

Royaume du Maroc



Ministère de l'Education Nationale,
du Préscolaire et des Sports

Ministère de l'Éducation Nationale, du Préscolaire et des Sports
Classes Préparatoires aux Grandes Écoles

Filière : Mathématiques, Physique et Sciences de l'ingénieur
(MPSI)

Programme des sciences industrielles pour l'ingénieur
Deuxième année (MP)

Table des matières

1. Préambule	3
2. Présentation.....	3
2.1. Objectifs de la formation.....	3
2.2. Démarche pédagogique et didactique de l'enseignant.....	3
2.3. Compétences générales de l'ingénieur développées.....	4
2.4. Activités d'enseignement.....	5
2.5. Organisation du programme et volume horaire indicatif.....	5
2.6. Progression	5
3. Contenu détaillé du programme.....	5
3.1. Premier trimestre.....	5
3.2. Deuxième trimestre.....	8

1. Préambule

Les ingénieurs de demain doivent répondre efficacement et de manière innovante aux besoins de progrès et d'amélioration de la qualité de vie des personnes et par ricochet participer dans le développement de la société dans un cadre plus large. Cette réponse se manifeste par leurs implications dans les divers secteurs de l'économie de production et de service. Ils participent aux processus de développement des systèmes à chaque étape de leurs cycle de vie, de la caractérisation du besoin jusqu'au recyclage, en respectant les contraintes écologiques visant un développement durable et en adoptant les règles et concept de l'éco-conception

Ces nouvelles manières d'aborder les enjeux contemporains de notre société génèrent des problématiques complexes nécessitant la conception de systèmes innovants le plus souvent pluri-technologiques répondant exactement aux besoins des clients. Le développement, la réalisation et la mise en œuvre de ces systèmes nécessitent l'adoption d'une démarche d'analyse qui intègre une multitude de contraintes d'ordre réglementaire, écologique, technologique et économique.

La conciliation de ses contraintes avec les règles du marché en termes de délai et de compétitivité impose l'introduction des concepts de l'ingénierie numérique ainsi que les outils de résolution et de modélisation numérique dans le programme d'enseignement des SII.

2. Présentation

2.1. Objectifs de la formation

L'enseignement des sciences industrielles pour l'ingénieur (SII) nécessite la mobilisation des compétences scientifiques fondamentales transversales du programme du CPGE ainsi que les outils d'analyse et de résolution numérique qui en découlent pour constituer une panoplie d'outils d'accompagnement de l'apprenant dans la recherche et la conception de solutions industrielles appropriées aux problématiques complexes liées au développement continu du processus industriel. Au terme des deux années de formation, l'appréhension des sciences industrielles vise le développement chez les élèves d'une vision globale de l'approche projet qui nécessite le développement des aptitudes de communiquer, de travailler en équipe, d'auto critique et d'ouverture.

Les compétences acquises doivent constituer une plate-forme solide sur laquelle prendra appui la formation dans les grandes écoles. Dans ces écoles, il sera question d'approfondir les savoirs appréhendés en CPGE, l'introduction et la découverte de nouvelles connaissances et compétences propres aux divers profils de formation au métier d'ingénieur.

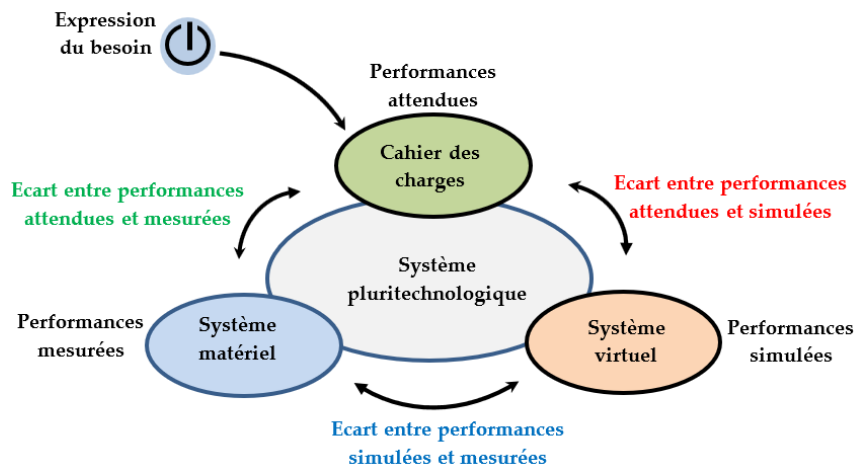
Ce programme contribue aussi à l'approche pédagogique par les STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*) qui permet de favoriser le décroisement entre les disciplines enseignées en CPGE marocaines.

