

## **A**nnexe II

### **PROGRAMME DE SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR POUR LA VOIE PHYSIQUE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR (PSI)**

#### **1. OBJECTIFS DE FORMATION**

##### **1.1. Finalités**

L'enseignement de sciences industrielles pour l'ingénieur permet d'aborder avec méthode et rigueur l'analyse de réalisations industrielles. Il renforce l'interdisciplinarité et développe des aptitudes à modéliser des systèmes industriels, à déterminer leurs grandeurs caractéristiques, à communiquer et à interpréter les résultats obtenus en vue de faire évoluer le système réel. Les systèmes choisis relèvent des grands secteurs technologiques : transport, production, bâtiment, santé, environnement... Les concepts et outils présentés sont transposables à l'ensemble des secteurs industriels.

L'approche système permet d'appréhender la complexité des situations industrielles. Les systèmes techniques sont aujourd'hui automatiques. C'est pourquoi l'enseignement des sciences industrielles pour l'ingénieur s'appuie sur la mécanique et l'automatique.

Les finalités de cet enseignement permettent de développer les capacités à mobiliser un corpus de connaissances pour analyser et modéliser des situations concrètes, valider des performances, imaginer des solutions et communiquer des résultats en s'appuyant sur la maîtrise d'outils fondamentaux de la mécanique et de l'automatique, ainsi que sur les connaissances de base des technologies associées.

##### **1.2. Objectifs généraux**

L'enseignement et l'évaluation des connaissances en sciences industrielles pour l'ingénieur reposent sur l'analyse et la critique de systèmes industriels existants. Celles-ci permettent, d'une part, d'analyser les besoins, l'architecture, l'évolution, la modélisation des réalisations existantes et, d'autre part, de concevoir des architectures définies par un cahier des charges.

À partir de supports industriels placés dans leur environnement technico-économique, les étudiants devront être capables :

- d'analyser des réalisations existantes, c'est-à-dire :
  - conduire l'analyse fonctionnelle (blocs fonctionnels) ;
  - décrire leur fonctionnement avec les outils de la communication technique ;
  - conduire l'analyse structurelle des blocs fonctionnels principaux (architecture et composants) ;
  - identifier les facteurs qui caractérisent les évolutions technologiques ;
- de valider les performances globales d'un système industriel et le comportement de certains constituants en proposant une modélisation adaptée et en formulant les hypothèses nécessaires ;
- d'imaginer, par l'association de blocs fonctionnels, des solutions d'évolution du système répondant à un besoin exprimé.

La communication, les représentations et les simulations reposent sur l'utilisation des langages techniques et de l'outil informatique.

## 2. PROGRAMME

### 2.1. Présentation

L'enseignement de sciences industrielles pour l'ingénieur est organisé autour de l'étude des systèmes industriels. Il est abordé dans ses dimensions cognitives, systémiques et méthodologiques.

Cette approche, fondée sur l'étude de solutions industrielles (abordées en travaux pratiques et en travaux dirigés), doit privilégier l'acquisition des connaissances de base présentées dans les différentes parties du programme. Ces connaissances sont dispensées et structurées non seulement pendant les cours théoriques mais également à travers des activités dirigées et expérimentales (en travaux dirigés et en travaux pratiques).

Pour assurer la cohérence du programme, la totalité de l'enseignement dans une même division est assurée par un même professeur agrégé de mécanique ou de génie mécanique.

Les différentes parties du programme sont présentées en indiquant pour chacune :

- les contenus accompagnés de commentaires ;
- les compétences attendues.

### 2.2. Lignes directrices du programme

#### 2.2.1. Étude fonctionnelle et structurelle des systèmes

Cette étude permet d'analyser l'organisation fonctionnelle et structurelle de systèmes industriels conduisant à la compréhension de leur fonctionnement et à une (ou plusieurs) justification(s) de leur architecture.

Elle permet d'acquérir une culture des solutions industrielles qui facilite la compréhension et l'appropriation de tout système nouveau.

Elle s'appuie sur des méthodes d'analyse et des outils reconnus et performants qui permettent d'associer des ensembles de constituants aux fonctions principales, ou des constituants uniques aux fonctions secondaires d'un système industriel.

