

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche

Note de service du 29 novembre 2013

relative aux repères pour la formation de sciences industrielles de l'ingénieur en classe préparatoire scientifique technologie et sciences industrielles (TSI)

NOR : ESRS1328845N

La ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche aux rectrices et recteurs d'académie ; aux chefs d'établissement ; aux professeurs des classes préparatoires aux grandes écoles de la filière scientifique,

La présente note de service a pour objet de mettre à la disposition des professeurs de sciences industrielles de l'ingénieur, en classe préparatoire scientifique technologie et sciences industrielles (TSI), des repères pour la formation de leurs étudiants.

Ces repères sont réunis dans le livret d'accompagnement du programme de sciences industrielles de l'ingénieur¹, qui figure en annexe de la présente note de service.

Pour la ministre et par délégation,

Par empêchement de la directrice générale pour l'enseignement supérieur et l'insertion professionnelle,

Le chef du service de la stratégie de l'enseignement supérieur et de l'insertion professionnelle –
DGESIP A

J.-M. JOLION

Annexe

¹ Programme publié au *Journal officiel* du 30 avril 2013, par arrêté en date du 25 mars 2013.



REPERES POUR LA FORMATION

CPGE TSI

SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGENIEUR

CLASSE PREPARATOIRE AUX GRANDES ECOLES

TECHNOLOGIE ET SCIENCES INDUSTRIELLES

2013

Document rédigé sous la responsabilité de Monsieur Claude Bergmann, Inspecteur Général de l'Education Nationale et de Monsieur Jean-Marie Roncin, ISAE-ENSMA, représentant de la Conférence des Grandes Ecoles.

Sommaire

1	Introduction.....	3
2	Finalités et objectifs de la formation.....	4
3	Organisation de l'enseignement.....	5
4	Architecture du programme.....	6
5	Limitations et orientations du programme.....	6
S1	Outils d'analyse.....	6
S11	Analyse fonctionnelle	6
S12	Impact environnemental	8
S13	Analyse structurelle	8
S2	Chaîne d'énergie.....	9
S21	Alimenter en énergie et stocker l'énergie	9
S22	Distribuer et moduler l'énergie	9
S23	Convertir l'énergie	10
S24	Transmettre l'énergie	14
S3	Chaîne d'information	14
S31	Acquérir, traiter et communiquer l'information	14
S4	Comportement des systèmes	16
S41	Solide indéformable.....	16
S42	Solide déformable	16
S43	Modélisation des systèmes multi-physiques	17

