

Nouveau parcours Recherche Opérationnelle (M2 RO)

Marcel Mongeau

ENAC, MAIAA, F-31055 Toulouse, France

<http://m2ro.recherche.enac.fr>

31 août 2017



Le M2 RO était une récente (rentrée 2012) spécialité du master recherche « Informatique et Télécommunications » (M2R-IT) portée par l'Université Paul Sabatier (UPS) et co-habillée avec les écoles d'ingénieurs ENAC, INPT, INSA-Toulouse et ISAE-Supaero. Elle était gérée par l'ENAC.

Depuis la campagne d'accréditation de la rentrée 2016, la mention *Mathématiques et applications* est co-accréditée par l'UPS, l'université Toulouse I - Capitole, les écoles ENAC et ISAE-Supaéro, tandis que la mention *Informatique* est co-accréditée par l'UPS, et les écoles INPT et ENAC. Le parcours-type RO porté par l'UPS est commun aux deux mentions. La première année (M1) de ce parcours consiste en le M1 SID (commun aux deux mentions) ou le M1 MAPI3 de la mention *Mathématiques et applications*.

Table des matières

1	Description	3
2	Objectifs de la formation	3
3	Débouchés et métiers	4
4	Compétences	4
5	Connaissances	5
6	Équipe pédagogique	5
7	Conseil de perfectionnement	6
8	Partenariat avec Montréal	7
9	Cursus	7
9.1	M1	7
9.2	M2	7
9.2.1	1er semestre (30 ECTS)	7
9.2.2	2nd semestre (30 ECTS)	8
9.2.3	Mutualisation inter-établissement	8
A	Les UE proposées au 1er semestre du M2	8
A.1	Fondamentaux de la RO (FRO - 6 ECTS - P)	9
A.2	Graphes et réseaux : modélisation et algorithmes (GRA - 3 ECTS)	9
A.3	Continuous numerical optimization (ONL - 3 ECTS)	9
A.4	Sujets spéciaux en optimisation (SSO - 3 ECTS - 2 R)	10
A.5	Bases de l'optimisation combinatoire (BOC - 3 ECTS - R)	10
A.6	Optimisation combinatoire avancée (OCA - 3 ECTS - 2 R)	10
A.7	Méthodes stochastiques pour l'optimisation globale (SOG - 3 ECTS - R)	11
A.8	Modélisation des systèmes de production (PRD - 3 ECTS - P)	11
A.9	Optimisation sous incertitude (INC - 3 ECTS 2 P)	12
A.10	Optimisation globale déterministe (OGD - 3 ECTS - 2 R)	12
A.11	Complexité (CMP - 3 ECTS)	12
A.12	Applications de l'optimisation au transport aérien (OTA - 3 ECTS - R)	13
A.13	Programmation par contraintes (PPC - 3 ECTS - P)	13
A.14	Thèmes contemporains en optimisation (TCO - 3 ECTS - 2 R)	14
A.15	Inverse problems (INV - 3 ECTS - P)	14
A.16	Algorithmes en Apprentissage Artificiel (APP - 3 ECTS 2)	15
A.17	Gestion intégrée de la production et de l'énergie (GPE - 3 ECTS - P)	15
A.18	Conception de réseaux de valorisation (CRV - 3 ECTS P)	15

B Les UE proposées au 2nd semestre du M2	17
B.1 RO appliquée (ROA - 3 ECTS)	17
B.2 Projet tuteuré (PRJ - 3 ECTS)	17
B.3 Stage (STA - 24 ECTS)	17
C Inscription en double diplôme en école d'ingénieurs	18
C.1 ENAC	18
C.2 INPT-ENSIACET	18
C.3 INPT-ENSEEIH	18
C.4 INSA de Toulouse	18
C.5 ISAE-Supaero	19

1 Description

La RO est une discipline scientifique à l'interface des Mathématiques appliquées, de l'Informatique et de l'Ingénierie. En RO, on cherche d'abord à modéliser les systèmes complexes de plus en plus présents dans l'industrie et dans les grandes organisations de façon à, ensuite, concevoir des outils d'aide à la décision pour l'amélioration de ces systèmes. Les problèmes réels ainsi modélisés mettent en jeu le plus souvent des sous-problèmes d'optimisation.

Pour répondre à une demande régionale importante des industriels (en particulier du secteur aéronautique) et de la recherche académique, le parcours RO toulousain a été créé en 2012 sous la spécialité M2R-IT de la mention Informatique. Ce parcours a connu une forte croissance en nombres d'étudiants : 4, 14, 20 puis près de 30 étudiants aux rentrées 2015 et 2016 en provenance pour les deux-tiers des écoles co-habilitées ; pour ce qui concerne l'autre tiers, les inscrits à l'UPS, la majorité des étudiants viennent d'Afrique francophone ; sinon d'autres établissements français ou européens.

