans un contexte professionnel et académique (stages, échanges académiques, e-tandem ...). Acquérir les compétences interculturelles permettant une meilleure communication avec les interlocuteurs des pays germanophones. Consolider les compétences de l'ingénieur C5 et C7 (compétences interculturelles, argumenter et convaincre)

LC0400 – Espagnol

Responsables : **Angel-Eduardo Toledo**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ESPAGNOL**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S5 de septembre à janvier S6 de février à juin

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

ESPAGNOL GÉNÉRAL

Niveau débutant : pratique des compétences orales et écrites. Sensibilisation à la culture et à l'actualité de l'Espagne et de l'Amérique latine.

Niveau A1-B1 : Renforcement des notions fondamentales, avec une insistance particulière sur la langue orale et écrite. Ouverture sur la civilisation de l'Espagne et de l'Amérique latine.

COURS THÉMATIQUES (à partir du niveau B2)

Bien que l'aspect linguistique reste une composante essentielle de ce cours, les supports utilisés permettent une approximation aux réalités historiques et culturelles des pays hispanophones. -Civilisation et culture espagnoles. - Civilisation et culture latino-américaines. -Cinéma.

COURS SPÉCIALISÉS

Économie sociale : gouvernance, développement et utilité sociale

L'économie sociale cherche à comprendre le comportement individuel et collectif des personnes et des institutions du point de vue des sciences sociales. Elle cherche à interpréter les données empiriques pour comprendre les comportements et les préférences sous-jacents. C'est également à partir de l'analyse des problèmes sociétaux que l'économie sociale cherche à apporter les réponses les plus appropriées pour l'élaboration des politiques publiques (étatiques ou privées).

Tout au long du cours, les étudiants sont amenés à comprendre des outils analytiques et conceptuels tels que : le développement social, le développement humain, la justice, l'équité, la répartition des richesses, l'action collective, les indicateurs de bien-être, la gestion et l'évaluation, entre autres.

Modèle des Nations Unies

Grâce à un mécanisme de simulation, le MUN reproduit le fonctionnement de l'ONU. En classe, les étudiants simulent une conférence internationale et assument le rôle des diplomates représentant leur pays dans les débats sur les principales questions mondiales abordées dans les différentes commissions et institutions spécialisées qui constituent ce que l'on appelle le système des Nations Unies. Cet exercice contribue de manière importante à la formation intégrale des participants en les aidant à développer des compétences telles que l'art oratoire, la capacité d'analyse, la rédaction correcte de textes formels tels que les résolutions, l'art de négocier avec des alliés et des adversaires, la conception de stratégies et la recherche de la coopération et du consensus pour relever de grands défis.

Déroulement, organisation du cours

Chaque élève, après un test, est placé dans un cours correspondant à son niveau : A1-A2, B1-B2, C1 (selon le Cadre européen commun de référence pour les langues).

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% minimum ; examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20% maximum.

Support de cours, bibliographie

Les supports sont variés : manuels, documents audio, vidéo, étude de documents écrits, exercices interactifs mettant l'accent sur la pratique de la langue et le travail en équipe.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les quatre compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié. Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'international. Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage. Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

Comprendre et s'exprimer en espagnol, aussi bien dans la vie quotidienne que dans un contexte professionnel et académique (stages, échanges académiques, etc.). Acquérir les compétences interculturelles permettant une meilleure communication avec les interlocuteurs des pays hispanophones.

LC0500 – Italien

Responsables : **Angel-Eduardo Toledo**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ITALIEN**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axés sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Les niveaux sont actualisés à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec ces informations. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80-100%.
Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 0-20%.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'international.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5 : Être à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement C5.1

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECRL, avec une aisance et justesse accrues.

LC0600 – Portugais

Responsables : **Angel-Eduardo Toledo**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **PORTUGAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence)

S7 et S8

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axés sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Déroulement, organisation du cours

A l'issu d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20%.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'international.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5 : Etre à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement C5.1.

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues.