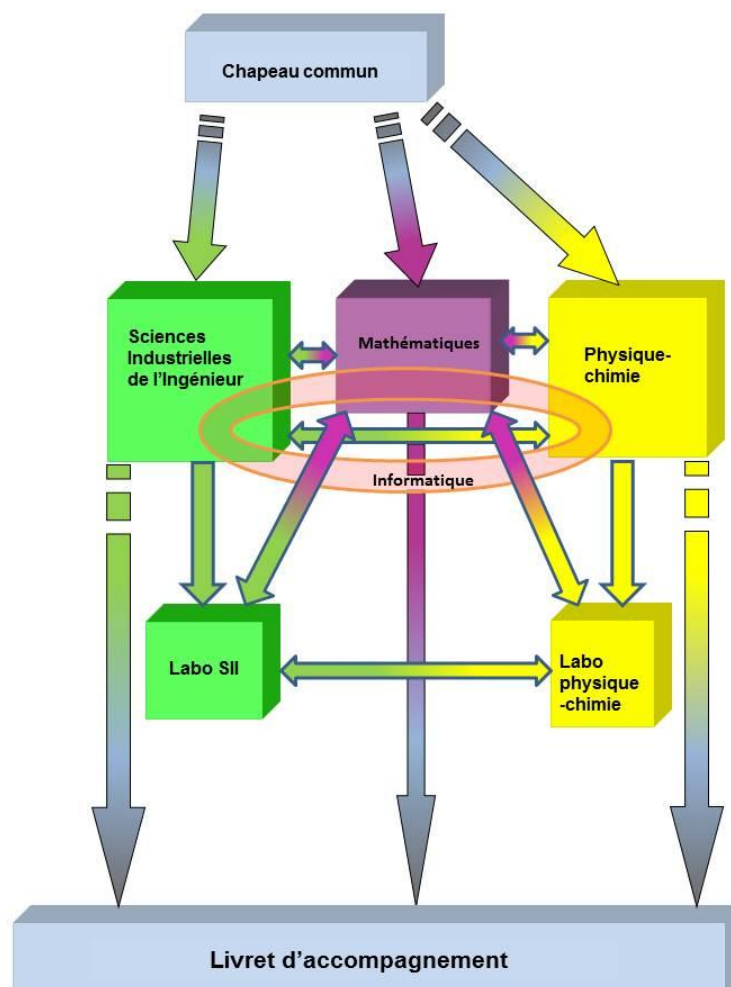
1 INTRODUCTION

La réforme de la filière technologique répond à un nouveau défi : assurer la réussite des élèves à des études supérieures longues, qui correspondent à l'évolution du niveau de qualification des emplois industriels. Pour les élèves titulaires d'un baccalauréat technologique, réussir dans l'enseignement supérieur passe par la maîtrise de compétences scientifiques et techniques indispensables à la compréhension des modèles qui relèvent des sciences fondamentales et appliquées. Dans cette nouvelle filière technologique, l'enseignement de spécialité permet aux élèves d'approfondir un domaine concret qui s'appuie fortement sur une pédagogie de projet et privilégie le travail en équipe.

En CPGE TSI, les activités de conception, de prototypage et de maquettage dans les différents domaines des sciences de l'ingénieur donnent un sens particulier aux activités liées aux compétences terminales : analyser, modéliser, résoudre, expérimenter, concevoir, réaliser et communiquer. L'organisation des enseignements scientifiques et technologiques est centrée sur les activités expérimentales, la modélisation et la résolution de problèmes. La priorité est donnée à la culture de l'analyse entre les résultats issus de la modélisation et ceux de l'expérimentation. Cette approche conjointe de l'enseignement scientifique et technologique induit une organisation qui favorise des moments de co-enseignement durant lesquels l'étudiant, en qualité de futur ingénieur, chercheur ou enseignant, trouve un sens et une réponse à ses réflexions.

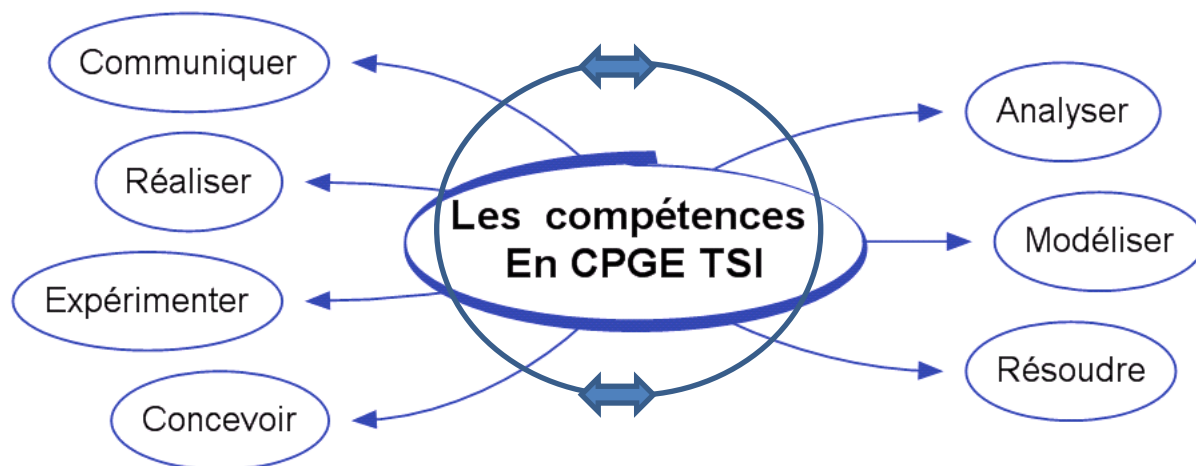
Communiquer et apprendre passent par la réalisation de tâches et les contenus culturels s'enrichissent du croisement avec les pôles de connaissances de la filière technologique, en particulier lorsque les étudiants se retrouvent dans une situation de communication dans le cadre de la conception et de la réalisation de projets.

L'écriture coordonnée des programmes de mathématiques, physique-chimie et sciences industrielles de l'ingénieur a permis de créer des liens transversaux forts entre ces différentes disciplines, qui se traduisent, entre autres, dans chaque programme, par des références aux autres programmes de la filière. La figure ci-dessous synthétise l'esprit des travaux qui ont été menés.