La comparaison, pour un même besoin exprimé, entre des systèmes produits par des concepteurs différents à une même date ou par un même concepteur à des dates différentes, permet de justifier l'évolution technologique. Elle facilite l'initiation à la conception des systèmes.

Les activités de conception sont limitées à la définition et à la modification d'architectures générales par l'association de blocs fonctionnels. Elles permettent de fédérer les connaissances acquises dans l'ensemble des disciplines. Elles développent l'esprit d'initiative et la créativité des étudiants.

Les outils de la communication technique et de l'expression technologique dans leur diversité et leur complémentarité permettent de lire et de s'exprimer dans le domaine des sciences industrielles pour l'ingénieur.

La communication technique est abordée sous le double aspect :

- de l'utilisation des langages spécifiques que sont le dessin technique graphique et assisté par ordinateur, les schémas, les graphes ;
- de la maîtrise du vocabulaire technique qui permet la description écrite et orale du fonctionnement ou du comportement des systèmes étudiés.

### 2.2.2. Étude des performances des systèmes

Cette étude permet de valider certains critères de performance industrielle dans l'environnement socio-économique, culturel et historique. Elle s'appuie sur la maîtrise d'outils fondamentaux de la mécanique et de l'automatique ainsi que sur les connaissances de base des technologies associées, et sur une démarche expérimentale d'observation et d'analyse des comportements du système.

Les connaissances acquises dans l'ensemble des disciplines sont utilisées en travaux dirigés, en travaux pratiques ou lors des travaux d'initiative personnelle encadrés pour analyser le fonctionnement et vérifier les performances des systèmes étudiés. Des conclusions argumentées doivent être tirées des résultats d'expérimentations ou de calculs au regard des hypothèses formulées et des méthodes utilisées. Il est nécessaire d'insister sur les vertus et les limites de la modélisation utilisée dans la démarche.

L'objectif étant précisé, l'étude de modèles simples doit être privilégiée, en mécanique comme en automatique. On peut ainsi :

- estimer le comportement d'un système ou donner les ordres de grandeur des résultats ;
- effectuer des comparaisons entre le comportement estimé d'un système (dédit du modèle), et son comportement réel (dédit de résultats d'expérimentations) ;
- justifier, en fonction de l'objectif à atteindre, un retour aux hypothèses et/ou une évolution vers un modèle plus adapté.

L'enseignement de la mécanique conduit à appliquer les lois générales et les concepts à des objets ou des systèmes manufacturés. Ces lois et ces concepts sont étudiés ou mis en évidence en cours, en travaux dirigés et plus particulièrement lors des activités de travaux pratiques. L'utilisation de l'outil informatique, en particulier pendant les activités de travaux pratiques, permet une étude approfondie du comportement des mécanismes et la résolution rapide des problèmes grâce à des logiciels de modélisation, de calcul ou de simulation

L'automatique nécessite une analyse et une modélisation des systèmes pour isoler les fonctions de commande, en particulier le traitement de l'information. Ses domaines d'application sont aussi nombreux que variés. L'enseignement se limite aux connaissances de base nécessaires pour l'étude des systèmes logiques et des systèmes linéaires continus. Une approche scientifique s'appuyant sur des exemples industriels, et l'importance donnée aux travaux dirigés et pratiques garantissent l'appartenance de l'automatique au domaine des sciences de l'ingénieur.

L'informatique en tant qu'outil de travail de l'automaticien doit faciliter l'élaboration et la mise au point des programmes de commande, ainsi que la compréhension du comportement des éléments de commandes des systèmes. Des logiciels de programmation d'automatisme, de simulation, de documentation technique sont utilisés en travaux pratiques.

Les activités de travaux pratiques sont au cœur de la formation car elles permettent :

- de situer les connaissances théoriques par rapport à la complexité et à la cohérence des solutions technologiques ;
- d'acquérir des compétences transversales qui s'appuient sur chacun des trois enseignements (mécanique, automatique, étude des systèmes).

Elles sont organisées autour de produits industriels instrumentés ou de matériels didactisés constitués de composants industriels et permettent :

- de valider des concepts de base abordés dans les cours magistraux, d'apporter des connaissances nouvelles et d'exploiter l'ensemble des connaissances scientifiques enseignées dans les autres disciplines ;
- d'acquérir la connaissance de solutions industrielles répondant à un besoin défini, de leur associer une modélisation permettant l'utilisation de lois de la mécanique et de l'automatique ;
- de vérifier des performances ;
- de manipuler en effectuant des mesures en comportement réel et des réglages ;
- de formuler ou de reformuler des hypothèses pour modéliser le réel et d'apprécier les limites de leur validité ;
- de développer le sens de l'observation, le goût du concret, la prise d'initiative et le sens de la responsabilité.