LC0700 – Chinois

Responsables : **Geraldine Offerdinger**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **CHINOIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Prérequis

Aucun

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20%

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5 : Etre à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement C5.1

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

LC0800 – Japonais

Responsables : **Geraldine Offerdinger**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **JAPONAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Déroulement, organisation du cours

A l'issu d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20% En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5 : Etre à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement C5.1

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

LC0900 – Russe

Responsables : **Daniela Moncys Moncevicus**

Département de rattachement : **LANGUES ET CULTURES, DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **RUSSE**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Des cours de russe général allant du niveau A0 au niveau C1, avec une spécialisation (séquences thématiques) possible à partir du niveau B1.

Prérequis

Des cours de niveau débutant (A0) ne sont possibles qu'au premier semestre de la première année.

Si l'on débute le russe à CS, le niveau à atteindre à la fin de la première année est le niveau A1, à la fin de la deuxième année le niveau A1+. Le niveau de sortie exigé à la fin de la troisième année est le niveau A2-.

Si l'on a étudié le russe précédemment, le niveau minimum requis à l'issue de la première année est le niveau A1+ et à l'issue de la deuxième année le niveau A2. Le niveau de sortie minimum exigé à la fin de la troisième année est le niveau A2+.

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Déroulement, organisation du cours

Chaque élève rentrant à CS, après un test de positionnement, est placé dans un cours correspondant à son niveau, selon le cadre européen commun de référence. Ce niveau est mis à jour régulièrement.

Pendant toute sa scolarité, il suivra - en progressant en niveau - des cours hebdomadaires d'1h30 entre lesquels il fournira un travail individuel ou de groupe d'1h environ.

Les principes de la classe inversée peuvent être appliquées, laissant pendant la séance de cours pleinement place à l'interaction, à l'échange et à la mise en situation.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu et implication en cours au moins 80%, pouvant aller jusqu'à 100% ; possibilité d'un examen de fin de semestre (examen écrit/test auditif/oral) qui compte au maximum pour 20% de la note

En 3A, le niveau de sortie requis est évalué à travers le contrôle continu.

Les compétences C5 et C7 sont évaluées par Pass ou Fail.

Support de cours, bibliographie

Des supports variés : manuels, documents audio, vidéo, documents écrits, exercices interactifs qui mettent l'accent sur la pratique de la langue et le travail en équipe.

Moyens

Des cours diversifiés, variés, communicatifs et interactifs adaptés aux intérêts et besoins des apprenants et tournés vers les grands thèmes et tendances de nos sociétés, la culture et l'actualité économique, politique et sociale ainsi que l'interculturalité

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement universitaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

Acquérir et consolider les compétences de l'ingénieur C5 et C7 (compétences interculturelles, argumenter et convaincre)

LC1000 – Arabe

Responsables : **Geraldine Offerdinger**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **ARABE**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ, CAMPUS DE RENNES**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Déroulement, organisation du cours

A l'issue d'un test, les élèves primo arrivants sont placés dans un groupe correspondant à leur niveau. Le niveau des élèves poursuivant leur apprentissage, est actualisé à la fin de chaque semestre, et les groupes constitués avec cette information. Les cours ont une durée de 1h30 hebdomadaires.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu 80% Examen écrit/test auditif/oral à la fin de chaque semestre 20% En cas d'absence justifiée à l'un des contrôles intermédiaires, la note de ce dernier est remplacée par celle du contrôle final.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

C5 : Etre à l'aise dans un environnement multiculturel et international, et plus particulièrement C5.1

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

LC1200 – Hébreu

Responsables : **Daniela Moncys Moncevicus**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES, LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement : **HEBREU**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE RENNES, CAMPUS DE PARIS - SACLAY, CAMPUS DE METZ**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Des cours d'hébreu général allant du niveau A0 au niveau C1, avec une spécialisation (séquences thématiques) possible à partir du niveau B1.

Prérequis

Des cours de niveau débutant (A0) ne sont possibles qu'au premier semestre de la première année.

Si l'on débute l'hébreu à CS, le niveau à atteindre à la fin de la première année est le niveau A1, à la fin de la deuxième année le niveau A1+. Le niveau de sortie exigé à la fin de la troisième année est le niveau A2-.