2 FINALITES ET OBJECTIFS DE LA FORMATION

À partir de supports industriels pluri-technologiques placés dans leur environnement technico-économique, les étudiants devront développer les compétences représentées sur la carte heuristique suivante, associées à des connaissances et savoirs faire. Ces compétences sont représentées sur la carte heuristique et sont définies ensuite.



Carte heuristique des compétences à développer en CPGE TSI

Les compétences développées en sciences industrielles de l'ingénieur forment un tout cohérent, en relation directe avec la réalité industrielle qui entoure l'élève. Couplées à la maîtrise de la démarche de l'ingénieur, elles lui permettent d'être sensibilisé aux travaux de recherche, de développement et d'innovation.

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 d'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.

Expérimenter permet d'appréhender le comportement des systèmes, de mesurer, d'évaluer et de modifier les performances. Les activités expérimentales sont au cœur de la formation et s'organisent autour de produits industriels instrumentés ou de systèmes didactisés utilisant des solutions innovantes. Elles permettent de se confronter à la complexité de la réalité industrielle, d'acquérir une culture des solutions technologiques, de formuler des hypothèses pour modéliser le réel, d'en apprécier leurs limites de validité, de développer le sens de l'observation, le goût du concret et la prise d'initiative.

Concevoir permet à l'étudiant d'imaginer un produit conforme aux exigences d'un cahier des charges en fonction de la connaissance et du respect de l'outil de production. Les modalités pédagogiques spécifiques liées à la résolution de problèmes et à la recherche documentaire sont mises en œuvre.

Communiquer permet de décrire, avec les outils de la communication technique et l'expression technologique adéquate, le fonctionnement, la structure et le comportement des systèmes.

Réaliser permet à l'étudiant des réalisations partielles à l'aide d'un prototypage rapide et d'effectuer certains contrôles de conformité au travers d'expérimentations.

3 ORGANISATION DE L'ENSEIGNEMENT

L'enseignement de sciences industrielles de l'ingénieur dans la filière TSI doit être centré sur les activités expérimentales ayant pour support les systèmes présents dans les laboratoires.

Ces activités expérimentales prennent appui sur des travaux pratiques ou des situations de résolution de problèmes et sont réalisées dans un laboratoire de Sciences de l'Ingénieur, par groupe de 15 élèves au maximum.

La formation est organisée en quatre semestres. Le semestre 1 est une période d'adaptation qui permet d'assurer un continuum de l'enseignement du tronc commun aux étudiants titulaires d'un baccalauréat STI2D et STL.

Le programme est organisé pour développer chez les élèves les compétences ci-après.

- **Analyser**
 - Identifier le besoin et appréhender les problématiques
 - Définir les frontières de l'analyse
 - Appréhender les analyses fonctionnelle et structurelle
 - Caractériser des écarts
 - Apprécier la pertinence et la validité des résultats
- **Modéliser**
 - Identifier et caractériser les grandeurs physiques
 - Proposer un modèle de connaissance et de comportement
 - Valider un modèle
- **Résoudre**
 - Proposer une démarche de résolution
 - Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution analytique
 - Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution numérique
- **Expérimenter**
 - Découvrir le fonctionnement d'un système pluri-technologique
 - Proposer et/ou justifier un protocole expérimental
 - Mettre en œuvre un protocole expérimental
- **Concevoir**
 - Imaginer des architectures et/ou des solutions technologiques
 - Choisir une solution technologique
 - Dimensionner une solution technique
- **Réaliser**
 - Réaliser et valider un prototype ou une maquette
 - Intégrer des constituants dans un prototype ou une maquette
- **Communiquer**
 - Rechercher et traiter des informations
 - Choisir les contenus et l'outil de description adapté
 - Afficher et communiquer des résultats

4 ARCHITECTURE DU PROGRAMME

Le programme est décomposé en sept compétences (représentées sur la carte heuristique) qui incluent chacune deux colonnes (connaissances et savoir-faire) et des commentaires sur les compétences. Les connaissances associées aux compétences sont détaillées dans l'annexe du programme. Les tableaux liés aux compétences n'ont pas pour objet de définir une progression pédagogique. Les connaissances associées sont réparties selon une progression organisée en quatre semestres, indiqués dans l'annexe (colonnes de droite).