## PROGRAMME

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<p><b>1. MÉCANIQUE</b></p> <p><b>A) Dynamique des solides</b></p> <p>1) Cinétique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- masse, principe de conservation de la masse, centre d'inertie ;</li> <li>- opérateur d'inertie : définition, matrice d'inertie, directions principales, changement de point ;</li> <li>- torseur cinétique : définition, expression dans le cas du solide indéformable ;</li> <li>- torseur dynamique : définition, relation entre le moment cinétique et le moment dynamique ;</li> <li>- énergie cinétique : définition, expression dans le cas du solide indéformable.</li> </ul> <p>2) Puissance :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- puissance développée par les efforts extérieurs à un système en mouvement par rapport à un repère ;</li> <li>- cas particulier du solide indéformable ;</li> <li>- puissance développée par les efforts intérieurs à un système de solides indéformables.</li> </ul> <p>3) Dynamique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- principe fondamental de la dynamique ;</li> <li>- théorèmes généraux ;</li> <li>- théorème de l'énergie cinétique ;</li> <li>- application : solide en rotation autour d'un axe fixe, conditions d'équilibrage statique et dynamique.</li> </ul> <p><b>B) Chaînes de solides</b></p> <p>1) Mise en équation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- analyse géométrique, cinématique et des actions mécaniques.</li> </ul> <p>2) Définitions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- degré de mobilité d'un mécanisme ;</li> <li>- degré d'hyperstatisme d'un mécanisme.</li> </ul> <p>3) Détermination du degré de mobilité et du degré d'hyperstatisme.</p>	<p>Les définitions et expressions générales sont dissociées de celles valables uniquement pour le solide indéformable.</p> <p>Les calculs 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> <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"> <li>- déterminer les inconnues de liaison ou les efforts extérieurs spécifiés dans le cas où le mouvement est imposé ;</li> <li>- donner la loi du mouvement sous forme d'équations différentielles dans le cas où les efforts extérieurs sont connus. La résolution de ces équations différentielles 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.</li> </ul> <p>La connaissance de l'approximation gyroscopique n'est pas exigée.</p> <p>La cinématique des systèmes de solides a été abordée en première année. L'étude des chaînes des solides doit permettre, sur des exemples de mécanismes, de consolider les connaissances.</p> <p>Le schéma cinématique d'une partie opérative étant fourni, l'étudiant doit être capable de paramétrer géométriquement le système mécanique.</p> <p>L'étudiant doit être capable dans le cas d'une chaîne ouverte de conduire une étude dynamique afin de déterminer certaines composantes des torseurs transmissibles, et dans le cas d'une chaîne fermée :</p>