Ce parcours permettra à l'étudiant d'acquérir de solides compétences en modélisation mathématique, optimisation, algorithmique et mise en oeuvre informatique, ce dont le chercheur et l'ingénieur spécialistes de RO ont besoin.

2 Objectifs de la formation

L'objectif principal de ce parcours est de former des spécialistes (ingénieurs et/ou futurs doctorants) capables de développer une démarche scientifique complète de RO sur un problème réel concret, depuis la compréhension du problème jusqu'à la proposition aux décideurs d'un éventail de solutions en passant par la modélisation mathématique du problème, l'élaboration d'algorithmes d'optimisation, leur mise en oeuvre informatique, la conduite d'expériences numériques et l'analyse de résultats.

3 Débouchés et métiers

À l'issue de cette formation, les étudiants trouveront des débouchés comme ingénieur R&D dans de nombreux domaines d'applications : transports, énergie, production, logistique, télécommunications, médias, industrie manufacturière, construction, sociétés de conseils, éditeurs de logiciels, sciences du vivant, finance, etc.

Ils pourront s'ils le souhaitent approfondir leurs connaissances en sollicitant une thèse de doctorat, diplôme de plus en plus valorisé à l'étranger et dans les grandes multinationales françaises. Il existe de plus en RO de nombreuses possibilités de financement pour faire une thèse en France en milieu industriel (dite thèse CIFRE) pendant laquelle l'étudiant est embauché comme ingénieur par l'entreprise.

Les débouchés sont larges comme le démontrent les très nombreuses offres de stage que nous recevons. En 2013-2014, pour les 14 étudiants, 45 stages ont été proposés, dont un quart avec possibilités de poursuites en thèse financée. En 2014-2015, plus de 80 propositions de stages recherche ont été reçues pour nos 20 étudiants, dont la moitié avec poursuites possibles en thèse financée. En 2015-2016, nous avons 120 offres de stage recherche en RO pour nos 30 étudiants !

Concernant le devenir (connu) de nos diplômés :

- Promo 2012-2013 (4 diplômés) :
 - 1 thèse en milieu académique (INRIA-Sophia)
 - 3 ingénieurs R&D (Air France, Amadeus, CS Communication & Systèmes)
- Promo 2013-2014 (14 diplômés) :
 - 3 thèses en milieu académique (GERAD (Montréal), IRT SystemX / INRIA-Saclay, LAAS-CNRS)
 - 9 ingénieurs R&D (Air France, Amadeus, SNCF)
- Promo 2014-2015 : 20 étudiants dont 7 sont actuellement inscrits au doctorat en France ou à l'étranger (Royaume-Uni et Canada) et au moins trois ont déjà été embauchés (Airbus Defense & Space, Eurodecision, Quintiq).

De nombreux ingénieurs/chercheurs de l'industrie et des services (Airbus, Air France, Altran, Amadeus, Bouygues, Cap Gemini, EDF, Eurodecision, Google, IBM, Orange Labs, Renault, SNCF, Total) soutiennent le M2 RO toulousain – lire leurs témoignages sous l'onglet « Perspectives et carrières » du site web du M2 RO : <http://m2ro.recherche.enac.fr/>.

4 Compétences

À l'issue de cette formation, l'étudiant sera capable de :

- Formuler, analyser et modéliser des problèmes réels
- Reconnaître à quelle grande catégorie de problèmes d'optimisation ils appartiennent
- Estimer la complexité d'un problème d'optimisation
- Argumenter des choix de modélisation ou d'approches d'optimisation
- Proposer des méthodes d'optimisation ou d'aide à la décision adaptées au contexte
- Implémenter des algorithmes de résolution
- Mener des campagnes de tests numériques

- Analyser les retours d'expérience en vue d'ajuster le modèle et/ou la méthode de résolution

5 Connaissances

Au cours de cette formation, les étudiants acquerront des connaissances dans les domaines suivants :

- modélisation mathématique
- complexité
- théorie des graphes
- optimisation numérique
- optimisation combinatoire
- optimisation globale
- méta-heuristiques
- optimisation mixte avec variables entières
- optimisation sous incertitude
- programmation par contraintes
- applications de l'industrie et des services et au transport aérien en particulier

6 Équipe pédagogique

On compte de nombreux spécialistes de RO sur la place toulousaine. Le M2 RO est adossé au groupe informel de recherche toulousain TORO <http://www.toro-toulouse.fr/>. L'équipe pédagogique du M2 RO est constituée d'enseignants/chercheurs provenant de sept établissements différents (UPS, UT1-Capitole, ENAC, INPT-ENSEEIHT, INPT-ENSIACET, INSA de Toulouse, ISAE-Supaero et TBS) et de 6 laboratoires de recherche : IMT, IRIT, ITAV, LAAS-CNRS, MAIAA, INRA et TSE :