Lorsqu'une connaissance et le(s) savoir-faire associé(s) sont positionnés au semestre n , cela signifie :

- qu'ils doivent être acquis en fin de semestre n ;
- qu'ils peuvent être utilisés aux semestres suivants ;
- qu'ils ont pu être introduits au cours des semestres précédents.

Les connaissances associées aux compétences sont organisées de la manière suivante :

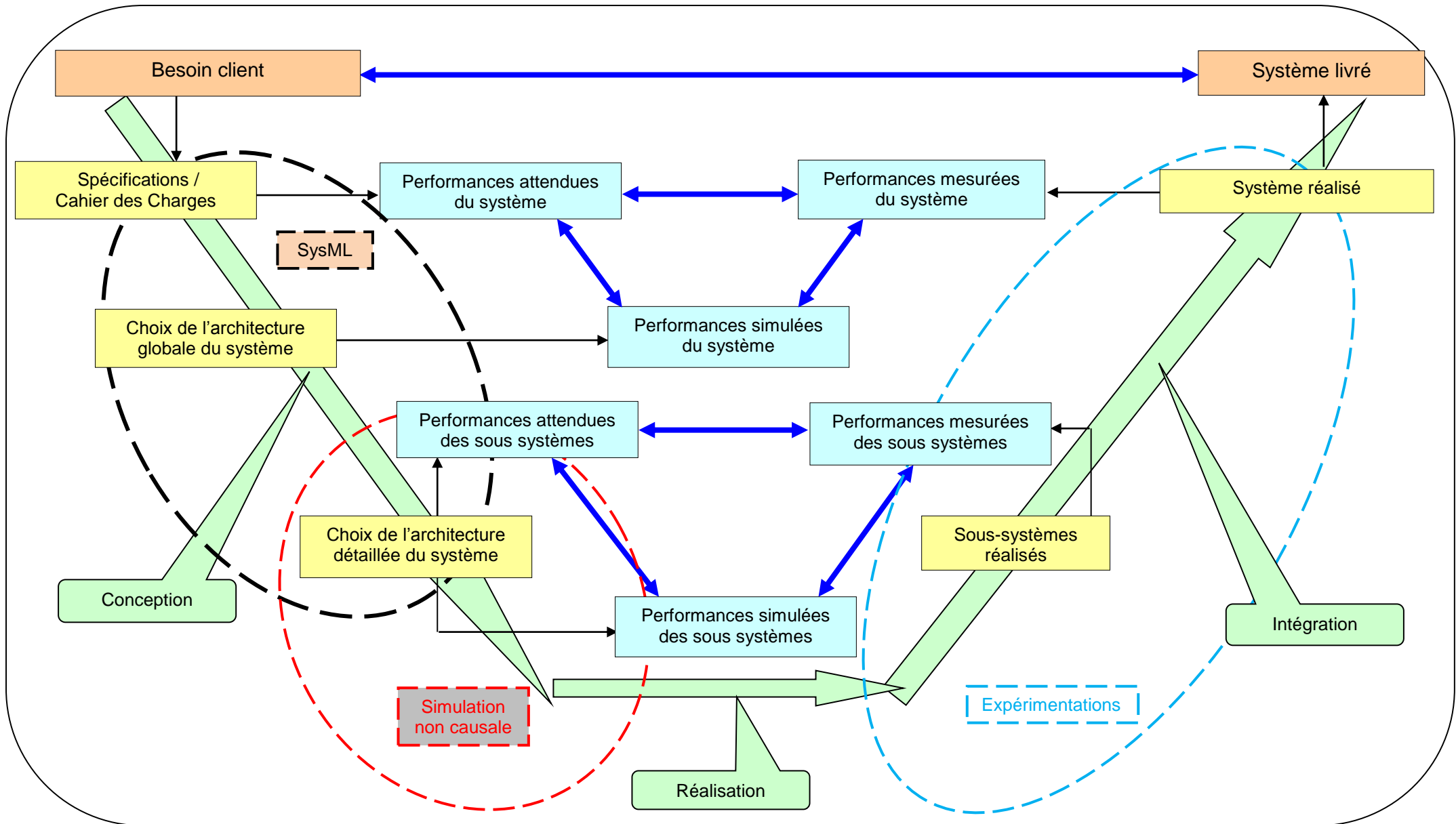
- S1 Outils d'analyse ;
- S2 Chaîne d'énergie ;
- S3 Chaîne d'information ;
- S4 Comportement des systèmes ;
- S5 Représentation des produits ;
- S6 Protocoles expérimentaux et réalisation.