2.2. Démarche pédagogique et didactique de l'enseignant

L'approche des enseignements en SII s'organise autour de systèmes pluri technologiques. Chaque système est défini à partir de besoins fonctionnels et d'exigences, de modèles numériques et d'un système matériel. Un système sera étudié dans sa globalité à partir de ces trois approches imbriquées :

- la réalité du besoin ou exigences fonctionnelles. Elle se décline dans le cahier des charges défini avec un client ;
- la réalité virtuelle d'un système. Elle se traduit dans l'élaboration d'un modèle permettant de simuler son comportement afin d'en prévoir et d'en évaluer les performances ;
- la réalité matérielle d'un système. Les performances du système matériel sont mesurées par expérimentation.

L'illustration suivante montre les trois représentations des systèmes et les écarts constatés entre les performances attendues, simulées et mesurées (Démarche d'ingénieur).



La démarche pédagogique en sciences industrielles de l'ingénieur vise à :

- s'approprier les trois réalités du système pluritechnologique (le cahier des charges, le système virtuel et le système matériel) ;
- comparer les performances issues de ces trois réalités ;
- optimiser le système virtuel et le système matériel afin de faire converger leurs performances vers celles attendues au cahier des charges.

Les contenus du programme des sciences industrielles pour l'ingénieur permettent aux élèves d'investir complètement la démarche de l'ingénieur en s'intéressant à toutes les représentations des systèmes. Pour cela les enseignements en SII installent progressivement l'ensemble des connaissances et des compétences nécessaires à la maîtrise des différentes représentations d'un même objet ou système, à la comparaison des différentes performances, à l'optimisation des systèmes dans leurs réalités numérique et matérielle, afin de répondre aux attentes du client.

2.3. Compétences générales de l'ingénieur développées

Les compétences développées en sciences industrielles pour l'ingénieur forment un tout cohérent, en relation directe avec la réalité industrielle qui entoure l'élève. Couplées à la démarche de l'ingénieur, elles le sensibilisent aux travaux de recherche, de développement et d'innovation. Des solutions innovantes sont modélisées de façon numérique. Ces modèles numériques permettent la simulation du comportement des systèmes pluri technologiques afin d'obtenir des performances simulées. Une démarche expérimentale menée sur des systèmes existants vient enrichir les compétences des étudiants au service de la démarche de l'ingénieur. Elle permet la comparaison des performances simulées et mesurées avec celles attendues au cahier des charges afin d'optimiser tout ou partie du modèle numérique.

Ces compétences sont :

- **Analyser** : permet des études fonctionnelles, structurelles et comportementales des systèmes conduisant à la compréhension de leur fonctionnement et à une justification de leur architecture. Via les activités expérimentales, elles permettent d'acquérir une culture des solutions industrielles qui facilitent l'appropriation de tout système nouveau. Cette approche permet de fédérer et assimiler les connaissances présentées dans l'ensemble des disciplines scientifiques de classes préparatoires aux grandes écoles.
- **Modéliser** : permet d'appréhender le réel et d'en proposer, après la formulation d'hypothèses, une représentation graphique, symbolique ou équationnelle pour comprendre son fonctionnement, sa structure et son comportement. Le modèle retenu permet des simulations afin d'analyser, de vérifier, de prévoir et d'améliorer les performances d'un système.
- **Résoudre** : permet de donner la démarche pour atteindre de manière optimale un résultat. La résolution peut être analytique ou numérique. L'outil de simulation numérique permet de prévoir les performances de systèmes complexes en s'affranchissant de la maîtrise d'outils mathématiques spécifiques.
- **Communiquer** : permet de décrire, avec les outils de la communication technique et l'expression scientifique et technologique adéquate, le fonctionnement, la structure et le comportement des systèmes.