- Cyril Allignol (ENAC)
- Christian Artigues (CNRS)
- Nicolas Barnier (ENAC)
- Fabian Bastin (Université de Montréal)
- Olga Battaïa (ISAE-Supaero)
- Lotte Berghman (TBS)
- Alain Berro (UT1)
- Christian Bès (UPS)
- Loïc Boussouf (Airbus Defence & Space)
- Cyril Briand (UPS)
- Sonia Cafieri (ENAC)
- Nicolas Couellan (UPS)
- Simon de Givry (INRA)
- Frédéric de Gournay (INSA)
- Daniel Delahaye (ENAC)
- Thierry Drut (Airbus)

- Nicolas Durand (ENAC)
- Pascal Floquet (INPT-ENSIACET)
- Frédéric Gardi (Innovation 24)
- David Gianazza (ENAC)
- Serge Gratton (INPT-ENSEEIH)
- Alain Hait (ISAE-Supaero)
- Emmanuel Hébrard (CNRS)
- Gilles Hétreux (INPT-ENSIACET)
- Jean-Baptiste Hiriart-Urruty (UPS)
- Laurent Houssin (UPS)
- Marie-José Huguet (INSA)
- Sophie Jan (UPS)
- Nicolas Jozefowicz (INSA)
- Jean Bernard Lasserre (CNRS)
- Pierre Lopez (CNRS)
- Estelle Malavolti (TSE - ENAC)
- Catherine Mancel (ENAC)
- Pierre Maréchal (UPS)
- Frédéric Messine (INPT-ENSEEIH)
- Julien Moncel (IUT-Rodez)
- Marcel Mongeau (ENAC)
- Sandrine Mouysset (UPS)
- Stéphane Negny (INPT-ENSIACET)
- Sandra Ulrich Ngueveu (INPT-ENSEEIH)
- Céline Parzani (ENAC)
- Stéphane Puechmorel (ENAC)
- Emmanuel Rachelson (ISAE-Supaero)
- Aude Rondepierre (INSA)
- Mohamed Sbihi (ENAC)
- Sergei Soloviev (UPS)
- Martin Strecker (UPS)
- Pierre Weiss (CNRS)

7 Conseil de perfectionnement

Les personnes suivantes forment un bureau où s'initient les propositions d'amélioration du M2 RO :

- Christian Artigues (CNRS)
- Loïc Boussof (Airbus Defense & Space)
- Thierry Druot (Airbus)
- Alain Hait (ISAE-Supaero)
- Laurent Houssin (UPS)
- Jean-Baptiste Hiriart-Urruty (UPS)
- Marie-José Huguet (INSA-GEI)

- Marcel Mongeau (ENAC)
- Stéphane Negny (INPT-ENSIACET)
- Sandra Ngueveu (INPT-ENSEEIHT)
- Aude Rondepierre (INSA-GMM)
- Mohammed Sbihi (ENAC)

8 Partenariat avec Montréal

Le M2 RO bénéficie d'un partenariat privilégié avec Montréal : laboratoires de recherche CIRRELT (Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'entreprise, la Logistique et le Transport) et GÉRAD (Groupe d'Études et de Recherche en Aide à la Décision). En plus d'être un des principaux centres mondiaux de recherche et de formation dans le domaine de la RO, Montréal est la 3e capitale de l'aéronautique (siège de Bombardier, de l'OACI et de l'AITA), en phase avec la couleur aéronautique du M2 RO toulousain. Chaque année des étudiants font leur stage recherche à Montréal et certains poursuivent en thèse là-bas.

9 Cursus

Cette section est pertinente pour les étudiants s'inscrivant à l'Université Paul Sabatier. Les élèves-ingénieurs des écoles d'ingénieurs toulousaines co-accréditant le M2 RO s'inscrivant en double diplôme doivent se reporter à l'annexe C.

9.1 M1

La partie M1 du parcours RO est entièrement confondue avec le M1 du parcours CMI suivant :

- parcours SID, lorsque l'étudiant s'inscrit dans la mention Informatique ;
- parcours MAPI3, lorsque l'étudiant s'inscrit dans la mention Mathématiques et applications

9.2 M2

Les acronymes à trois lettres décrivant chaque UE utilisés ici sont définis en annexes A et B.

9.2.1 1er semestre (30 ECTS)

Le détail se trouve en annexe A.

- 4 UE obligatoires de tronc commun : GRA, INC, SOG et TCO
- une option (sous-parcours) parmi les 3 possibilités suivantes :
 1. OGD, OCA, PPC, OTA, PRD
 2. FRO, GPE, CRV, INV

3. ONL, BOC, PPC, CMP, APP

L'option est déterminé par l'équipe pédagogique du M2 RO au vu du dossier de chaque étudiant avant la réunion de rentrée.