5 LIMITATIONS ET ORIENTATIONS DU PROGRAMME

S1 Outils d'analyse

S11 Analyse fonctionnelle

Les contraintes économiques et environnementales nécessitent de la part des ingénieurs la connaissance et l'utilisation d'outils de conception modernes appelés Model-Based System Engineering (MBSE) ou Model-Based Design (MBD). L'approche moderne de l'ingénierie favorise la conception préliminaire de systèmes complexes basée sur la modélisation pour assurer une réalisation conforme aux exigences exprimées. L'approche MBD commence par la création de modèles exécutables utilisés et élaborés tout au long du processus. Elle peut également intégrer des entrées, des sorties attendues et un environnement du système pour permettre d'exécuter une analyse de faisabilité des exigences. Les ingénieurs vérifient que la conception respecte les exigences tout au long du processus. Il est nécessaire de simuler ce système pour des situations de vie données et obtenir ses performances pour les confronter aux exigences du cahier des charges. La réutilisation des modèles pour les différentes phases du processus permet également de renforcer l'efficacité des conceptions. Cette approche est conditionnée par l'utilisation d'un langage commun de modélisation SysML (System Modeling Language) dérivée du langage UML (langage de modélisation unifié) et d'un outil de simulation non causale.



S12 Impact environnemental

Une analyse environnementale permet de dresser un état des lieux des activités, de la réglementation applicable à ces dernières et des impacts environnementaux qu'elles induisent. La norme internationale ISO 14001 constitue un cadre définissant les règles d'intégration des préoccupations environnementales dans les activités de l'organisme afin de maîtriser les impacts sur l'environnement et ainsi concilier les impératifs de fonctionnement de l'organisme et de respect de l'environnement. Cette norme concerne les aspects environnementaux liés aux activités, produits et services de cet organisme¹.

Dans notre enseignement, il n'est pas envisagé d'appliquer la norme ISO 14001 à la mise en place d'une politique environnementale, ni à la mise en place d'une structure organisationnelle complète. En revanche, l'analyse environnementale peut inclure des actions de prévention de la pollution, une analyse des pratiques et des procédures pour élaborer, mettre en œuvre et réaliser des constituants.

L'éco-conception est la prise en compte et la réduction de l'impact sur l'environnement, dès la conception ou lors d'une reconception de produits. C'est une démarche préventive qui se caractérise par une approche globale sur tout le cycle de vie du produit, depuis l'extraction de matières premières jusqu'à son élimination en fin de vie. Tous les critères environnementaux (consommations de matières premières, d'eau et d'énergie, rejets dans l'eau et dans l'air, production de déchets, etc.) sont à prendre en compte.

L'analyse de l'impact environnemental doit être faite en fonction du périmètre retenu lors de l'élaboration du diagramme des exigences. Il faut également noter que ce périmètre aura une influence directe sur les quatre axes de l'analyse (présenté dans le paragraphe suivant) et tout au long de la conception du système.

Des logiciels adaptés permettent de quantifier l'impact environnemental sur tout ou partie du cycle de vie d'un produit.

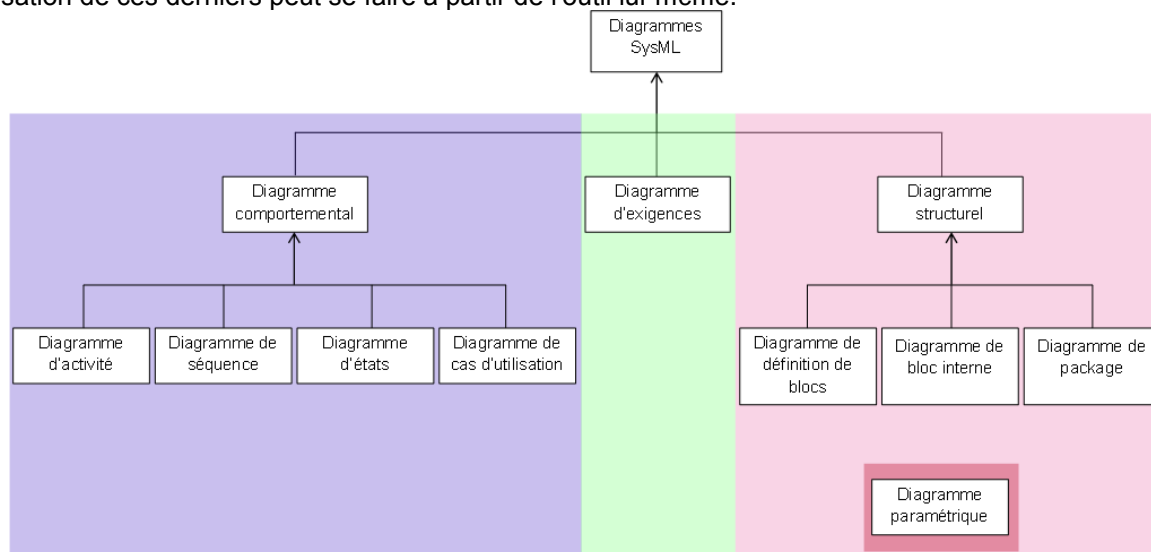
Cette partie du programme est l'occasion de montrer la nécessité des compromis vis-à-vis d'objectifs multicritères (technologiques, économiques, environnementaux, ...), notamment dans l'approche Produit-Matériau-Procédé.