<p><b>2. AUTOMATIQUE</b></p> <p><b>A) Systèmes logiques séquentiels et modèle GRAFCET</b></p> <p>Mode mémorisé : actions temporisées, mémorisées, impulsionnelles, maintenues, conditionnelles, limitées dans le temps, retardées. Représentation multigraphe, synchronisation. Structure de la représentation : hiérarchie, forçage de situations, macro représentations.</p> <p><b>B) Modélisation et dynamique</b></p> <p>1) Approximation linéaire tangente au voisinage d'un point de fonctionnement : modélisation et fonction de transfert.</p> <p>2) Définition d'un système asservi : boucle de rétroaction ou «feedback».</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- de proposer ou de commenter un modèle de liaison, associé aux surfaces de contact ;</li> <li>- d'écrire les relations liant les paramètres géométriques afin de déterminer la position de chacun des solides en fonction des paramètres pilotes ;</li> <li>- d'écrire les relations de fermeture de la chaîne cinématique, de résoudre le système associé et d'en déduire le degré de mobilité et le degré d'hyperstatisme ;</li> <li>- de déterminer les conditions géométriques associées à l'hyperstatisme et de proposer une (ou des) modification(s) permettant de rendre le modèle isostatique ;</li> <li>- de proposer, en se limitant à une représentation schématique, des modifications de solutions constructives.</li> </ul> <p>La cotation fonctionnelle est hors programme.</p> <p>Les systèmes mécaniques complexes doivent être analysés à l'aide de logiciels adaptés associés à des modéleurs volumiques.</p> <p>Les compétences acquises doivent permettre, à partir de la description comportementale d'un système séquentiel selon un point de vue spécifié, de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- déterminer le temps de cycle du système ;</li> <li>- synchroniser les évolutions de certaines parties du système.</li> <li>- modifier le grafcet pour faire évoluer le comportement du système en fonction d'un besoin exprimé par le cahier des charges.</li> </ul> <p>On aborde le concept d'encapsulation uniquement par la lecture.</p> <p>On précise les liens entre les équations de la dynamique et plus largement les lois de conservation (masse, énergie,...) de la physique et les fonctions de transfert.</p> <p>La notion de causalité est abordée mais ne donne pas lieu à des développements.</p> <p>On met l'accent sur les approximations faites, leurs cohérence et domaine de validité par rapport aux objectifs.</p> <p>On privilégie l'identification à partir des courbes de réponse.</p> <p>La connaissance des transformées de Laplace des fonctions utilisées ne peut être exigée.</p> <p>On insiste sur le fait qu'un système bouclé n'est pas nécessairement asservi.</p>
---	---

<p>3) Stabilité :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- définition ;</li> <li>- équation caractéristique, pôles ;</li> <li>- cas d'une perturbation additive.</li> </ul> <p>4) Pôles dominants et réduction de l'ordre du modèle :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- principe ;</li> <li>- justification.</li> </ul>	<p>La définition de la stabilité est faite au sens : entrée bornée / sortie bornée (EB / SB).</p> <p>Le critère algébrique de ROUTH est limité aux équations caractéristiques du troisième ordre. On insiste sur le fait qu'un système perturbé conserve la même équation caractéristique dans le cas de perturbation additive.</p> <p>Les étudiants doivent être capables, à partir des pôles dominants qui déterminent la dynamique asymptotique du système, de réduire l'ordre de la fonction de transfert selon l'objectif visé.</p>
<p><b>C) Performances et contrôle</b></p> <p>1) Précision d'un système asservi :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- définition de la précision en régime permanent ;</li> <li>- précision en régime permanent pour une entrée en échelon, une entrée en rampe, une entrée en accélération.</li> </ul> <p>2) Analyse et amélioration des performances d'un système asservi :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- critères graphiques de stabilité dans les plans de Black, Bode, Nyquist ; marges de stabilité.</li> <li>- influence d'une correction proportionnelle, intégrale et à retard de phase, dérivée et à avance de phase sur la stabilité, la rapidité et la précision ;</li> <li>- réglage d'une correction P.I. et d'une correction proportionnelle à avance ou retard de phase ;</li> <li>- prise en compte d'une perturbation constante ;</li> <li>- prise en compte d'une perturbation variable.</li> </ul>	<p>L'amélioration des performances apportée par la fermeture de la boucle est illustrée.</p> <p>Il faut attirer l'attention des étudiants sur la nécessité de comparer des grandeurs homogènes, par exemple la nécessité d'adapter la sortie et sa consigne.</p> <p>Les critères graphiques sont limités au critère du revers. Le critère de Nyquist doit être présenté mais sa maîtrise n'est pas exigée. Le réglage complet d'une correction P.I.D. ne peut être exigé.</p> <p>À partir d'un système asservi, défini par sa fonction de transfert en boucle ouverte ou par une représentation fonctionnelle ou de structure, les compétences acquises doivent permettre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de justifier un modèle simple en reliant les coefficients de la fonction de transfert à certains paramètres physiques du système ;</li> <li>- d'analyser sa stabilité et sa robustesse (marges de stabilité) ;</li> <li>- de déterminer la précision en régime permanent ;</li> <li>- de vérifier la cohérence du modèle choisi avec des résultats d'expérimentation ;</li> <li>- de mener une démarche de réglage d'un correcteur pour obtenir les performances attendues.</li> </ul>
<p><b>3. ÉTUDE DES SYSTÈMES</b></p> <p><b>A) Analyse des systèmes</b></p> <p>1) Lecture de documents techniques.</p>	<p>La plupart des connaissances de ce chapitre sont abordées à l'occasion des travaux pratiques.</p> <p>Les langages géométriques sont étudiés à partir d'exemples en travaux pratiques. Ils sont développés en fonction des conventions et de la normalisation en vigueur. Les activités sont conduites dans la mesure du possible à l'aide de l'outil informatique et dans le laboratoire de</p>