À titre indicatif, un étudiant n'ayant jamais eu de cours de programmation linéaire dans sa formation sera orienté vers l'option 2. Un étudiant n'ayant jamais eu de cours d'optimisation continue dans sa formation sera orienté vers l'option 3.

Ainsi, durant le premier semestre, les étudiants suivront des UE scientifiques totalisant 27 ECTS. S'ajoutera une UE supplémentaire d'anglais (3 ECTS) obligatoire, assurée par l'UPS ou l'école pour les élèves-ingénieurs en double diplôme.

9.2.2 2nd semestre (30 ECTS)

Le détail se trouve en annexe B.

Le 2nd semestre consiste en :

- une **UE « RO appliquée » (ROA – 3 ECTS)**
- Un **projet tuteuré (PRJ – 3 ECTS)**
- Un **stage (STA – 24 ECTS)**.

9.2.3 Mutualisation inter-établissement

Parmi les 19 cours du M2 RO, 11 UE sont mutualisées avec des cursus existants :

- 5 à l'ENAC
- 2 à l'INPT-ENSIACET
- 2 à l'INPT-ENSEEIH
- 1 à l'INSA (GMM)
- 2 à l'ISAE-Supaero
- 1 à l'UPS (MAPI3),

le Département de mathématiques UPS créant généralement un groupe de TP supplémentaire ; et 5 UE sont été créées (financées) spécifiquement pour le M2 RO :

- 3 à l'ENAC
- 1 à l'ISAE-Supaero
- 1 à l'UPS (Département d'informatique).

A Les UE proposées au 1er semestre du M2

Cette annexe présente le contenu des UE scientifiques proposées au 1er semestre du M2. À la suite de chaque intitulé, le nombre d'ECTS correspondant est indiqué (en fait, chaque UE représente 3 ECTS sauf pour l'UE FRO valant 6 ECTS), suivi, s'il y a lieu d'un des codes suivants :

- **R** : UE orientée Recherche
- **P** : UE orientée Pré-professionnalisation
- **2** : UE préférentiellement placée en 2de moitié du 1er semestre (suite aux acquis des autres UE).

Dans la liste qui suit, le nom de l'enseignant apparaissant entre parenthèses est le responsable (point de contact) pour cet enseignement au moment de la demande de co-accréditation.

A.1 Fondamentaux de la RO (FRO - 6 ECTS - P)

30h C + 30h TP

Responsable : Dominikus Noll dominikus.noll@math.univ-toulouse.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Sandrine Mouysset, Marcel Mongeau

Syllabus :

- Généralités, modélisation
- Programmation linéaire :
 - méthode du simplexe
 - dualité
 - analyse de sensibilité
 - écarts complémentaires
 - modélisation : régression moindres valeurs absolues, rendements d'échelle décroissants
- Introduction à la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) :
 - introduction
 - exemple du problème du voyageur de commerce
 - relaxation continue
 - problèmes de graphes
 - modélisation
 - survol des méthodes

[Mutualisé avec le cours « Optimisation et recherche opérationnelle » du M2 MAPI3 (Mathématiques Appliquées pour l'Ingénierie, l'Industrie et l'Innovation) du Département de mathématiques de l'UPS]

A.2 Graphes et réseaux : modélisation et algorithmes (GRA - 3 ECTS)

20h C

Responsable : Martin Strecker martin.strecker@irit.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Sergeï Soloviev, Julien Moncel

Syllabus :

Définitions élémentaires de la théorie des graphes. Arbres (récursions et décompositions, arbre couvrant de poids minimal). Problèmes de coloration (algorithmes précis et approximatifs ; algorithmes pour des classes spécifiques, par exemple graphes planaires), problèmes de cheminements (plus courts chemins, Dijkstra, Bellman), problèmes de flots (Ford et Fulkerson, flots de coût minimal), problème du voyageur de commerce.

[Créé (financé) par le département d'informatique de l'UPS]

A.3 Continuous numerical optimization (ONL - 3 ECTS)

Optimisation numérique locale

18,75h C + 12,5h TD + 5h TP

Responsable : Frédéric de Gournay degourna@insa-toulouse.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Pierre Weiss, Aude Rondepierre

Syllabus :

Ce cours a pour objectif de présenter les bases de l'optimisation de fonctions $f : R^n \rightarrow R$ afin de connaître les grands algorithmes de résolution de problème continus lisses et non lisses

Première partie (en anglais) : Conditions d'optimalité avec et sans contrainte, descente de gradient projeté, Newton, SQP, dualité lagrangienne.

Deuxième partie : Analyse convexe (sous-différentiel, opérateurs proximaux, dualité). Théorie de la complexité en optimisation convexe. Descentes de sous gradient, de gradient proximales accélérées, méthodes duales, points intérieurs, descentes par coordonnées randomisées.