S13 Analyse structurelle

L'enseignement consiste à mettre en évidence, à travers la démarche de l'ingénieur, la nécessité de recourir à des modèles pour analyser un système. La démarche de modélisation appartient à un processus plus général de conception. En répondant aux questions, *pourquoi modéliser un système ?*, *quelle frontière choisir ?*, *quelle phase du cycle de vie ?*, *quel niveau de description choisir ?*, on améliore la lisibilité du système lui-même tout en présentant une démarche et des méthodes d'analyse. Il n'est pas question d'enseigner en détail l'ensemble des outils de description ou des outils méthodologiques permettant d'analyser un système. Il s'agit de montrer par des études de cas qu'il est nécessaire de garder une vision globale et cohérente de la structure du système et surtout des interactions internes au sein de ce dernier.

Les systèmes pluri-technologiques font appel à des connaissances issues de plusieurs champs technologiques : mécanique, électrotechnique, électronique, automatique. L'analyse fonctionnelle du système permet d'identifier les principales fonctions, selon le point de vue d'un observateur, en cachant des détails trop spécifiques.

Le langage de modélisation SysML répond à cette exigence. Il est constitué d'un ensemble de neuf diagrammes. L'organisation de ces derniers peut se faire à partir de l'outil lui-même.



SysML Diagram Types – OMG- SysML –

¹ Extrait de la définition de la norme ISO 14001

L'approche d'un système pluri-technique repose sur trois axes. On distingue :

- les SPECIFICATIONS du système (modélisation des exigences) ;
- le COMPORTEMENT (modélisation du comportement, modélisation dynamique) ;
- la STRUCTURE (modélisation de l'architecture, modélisation statique).

La modélisation PARAMETRIQUE² est un sous ensemble de l'analyse structurelle (modèles de connaissances des constituants d'un système) et permet sa simulation.

L'axe de la modélisation paramétrique regroupe les paramètres clés du système et les spécifications (relations mathématiques sur ces paramètres). L'axe paramétrique sert de pivot entre la maquette fonctionnelle et la maquette système (descente des spécifications) ou entre les différents axes : les spécifications, l'analyse fonctionnelle et l'analyse structurelle. Le diagramme paramétrique permet d'effectuer une simulation physique du système, même si la géométrie n'est pas toujours prise en compte. En effet, il descend jusqu'au niveau du comportement physique du constituant et peut ainsi être considéré comme l'interface avec la simulation.

S2 Chaîne d'énergie

S21 Alimenter en énergie et stocker l'énergie

L'alimentation en énergie des systèmes pluri-technologiques est complexe et nécessite une analyse fine des dispositifs existants, en particulier l'organisation, le choix des structures et la gestion des sécurités. On met en évidence, à partir d'exemples, les différentes façons d'alimenter un système en énergie. Suivant l'utilisation, on insiste sur les différents types de sources distribuées ou embarquées.

Plus précisément, on est amené à comparer les caractéristiques des variables flux et potentiel pour les solutions électrique, pneumatique et hydraulique.

Les différentes solutions constructives sont abordées d'un point de vue externe en établissant les relations entrée/sortie. L'étudiant doit être capable d'identifier les constituants du réseau d'alimentation, d'exprimer leurs caractéristiques et d'établir les relations entrée / sortie. On se borne donc à la présentation des différents modes de production d'énergie en précisant leurs caractéristiques fonctionnelles fondamentales en vue d'obtenir les performances attendues.