2.4. Activités d'enseignement

- Cours – TD : 2 heures hebdomadaires programmées, de préférence, le matin ;

2.5. Organisation du programme et volume horaire indicatif

Thème	Parties	Volume horaire indicatif des activités de cours et TD	
Automatique	Modèles de comportement d'un système	≈ 16 h	TRIMESTRE 1
	Réponses temporelles et fréquentielles		
	Simplification d'un modèle		
	Performances		
	Amélioration des performances d'un système asservi		
Mécanique	Cinétique	≈ 6 h	TRIM. 2
	Dynamique	≈ 16 h	
	Théorème de l'énergie cinétique		
IA	IA	≈ 6 h	

2.6. Progression

Un découpage trimestriel a été adopté pour développer le contenu du programme des sciences industrielles pour l'ingénieur. Dans le cadre de la liberté pédagogique, l'enseignant peut traiter le contenu relatif à un trimestre selon ses préférences et ses dispositions pédagogiques.

Certaines notions et compétences du programme des sciences industrielles pour l'ingénieur sont en commun avec la physique ou l'informatique.

- La mention (**I**) indique que la notion est en commun avec l'informatique. L'enseignant se contentera de proposer à ses élèves des applications spécifiques à la SII ;
- La mention (**P**) indique que la notion est en commun avec la physique. L'enseignant doit se concerter en permanence avec le professeur de physique pour éviter toute répétition.

3. Contenu détaillé du programme

3.1. Premier trimestre

Détails du programmes	Compétences et commentaires
1- Automatique 1.1) Modèles de comportement d'un système <ul style="list-style-type: none"> - De premier ordre ; - De deuxième ordre ; - Dérivateur ; - Intégrateur ; - Gain ; - Retard. 	<p>Un modèle de comportement est associé à une réponse expérimentale donnée.</p> <p>Seule la connaissance de la réponse temporelle à un échelon, du 1^{er} et 2^{ème} Ordre, ainsi que de l'intégrateur, est exigible.</p> <p>L'enseignant présentera les expressions des solutions des équations différentielles pour les systèmes d'ordre 1 et 2 soumis à une entrée échelon (I).</p> <p>Les allures des solutions des équations différentielles d'ordre 1 et 2 pour les entrées de type impulsion, échelon, rampe et sinus doivent être limitées au régime permanent (I).</p> <p>La résolution des équations différentielles n'est pas au programme.</p> <p>D'un point de vue fréquentiel, seul le diagramme de Bode est développé pour l'identification d'un modèle de comportement.</p> <p>Seul le diagramme de Bode est au programme.</p> <p>On rappellera les techniques de détermination du</p>