Les mots-clés sont : Convexité, conditions d'optimalité, algorithmes, moindres carrés, contraintes, dualité, optimisation non lisse

Pré-requis : Analyse matricielle, analyse numérique de base

[Mutualisé avec la partie Optimisation du cours « Analyse numérique et Optimisation » de la 4e année INSA-GMM]

A.4 Sujets spéciaux en optimisation (SSO - 3 ECTS - 2 R)

20h C

Responsable : Marcel Mongeau marcel.mongeau@enac.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Fabian Bastin

Syllabus :

Ce cours est donné par un professeur invité en séjour dans un des laboratoires de recherche associés au M2 RO sur une thématique recherche propre au domaine d'expertise du visiteur.

En 2014-2015 par exemple le sujet était l'Optimisation stochastique et ce cours a été donné par le Professeur Fabian Bastin de l'Université de Montréal - CIRRELT lors de son séjour sabbatique à l'ENAC).

[Financé par l'établissement ou la laboratoire d'accueil du chercheur invité]

A.5 Bases de l'optimisation combinatoire (BOC - 3 ECTS - R)

15h45 C + 7h TP

Responsable : Sandra Ngueveu sandra.ngueveu@enseeiht.fr

Syllabus :

Optimisation combinatoire : quelques problèmes types, rappels de complexité. Programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) : définition, modélisation. Optimalité, relaxations et bornes. Algorithme de séparations et évaluations (branch & bound). Algorithme de plans sécants : coupes valides, coupes de Chvatal-Gomory, algorithme de Gomory. Algorithme de séparations et coupes (branch & cut). Programmation par contraintes.

[Mutualisé avec un cours de 3e année INPT-ENSEEIHT]

A.6 Optimisation combinatoire avancée (OCA - 3 ECTS - 2 R)

20h C

Responsable : Alain Hait alain.hait@isae.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Lotte Berghman, Nicolas Jozefowicz
Sujets avancés en optimisation discrète Méthodes de décomposition : Décomposition
de Benders Décomposition de Dantzig-Wolfe Génération de colonnes et algorithme de
branch & price Décomposition lagrangienne Mise en oeuvre informatique
[Créé (financé) par l'ISAE-Supaero]

A.7 Méthodes stochastiques pour l'optimisation globale (SOG - 3 ECTS - R)

14h C + 10h TP + 1h examen

Responsable : Daniel Delahaye daniel.delahaye@enac.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Nicolas Durand

Syllabus :

Ce cours a pour but de présenter les méthodes d'optimisation globale utilisant des principes stochastiques pour se déplacer dans l'espace d'état. Les thèmes abordés dans ce cours sont les suivants :

- Méthodes de base : énumération, bombardement stochastique
- Recuit simulé (équilibre statistique, modèles markoviens homogènes et in-homogènes, convergence, principes de refroidissement, exemples d'application)
- Statistiques d'ordre : application à l'optimisation globale (branch and probability bound)
- Méthode tabou (principe d'intensification, principe d'aspiration, etc...)
- Évolution artificielle (principes de codage, méthodes de sélection, opérateurs de croisement, opérateurs de mutation, convergence prématurée, mise à l'échelle, crowding, recherche de plusieurs optima par sharing, évolution artificielle multi-objectif, évolution artificielle et statistiques d'ordre).
- Particle Swarm Optimization (PSO)
- Algorithmes d'estimation de distribution (EDA)
- Introduction à l'optimisation en espace de dimension infinie

L'enseignement est structuré en cours, TD et TP sur machine.

[Mutualisé avec le cours du même nom de la 3e année ENAC]

A.8 Modélisation des systèmes de production (PRD - 3 ECTS - P)

20h C

Responsable : Olga Battaïa olga.battaia@isae-supero.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Alain Haït

Syllabus :

Ce cours a pour objectif de présenter les modèles d'optimisation adaptés à des problèmes de gestion de la production et de la chaîne logistique. Il passe en revue différents problèmes classiques et présente les différentes façons de les modéliser : méthodes optimales, métaheuristiques, heuristiques.

Les étudiants mettent en pratique sur un cas d'étude qu'ils doivent résoudre avec la méthode de leur choix. Plus précisément, les thèmes étudiés sont : - planification de la production, modèles de lot-sizing - équilibrage de chaîne - planification et ordonnancement de projets - ordonnancement de la production - planification dans la supply chain.

[Mutualisé avec un cours de la 3e année SDD du Département Mathématiques, Informatique et Automatique de l'ISAE-Supaero]

A.9 Optimisation sous incertitude (INC - 3 ECTS 2 P)

28h C + 2h examen

Responsable : Marcel Mongeau marcel.mongeau@enac.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Christian Artigues, Christian Bès

Syllabus :

Optimisation robuste continue : modélisation des incertitudes, critères de robustesse, propagation des incertitudes, quantification des risques (chance constraints), sensibilité globale aux incertitudes, optimisation robuste.