Si l'on a étudié l'hébreu précédemment, le niveau minimum requis à l'issue de la première année est le niveau A1+ et à l'issue de la deuxième année le niveau A2. Le niveau de sortie minimum exigé à la fin de la troisième année est le niveau A2+.

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général par niveaux (de débutant à avancé) axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale en continu et en interaction) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement scolaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Déroulement, organisation du cours

Chaque élève rentrant à CS, après un test de positionnement, est placé dans un cours correspondant à son niveau, selon le cadre européen commun de référence. Ce niveau est mis à jour régulièrement.

Pendant toute sa scolarité, il suivra - en progressant en niveau - des cours hebdomadaires d'1h30 entre lesquels il fournira un travail individuel ou de groupe d'1h environ.

Les principes de la classe inversée peuvent être appliquées, laissant pendant la séance de cours pleinement place à l'interaction, à l'échange et à la mise en situation.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu et implication en cours au moins 80%, pouvant aller jusqu'à 100% ; possibilité d'un examen de fin de semestre (examen écrit/test auditif/oral) qui compte au maximum pour 20% de la note

En 3A, le niveau de sortie requis est évalué à travers le contrôle continu.

Les compétences C5 et C7 sont évaluées par Pass ou Fail.

Support de cours, bibliographie

Des supports variés : manuels, documents audio, vidéo, documents écrits, exercices interactifs qui mettent l'accent sur la pratique de la langue et le travail en équipe.

Moyens

Des cours diversifiés, variés, communicatifs et interactifs adaptés aux intérêts et besoins des apprenants et tournés vers les grands thèmes et tendances de nos sociétés, la culture et l'actualité économique, politique et sociale ainsi que l'interculturalité

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Consolider et développer les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement universitaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR, avec une aisance et justesse accrues

Acquérir et consolider les compétences de l'ingénieur C5 et C7 (compétences interculturelles, argumenter et convaincre)

LC1500 – Suédois

Responsables : **Daniela Moncys Moncevicus**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT LANGUES ET CULTURES**

Langues d'enseignement :

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **28**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **21,00**

Présentation, objectifs généraux du cours

Des cours de suédois général niveau débutant pour

-les primo-arrivants

- les élèves du S7 souhaitant changer de LV2 en vue d'un S8 en Suède (engagement d'atteindre le niveau A2- à la fin de leur scolarité)

Plan détaillé du cours (contenu)

Cours de langue général de niveaux débutant axé sur le développement des compétences linguistiques (compréhension écrite et orale ; expression écrite et orale) afin d'acquérir les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement universitaire, personnel ou professionnel. Les cours visent également à consolider la compréhension culturelle et interculturelle.

Organisation de l'évaluation

Contrôle continu et implication en cours au moins 80%, pouvant aller jusqu'à 100% ; possibilité d'un examen de fin de semestre (examen écrit/test auditif/oral) qui compte au maximum pour 20% de la note

En 3A, le niveau de sortie requis est évalué à travers le contrôle continu.

Les compétences C5 et C7 sont évaluées par Pass ou Fail.

Support de cours, bibliographie

Des supports variés : manuels, documents audio, vidéo, documents écrits, exercices interactifs qui mettent l'accent sur la pratique de la langue et le travail en équipe.

Moyens

Des cours diversifiés, variés, communicatifs et interactifs adaptés aux intérêts et besoins des apprenants

Acquis d'apprentissage visés dans le cours

Acquérir les compétences linguistiques (compréhension écrite et orale, expression écrite et orale) qui fourniront les outils nécessaires pour communiquer dans un environnement universitaire, professionnel et/ou personnel internationalisé et varié.

Consolider et développer les outils d'une compréhension interculturelle qui permettront aux élèves d'amorcer l'ouverture culturelle et d'aborder l'International.

Permettre à chacun de développer les moyens de continuer son apprentissage en favorisant l'autonomie et la responsabilité dans le processus d'apprentissage.

Proposer, tout au long de trois années d'études, des approches variées et innovantes permettant à chacun de se retrouver dans un enseignement qui convient.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de communiquer selon les compétences du CECR.

Acquérir et consolider les compétences de l'ingénieur C5 et C7 (compétences interculturelles, argumenter et convaincre)