<p>1.2) Réponses temporelles et fréquentielles</p> <p>d'un système de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Premier ordre fondamental ; - Deuxième ordre fondamental ; - Intégrateur. <p>❖ <u>Réponse temporelle</u> : temps de réponse à 5% ;</p> <p>❖ <u>Réponse fréquentielle</u> : diagrammes de Bode et Bande passante.</p> <p>1.3) Simplification d'un modèle :</p> <p>❖ Linéarisation autour d'un point de fonctionnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Non-linéarités (courbure, hystérésis, saturation et seuil) et retard pur ; - Point de fonctionnement ; <p>❖ Pôles dominants et réduction de l'ordre du modèle :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Principe ; - justification. <p>1.4) Performances :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rapidité ; <ul style="list-style-type: none"> ✓ Temps de réponse à 5 % ; ✓ Bande passante ; ✓ Retard de traînage. - Précision d'un système asservi : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Définition de la précision en régime permanent ; ✓ Précision en régime permanent pour une entrée en échelon et une entrée en rampe ; ✓ Influence de la classe et du gain de la fonction de transfert en boucle ouverte. - Stabilité : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Définition entrée bornée - sortie bornée (EB-SB) ; ✓ Amortissement ; ✓ Equation caractéristique : condition de stabilité ; ✓ Position des pôles dans le plan complexe ; ✓ Critères de stabilité : 	<p>temps de réponse à 5% et de la bande passante pour un système du premier et du deuxième ordre fondamental.</p> <p>Les compétences attendues doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identifier les grandeurs d'entrée et de sortie d'un modèle ; - Identifier les paramètres d'un modèle ; - Identifier et justifier les hypothèses nécessaires à la modélisation ; - Donner l'allure de la réponse (temporelle et fréquentielle) attendue des modèles élémentaires ; - Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle du premier ordre ou du deuxième ordre à partir de sa réponse indicielle (I) (Les abaques nécessaires à l'identification sont fournis) ; - Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle de comportement à partir de sa réponse fréquentielle (I); - Tracer le diagramme asymptotique de Bode d'un produit de transmittances élémentaires ; - Proposer l'allure des diagrammes réels de Bode (se limiter aux cas usuels) (I). <p>L'étudiant doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identifier les principales causes de non-linéarité ; - Valider la linéarisation du modèle autour d'un point de fonctionnement ; - Préciser les limites de validité d'un modèle ; - réduire l'ordre de la fonction de transfert selon l'objectif visé, à partir des pôles dominants qui déterminent la dynamique asymptotique du système. <p>L'étudiant doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Prévoir les performances en termes de rapidité, - Relier la rapidité aux caractéristiques fréquentielles; <p>Il faut insister sur la nécessité de comparer des grandeurs homogènes, par exemple la nécessité d'adapter la sortie et sa consigne.</p> <p>L'amélioration des performances apportée par la fermeture de la boucle est illustrée.</p> <p>Les compétences attendues doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déterminer l'erreur en régime permanent vis-à-vis d'une entrée en échelon (consigne ou perturbation), ou en rampe vis-à-vis de la consigne ; - Relier la précision aux caractéristiques fréquentielles ; <p>Il faut insister sur le fait qu'un système perturbé conserve la même équation caractéristique dans le cas de perturbations additives.</p> <p>Le critère algébrique de ROUTH est hors programme.</p> <p>On insistera sur l'influence du gain en boucle ouverte sur la stabilité, la rapidité et la précision.</p> <p>Les compétences requises devront permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Décider de la stabilité d'un système à partir de
--	---

<ul style="list-style-type: none"> • Critère graphique du revers dans le plan de Bode ; • Stabilité pratique : amortissement, dépassement relatif et marges de stabilité (de gain et de phase). <p>- Ordre de grandeur, Homogénéité des résultats.</p> <p>1.5) Amélioration des performances d'un système asservi : correction</p> <p>- Notions sur la correction des systèmes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Action proportionnelle ; ✓ Action intégrale ; ✓ Action dérivée. <p>- Réglage des correcteurs : compensation des pôles, réglage de marges, amortissement, rapidité et bande passante ;</p> <p>- Application aux correcteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Réglage du correcteur proportionnel ; ✓ Réglage du correcteur proportionnel intégral (P.I) ; ✓ Réglage du correcteur à avance de phase ; <p>2- Mécanique :</p> <p>2.1) Cinétique</p> <ul style="list-style-type: none"> - Volume, masse, centre d'inertie, principe de conservation de la masse ; - Opérateur d'inertie en un point : définition, matrice d'inertie, directions principales, influence de la symétrie matérielle sur la forme de la matrice d'inertie. Théorème d'Hyghens ; - Torseur cinétique : définition, expression dans le cas du solide indéformable ; - Torseur dynamique : définition, relation entre le moment cinétique et le moment dynamique ; - Energie cinétique : définition, expression dans le cas du solide indéformable ; notion d'inertie équivalente. 	<p>l'équation caractéristique ;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déterminer les paramètres permettant d'assurer la stabilité du système ; - Relier la stabilité aux caractéristiques fréquentielles ; - Déterminer, analytiquement et graphiquement, ses marges de stabilité ; - Proposer une démarche permettant d'évaluer les performances d'un système asservi ; - Extraire un indicateur de performance pertinent à partir du cahier des charges ou de résultats issus de l'expérimentation ou de la simulation. - Caractériser les écarts entre les performances. - Interpréter et vérifier la cohérence des résultats obtenus expérimentalement, analytiquement ou numériquement (I). - Rechercher et proposer des causes aux écarts constatés. <p>Les relations entre les paramètres de réglage fournies, l'étudiant doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Choisir un type de correcteur adapté ; - Proposer et mettre en œuvre la démarche de réglage d'un correcteur proportionnel, proportionnel intégral et à avance de phase (I) ; - Déterminer les paramètres d'un correcteur proportionnel, proportionnel intégral et à avance de phase ; - Modifier les paramètres et enrichir le modèle pour minimiser l'écart entre les résultats analytiques et/ou numériques et les résultats expérimentaux <p>Les calculs intégraux des éléments d'inertie (matrice d'inertie, centre d'inertie) ne donnent pas lieu à évaluation.</p> <p>La relation entre la forme de la matrice d'inertie et la géométrie de la pièce est exigible.</p> <p>Un modèle de système de solides étant fourni, l'étudiant doit être capable de déterminer les torseurs cinétique et dynamique et l'énergie cinétique d'un ensemble de solides en mouvement par rapport à un référentiel.</p>
---	---