Optimisation robuste discrète : scénarios d'incertitude, programmation linéaire en nombres entiers robuste, complexité et algorithmes pour l'optimisation combinatoire robuste (flots et réseaux, sac à dos, ordonnancement), prix de la robustesse, méthodes approchées et études de cas pratiques.

[Mutualisé avec le cours du même nom de la 3e année ENAC]

A.10 Optimisation globale déterministe (OGD - 3 ECTS - 2 R)

18C + 2h TP

Responsable : Frédéric Messine Frederic.Messine@n7.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Sonia Cafieri

Syllabus :

Introduction à l'optimisation globale déterministe. Analyse par intervalles. Optimisation non-linéaire mixte en nombres entiers.

[Créé (financé) par l'ENAC]

A.11 Complexité (CMP - 3 ECTS)

20h C + 3h examen

Responsable : Nicolas Barnier nicolas.barnier@enac.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique :

Syllabus :

Objectifs : Estimation des temps de calcul et consommation mémoire des algorithmes classiques non-récurrents et récurrents. Caractérisation des problèmes de la classe NP et preuves de NP-complétude, résolution par des méthodes approchées.

La notion de complexité des algorithmes est centrale à l'informatique moderne. Elle permet d'estimer les quantités de ressources (temps, espace) que l'exécution d'un programme utilisera en fonction de la taille des données. La première partie du cours est consacrée à

l'analyse des algorithmes classiques, non-récursifs et récursifs, pour évaluer leur complexité en pire cas ou en moyenne, en temps et en espace : comptage de boucles, arbre d'exécution et de décision, dénombrement, méthode Master... La seconde partie traite de la classe des problèmes NP à partir du modèle de calcul de la machine de Turing. Les problèmes NP-complets sont introduits avec le théorème de Cook et les problèmes classiques de logiques, sur les ensembles, les graphes etc. sont détaillés. La notion fondamentale de réduction polynomiale entre problèmes est alors explorée de manière approfondie. Une topologie des classes de problèmes et de la hiérarchie polynomiale de classes peut alors être dégagée. Enfin, une approche plus pragmatique de la résolution des problèmes d'optimisation « difficiles » est présentée avec les schémas d'approximation polynomiaux, ainsi que la recherche systématique et approchée.

[Mutualisé avec le cours du même nom de la 3e année ENAC]

A.12 Applications de l'optimisation au transport aérien (OTA - 3 ECTS - R)

20h C + 2h examen

Responsable : Daniel Delahaye daniel.delahaye@enac.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique :

Syllabus :

Application des techniques mathématiques pour modéliser les différentes parties du système ATM (Air Traffic Management)

- Principe de synthèse de sectorisation (2D, continue, discrète, dynamique extension 3D)
- Théorie de réseaux de transport
- Méthodes d'affectation de trafic (principes de Wardrop, équilibre statique, dynamique, déterministe stochastique, utilisateur, système)
- Modélisation mathématique de la capacité d'aéroport
- Métriques de complexité de trafic (géométrique, exposants de Lyapunov)

[Mutualisé avec le cours du même nom de la 3e année ENAC]

A.13 Programmation par contraintes (PPC - 3 ECTS - P)

10h C + 12h TP + 2h examen TP

Responsable : Nicolas Barnier nicolas.barnier@enac.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique :

Syllabus :

La Programmation Par Contraintes (PPC) est un paradigme de programmation issu de la Programmation Logique qui permet de modéliser simplement de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire, omniprésents dans l'industrie et les services, et de les résoudre efficacement.

Le cours présente tout d'abord le formalisme générique des Problèmes de Satisfaction de Contraintes (CSP) puis les algorithmes fondamentaux qui permettent de les résoudre de manière exacte : la cohérence d'arc (et de borne) ainsi que le Branch & Prune et le Branch

& Bound associés aux stratégies classiques de résolution. La bibliothèque FaCiLe pour OCaml sert ensuite de support pour décrire la structure d'un programme en contraintes sur les domaines finis dans le cadre d'un langage généraliste de haut niveau, en détaillant la construction des buts de recherche (sous-but, récursivité, itérateurs, optimisation, stratégies...), les contraintes globales, la réification de contraintes, la création de contraintes utilisateur, etc. en analysant l'impact de la modélisation et de la prise en compte des symétries sur l'efficacité de la résolution.

[Mutualisé avec le cours du même nom de la 3e année ENAC]

A.14 Thèmes contemporains en optimisation (TCO - 3 ECTS - 2 R)

20h C + 2h examen

Responsable : Jean-Baptiste Hiriart-Urruty jbhu@math.univ-toulouse.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique :

Syllabus :

Modélisation, prise en compte de l'incertitude, aspects théoriques de l'optimisation globale, optimisation convexe moderne (sous-différentiel et application prox), pré-requis pour l'apprentissage statistique et autres applications.