<p>2) Représentation schématique de la structure des chaînes fonctionnelles (mécaniques, électriques, hydrauliques et pneumatiques) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- graphe de structure ;</li> <li>- schéma cinématique minimal, schéma d'architecture ;</li> <li>- schémas électriques, hydrauliques et pneumatiques.</li> </ul> <p>3) Méthode d'analyse des systèmes et modèles associés.</p> <p>Analyse externe :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- diagramme des interacteurs ;</li> <li>- cahier des charges fonctionnel, fonctions principales et fonctions contraintes.</li> </ul> <p>Analyse interne :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- analyse fonctionnelle : graphes et schémas, SADT, FAST, organigramme ;</li> <li>- analyse temporelle : graphes, GRAFCET, chronogramme ;</li> <li>- analyse structurelle : schémas, schémas blocs, blocs fonctionnels, SADT.</li> </ul>	<p>sciences industrielles pour l'ingénieur.</p> <p>Les représentations demandées sont limitées à l'allure générale des volumes principaux de pièces simples.</p> <p>Le codage des représentations géométrales n'est pas exigé. Donc la lecture de plans est limitée à des cas ne présentant pas de difficultés de décodage et elle est de préférence accompagnée de représentations volumiques pertinentes ou du système réel.</p> <p>Les fonctionnalités de base des modeleurs 3D sont introduites lors d'activités de travaux pratiques.</p> <p>Le schéma cinématique minimal est le schéma qui permet la description des liaisons entre les sous-ensembles cinématiquement équivalents. Un schéma d'architecture permet de calculer les actions mécaniques dans les liaisons élémentaires associées en série ou en parallèle.</p> <p>Seule la schématisation des liaisons usuelles entre deux solides est exigible (norme en vigueur).</p> <p>Les schématisations électrique, hydraulique et pneumatique ne doivent être abordées qu'au travers de l'étude de documents techniques et doivent se limiter au minimum indispensable à la conduite de l'étude proposée. Les étudiants doivent disposer en permanence d'une documentation sur la normalisation de ces schématisations.</p> <p>En présence de systèmes réels et/ou de dossiers techniques accessibles avec les prérequis du programme, des activités d'analyse, de vérification de performances et de propositions d'évolution de solutions constructives sont réalisées en travaux dirigés et en travaux pratiques.</p> <p>L'analyse externe est uniquement présentée à la lecture. Les compétences acquises doivent permettre de retrouver des informations pertinentes dans le cahier des charges fonctionnel.</p> <p>Les outils de représentation FAST et SADT restent des outils privilégiés de description fonctionnelle et structurelle.</p> <p>Les compétences acquises doivent permettre de compléter une description fonctionnelle ou structurelle limitée à deux niveaux consécutifs.</p>
--	--

**B) Vérification des performances**

Calcul des performances globales et du comportement de certains des composants :

- formulation d'hypothèses et élaboration de modèles ;
- méthodes de calculs et de simulations ;
- analyse des résultats, comparaison entre résultats de calculs et expériences.

À partir d'un dossier technique et/ou d'une réalisation existante, les compétences acquises doivent permettre de :

- s'approprier l'analyse fonctionnelle, temporelle et structurelle de la solution proposée ;
- de décrire le fonctionnement en utilisant un vocabulaire adéquat et les outils de la communication technique ;
- vérifier les performances globales et le comportement de certains composants en formulant les hypothèses nécessaires et en proposant une modélisation adaptée.

**C) Proposition d'évolution d'un système**

Proposition de solutions pour modifier un système ou le faire évoluer par rapport à un cahier des charges fonctionnel donné.

À partir d'un dossier technique et/ou d'une réalisation existante, les compétences acquises doivent permettre de proposer des modifications ou de nouvelles solutions répondant à un besoin exprimé par un cahier des charges fonctionnel.

Les solutions sont toujours présentées dans leur aspect global et à l'aide d'outils tels que schémas, schémas-blocs, croquis.