Pour les solutions électriques, l'étudiant doit être capable d'effectuer des mesures et des calculs de courants, tensions, puissances (active, réactive, déformante et apparente), facteur de puissance et contenu harmonique.

Les différents appareils de mesures sont introduits : appareils analogiques, appareils numériques, analyseurs de spectre, analyseurs d'harmoniques, analyseurs d'énergie... La méthode des deux wattmètres est hors programme. L'analyse harmonique est abordée dès la première année, il s'agit ici de donner uniquement des notions.

Le transformateur parfait monophasé, en régime sinusoïdal et permanent, est étudié en physique uniquement. On insiste en sciences industrielles de l'ingénieur sur son utilisation en adaptateur de tensions, en isolateur galvanique.

S22 Distribuer et moduler l'énergie

En s'appuyant sur des systèmes réels, on met en évidence la nécessité de moduler l'énergie électrique. On insiste sur la différence fondamentale entre l'électronique de puissance, qui traite l'énergie, et l'électronique de traitement du signal, en définissant les notions de rendement et de facteur de puissance.

En partant d'un problème réel concret, l'étudiant doit être capable de choisir ou justifier un convertisseur selon les transferts énergétiques et la nature des sources de l'application. Une étude préalable permet de déterminer les régimes de fonctionnement (1, 2 ou 4 quadrants).

On commence par déterminer la nature des sources d'entrée et de sortie qui, suivant le système étudié, peuvent être indifféremment réceptrice ou génératrice d'énergie. Les différents types d'interrupteurs sont ensuite définis suivant leurs caractéristiques statiques à 2 ou 3 segments et la nature de leurs commutations à l'amorçage et au blocage, commandées ou spontanées. On définit ensuite les règles de bases d'interconnexions des sources permettant de définir les convertisseurs à liaison directe et indirecte.

Les composants de l'électronique de puissance se limitent aux composants diode (standard au silicium PN et PIN), IGBT et MOSFET qui couvrent la quasi-totalité des applications. Les caractéristiques statiques sont présentées, les domaines d'usage de chacun sont identifiés. On insiste sur la facilité de commande des composants à grille isolée.

² Permet d'exprimer des contraintes (équations) entre les valeurs de paramètres systèmes.

Le filtrage de la tension et du courant est réalisé par des composants passifs réactifs (LC) supposés sans pertes. On dimensionne ces composants selon le critère de filtrage des harmoniques. La technologie des condensateurs et des inductances n'est pas au programme.

On précise que les alimentations à découpage ainsi que le redressement commandé ne sont pas au programme. Seuls les redressements double alternance monophasé et triphasé sur charge inductive en conduction continue sont au programme. Le redressement sur capacité en tête est exclu.

Les pertes dans les convertisseurs peuvent intervenir pour le calcul du rendement. Seules les pertes par conduction sont au programme. L'étudiant doit être capable d'extraire d'une documentation technique les éléments du modèle statique équivalent d'un interrupteur afin de déterminer ses pertes. Les pertes par commutation sont hors programme sinon il serait nécessaire de modéliser le blocage et la mise en conduction qui sont estimés trop complexes à ce niveau d'enseignement. Les pertes par commutation peuvent être mises en évidence lors d'activités expérimentales ou de simulation, mais ne font pas l'objet de calculs.

Des logiciels permettent d'analyser les transitoires et de prédéterminer des résultats expérimentaux acquis lors des séances de TP.

On peut illustrer, lors d'activités expérimentales ou de simulation, l'intérêt de la conduction continue dans les convertisseurs statiques afin d'obtenir un comportement linéaire du convertisseur. La mise en évidence d'une conduction discontinue est possible, lors d'activités expérimentales ou de simulation, bien que celle-ci ne soit pas explicitement au programme, mais ne fait pas l'objet de calculs. On rappelle que l'étude des convertisseurs indirects n'est pas au programme.

S23 Convertir l'énergie

La conversion électromécanique d'énergie est explicitée par un bilan des puissances : électrique, thermique (uniquement les pertes joule), magnétique (dans l'entrefer pour le transfert stator / rotor), et enfin mécanique.