[Créé (financé) par l'ENAC et mutualisé avec le M2R Mathématiques et applications]

A.15 Inverse problems (INV - 3 ECTS - P)

Problèmes inverses

21h C

Responsable : Serge Gratton serge.gratton@enseeiht.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique :

Syllabus :

Forecasting the behavior of a complex dynamical system using (physical) observations relies on the solution of an inverse problem. Solution techniques to solve this problem are often called data assimilation techniques. The purpose of this module is to present the algorithms that are used to solve real life problems described in the so-called variational approach, in the case where they involve a large number of degrees of freedom. These algorithms are at the intersection between optimization, inverse problems, and optimization theory. Since many problems in scientific computing involve the solution of very large systems of linear equations, a purpose of the module is also to describe the mathematical techniques that can be used to tackle the problems on front-end parallel architectures.

[Mutualisé avec le cours « Numerical Method for Scientific Computing » de la 3e année du Département Mathématiques et Informatique de l'INPT-ENSEEIH]

A.16 Algorithmes en Apprentissage Artificiel (APP - 3 ECTS 2)

26h C

Responsable : Emmanuel Rachelson emmanuel.rachelson@isae-supero.fr

Syllabus : Élaborer des machines numériques, des algorithmes, qui évoluent et apprennent à partir d'exemples est le but de la discipline de l'Apprentissage Artificiel. L'apprentissage supervisé en particulier s'intéresse à la question d'associer des mesures observées (par exemple des pixels d'une image, des mots dans un e-mail, des mesures de température) à une valeur discrète (l'image représente-t-elle un « 1 » ou un « 7 »?, l'e-mail est-il un spam?) ou continue (quelle sera la demande électrique?), de façon à construire une fonction de prédiction qui généralise l'information obtenue à partir des données. On abordera ainsi les tâches de classification automatique supervisée, de régression et on fera une brève incursion dans le paysage de l'apprentissage non-supervisé, au travers des grandes familles d'algorithmes suivants : - Apprentissage bayésien naïf - Machines à Vecteurs Supports et méthodes à noyaux - Processus Gaussiens - Réseaux de Neurones - Deep Learning - Arbres de Décision - Boosting, Bagging et Forêts aléatoires.

[Mutualisé avec le cours « Algorithmes en apprentissage artificiel » de 3e année GI du Département Mathématiques, Informatique et Automatique de l'ISAE-Supero]

A.17 Gestion intégrée de la production et de l'énergie (GPE - 3 ECTS - P)

20h C

Responsable : Gilles Hétreux gilles.hetreux@ensiacet.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique :

Syllabus :

L'objectif est le développement de modèles PLM généraux traitant des problèmes couplant le pilotage de la production (niveau planification et ordonnancement) et la gestion de l'énergie (notamment la gestion des utilités comme l'électricité, la vapeur, l'eau surchauffée, le froid, etc.) Les TP associés s'appuient sur des formulations de programmation linéaire mixte associés à des graphes pour résoudre différents cas d'étude. La mise en oeuvre est réalisée avec ILOG Solver (IBM).

[Mutualisé avec un cours de 3e année de la formation Efficacité Énergétique des Procédés (2EP) de l'INPT-ENSIACET]

A.18 Conception de réseaux de valorisation (CRV - 3 ECTS P)

17h

Responsable : Pascal Floquet Pascal.Floquet@ensiacet.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Stéphane Negny

Syllabus :

Ce cours se subdivise en deux parties :

1. **Trajectoire de valorisation et logistique.** L'objectif est d'écrire un modèle d'une chaîne logistique pour la localisation de centres de stockage et d'ateliers de production. Le modèle prend en considération des contraintes de capacité (taille du stockage, capacité de traitement des ateliers), du choix de la technologie, de la saisonnalité de la matière première ainsi que son altération dans le temps. Le modèle développé permet également d'introduire l'approche multi périodes.
2. **Conception de réseaux d'échangeurs de chaleur.** Cette partie correspond principalement à un TD long concernant la conception de réseaux d'échangeurs. Il ne nécessite qu'un minimum d'apport « procédés » (équations modèle d'un échangeur de chaleur à contre-courant), se place dans l'aspect énergétique et développe les aspects Superstructure sous le logiciel de modélisation GAMS.

[Mutualisé avec un cours de 3e année de la formation Efficacité Énergétique des Procédés (2EP) de l'INPT-ENSIACET]

B Les UE proposées au 2nd semestre du M2

Cette annexe présente le contenu des UE scientifiques proposées au 2nd semestre du M2. À la suite de chaque intitulé, le nombre d'ECTS correspondant est indiqué.