3.2. Deuxième trimestre

<p>2- Mécanique :</p> <p>2.2) Dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> - Principe fondamental de la dynamique dans un repère galiléen ; - Théorèmes généraux ; - Applications : Solide en rotation autour d'un axe fixe (Notion d'équilibre statique et dynamique). <p>2.3) Théorème de l'énergie cinétique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puissance des efforts extérieurs à un système en mouvement par rapport à un repère ; - Cas particulier du solide indéformable. - Puissance des efforts intérieurs à un système de solides indéformables. - Perte d'énergie ; - Rendement d'une chaîne d'énergie en régime permanent ; - Théorème de l'énergie cinétique dans un repère galiléen : pour un solide et pour un ensemble de solides. <p>3- Intelligence artificielle</p> <p>Régression et classification, apprentissages supervisé et non supervisé. Phases d'apprentissage et d'inférence. Modèle linéaire monovarié ou multivarié. Réseaux de neurones (couches d'entrée, cachées et de sortie, neurones, biais, poids et fonction d'activation).</p> <p>Décomposition d'un problème complexe en sous problèmes simples. Choix des algorithmes (réseaux de neurones, k plus proches voisins et régression linéaire multiple)</p> <p>Apprentissage supervisé. Choix des données d'apprentissage. Mise en œuvre des algorithmes (réseaux de neurones, k plus proches voisins et régression linéaire multiple). Phases d'apprentissage et d'inférence.</p> <p>Matrice de confusion (tableau de contingence), sensibilité et spécificité d'un test.</p>	<p>Un modèle de système de solides, en liaisons isostatiques étant fourni, l'étudiant doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Proposer ou compléter une méthode permettant de déterminer les inconnues de liaison ou les efforts extérieurs spécifiés dans le cas où le mouvement est imposé ; - Proposer ou compléter une démarche permettant de déterminer la loi du mouvement dans le cas où les efforts extérieurs sont connus ; - Choisir une méthode pour déterminer la valeur des paramètres conduisant à des positions d'équilibre. <p>Les compétences acquises doivent permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Associer les grandeurs physiques (Effort et flux) aux échanges d'énergie et à la transmission de puissance ; - Justifier le choix des constituants dédiés aux fonctions d'un système ; - Identifier les pertes d'énergie ; - Évaluer le rendement d'une chaîne d'énergie en régime permanent ; - Déterminer la puissance des actions mécaniques extérieures à un solide ou à un ensemble de solides, dans son mouvement rapport à un autre solide ; - Déterminer la puissance des actions mécaniques intérieures à un ensemble de solides ; - Déterminer l'équation différentielle issue du théorème de l'énergie cinétique pour déterminer une inconnue (Effort ou loi de mouvement). <p>La résolution des équations différentielles de la dynamique peut être conduite indirectement par des logiciels adaptés. L'accent est alors mis sur la modélisation, l'acquisition correcte des données et sur l'exploitation des résultats.</p> <p>Analyser les principes d'intelligence artificielle (I)</p> <p>Choisir une démarche de résolution d'un problème d'ingénierie numérique ou d'intelligence artificielle (I).</p> <p>Résoudre un problème en utilisant une solution d'intelligence artificielle (I). Des bibliothèques pré-implémentées sont utilisées. Le candidat doit être capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interpréter et vérifier la cohérence des résultats obtenus expérimentalement, analytiquement ou numériquement (I). - Rechercher et proposer des causes aux écarts constatés.
---	---