Dans la liste qui suit, le nom de l'enseignant apparaissant entre parenthèses est le responsable (point de contact) pour cet enseignement au moment de la demande de co-accréditation.

B.1 RO appliquée (ROA - 3 ECTS)

7h C + 13h TP

Responsable : Marcel Mongeau marcel.mongeau@enac.fr

Autres membres de l'équipe pédagogique : Stéphane Negny

Syllabus :

- une introduction à de nombreuses applications industrielles et à un logiciel de modélisation et d'optimisation (LocalSolver) avec travaux pratiques sur machine. 4h C + 8h TP. Intervenant prévu : Frédéric Gardi (Innovation 24).
- une introduction aux bases de la théorie des jeux et la mise en situation via un « serious game » pour initier l'étudiant aux problématiques inhérentes à la gestion d'un aéroport. 3h C + 5h TP. Intervenant prévue : Estelle Malavolti (ENAC-TSE).

B.2 Projet tuteuré (PRJ - 3 ECTS)

Responsable : Cyril Allignol cyril.allignol@enac.fr

Projet tuteuré en recherche opérationnelle dans un laboratoire de recherche académique incluant la mise en oeuvre informatique d'une méthode d'optimisation sur un problème inspiré d'une application réelle. Représente environ 75h de travail personnel pour l'étudiant.

B.3 Stage (STA - 24 ECTS)

Stage orienté recherche de 5 ou 6 mois dans le domaine de la Recherche opérationnelle dans un laboratoire de recherche publique ou dans un service de recherche et développement (R&D) d'une entreprise, en France ou à l'étranger, conduisant à la production d'un **rapport scientifique**. Le stage peut se dérouler jusqu'en septembre. La **soutenance** orale a généralement lieu en septembre. Mots-clés : Définition formelle d'un problème de Recherche opérationnelle, modélisation mathématique, algorithme, mise en oeuvre informatique, campagne d'expérimentations numériques, analyse des résultats, ajustement de paramètres, rebouclages avec : le problème initial, sa modélisation et l'algorithme de résolution.

C Inscription en double diplôme en école d'ingénieurs

Le parcours est aménagé pour les élèves en dernière année d'une des écoles d'ingénieurs : ENAC, INPT-ENSEEIHT et INPT-ENSIACET, INSA-Toulouse, ISAE-Supaero.

Au 1er semestre, l'élève doit suivre au moins 12 ECTS du M2 RO en dehors de son cursus école d'origine (ou 9 ECTS du M2 RO en dehors de son cursus école d'origine plus un projet comptant pour 3 ECTS). Selon les écoles, des décharges de cours du cursus école lui sont accordées.

Au 2nd semestre, son stage de recherche compte aussi pour son stage de fin d'étude d'école (soutenance unique et commune).

C.1 ENAC

Contact école du M2 RO : mohammed.sbihi@enac.fr

UE M2 RO hors cursus école à suivre : OGD, OCA, TCO, ROA

C.2 INPT-ENSIACET

Contact école du M2 RO : stephane.negny@ensiacet.fr

UE M2 RO hors cursus école à suivre : [à compléter]

C.3 INPT-ENSEEIHT

Contact école du M2 RO : sandra.ngueveu@enseeiht.fr

UE M2 RO hors cursus école à suivre : OGD, OCA, ROA ainsi que 3 ECTS correspondant à la rédaction d'un rapport scientifique mettant en évidence la nature recherche du stage, décrivant la problématique du stage et présentant une étude bibliographique de l'état de l'art de la problématique concernée.

C.4 INSA de Toulouse

Contact école du M2 RO : aude.rondepierre@insa-toulouse.fr (département GMM) et huguet@laas.fr (département GEI).

L'INSA ne co-accréditant pas le M2 RO (une convention est signée tout de même avec l'INSA), **les élèves de l'INSA doivent s'inscrire à l'UPS.**

En plus des 3 UE décrites ci-dessous les élèves INSA doivent rendre un rapport scientifique (correspondant à 3 ECTS) comme les élèves INPT-ENSEEIHT (voir section C.3 ci-dessus).

UE M2 RO hors cursus école à suivre :

- élèves du GEI : OGD, OCA, ROA
- élèves du GMM : FRO et (SOG ou INC) à déterminer en début d'année de façon unique pour tous les élèves GMM.

C.5 ISAE-Supaero

Contact école du M2 RO : alain.hait@isae.fr

UE M2 RO hors cursus école à suivre :

- élèves du GI : 3 UE parmi INC, OGD, OCA, SOG, APP
- élèves du SDD : 3 UE parmi INC, OGD, OCA, SOG, PRD

En plus de ces 3 UE, les élèves ISAE-Supaero doivent rendre un rapport scientifique (correspondant à 3 ECTS) comme les élèves INPT-ENSEEIH (voir section C.3 ci-dessus).