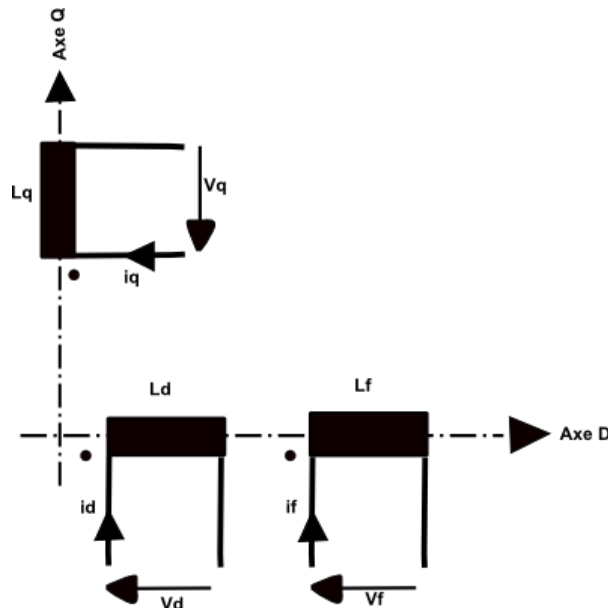
Les schémas électriques équivalents des machines sont donnés, l'étude se fait en fonctionnement linéaire. Il est nécessaire de distinguer les schémas électriques statiques utilisés pour une étude de la conversion d'énergie et les schémas électriques dynamiques utilisés pour la commande en couple des actionneurs électromécaniques.

Dans de nombreux systèmes mécatroniques, la machine à courant continu est prise comme exemple. Si le modèle comportemental est relativement simple, celui de connaissance est assez complexe. En effet, le courant i_R dans l'induit de la machine est alternatif et le rôle de l'association collecteur / balais est fondamental car il assure un couple électromagnétique constant en réglant de manière instantanée la phase du courant d'induit en fonction de la rotation de l'induit θ .

Les machines électriques synchrones et asynchrones peuvent se modéliser en vue de leur commande de la même manière. La phase des courants statoriques est réglable par la commande afin de maintenir un couple électromagnétique constant et indépendant de la vitesse de rotation.

Pour écrire les équations du modèle de connaissance, nous pouvons considérer une machine virtuelle équivalente à la machine réelle sur le plan magnétique et énergétique, et formuler une hypothèse simplificatrice concernant la répartition spatiale sinusoïdale du champ électrique dans l'entrefer. Dans ces conditions, le passage entre le référentiel lié à l'induit et le référentiel virtuel se limite à une matrice de rotation.

Nous travaillons dans un repère sous forme complexe comportant un axe direct (D) et un axe en quadrature (Q). La machine réelle comporte un enroulement d'excitation ou bien des aimants permanents qui peuvent être représentés par une bobine parcourue par un courant continu I_f lié au référentiel et fixé sur l'axe (D). Les courants d'induit virtuels continus I_d et I_q sont positionnés respectivement sur les axes (D) et (Q) comme indiqué sur la figure ci-après.



Pour la machine à courant continu, on utilise le schéma électrique statique R, E (FEM), et le schéma dynamique R, L et E (FEM).

Les équations pour une machine à excitation classique en régime statique sont :

$$U_R = R_R \cdot I_R + \theta^* M_{fr} \cdot I_f$$

$$U_f = R_f \cdot I_f$$

$$\Gamma = M_{fr} \cdot I_f \cdot I_R$$

Avec : I_R le courant d'induit, en régime permanent ;

I_f le courant inducteur en régime permanent ;

θ^* la vitesse de rotation de l'induit en régime permanent ;

R_R la résistance de l'induit ;

R_f la résistance de l'inducteur ;

M_{fr} l'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur.

Les équations pour une machine à excitation classique en régime dynamique sont :

$$U_R = R_R \cdot i_R + L_q \cdot i_R^* + \theta^* M_{fr} \cdot i_f$$

$$U_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot i_f^*$$

$$\Gamma = M_{fr} \cdot i_f \cdot i_R$$

Avec : i_R le courant d'induit, en régime variable (i_R^* est la dérivée du courant i_R) ;

i_f le courant inducteur en régime variable (i_f^* est la dérivée du courant i_f) ;

θ^* la vitesse de rotation de l'induit en régime variable ;

L_q l'inductance propre de l'induit ;

L_f l'inductance propre de l'inducteur.

Pour les machines à aimant permanent, la tension $U_f = 0$ et on posera $M_{fr} i_f = k \phi_f$ (constante).

Pour les machines synchrones, le schéma électrique statique est limité au diagramme vectoriel comprenant l'inductance propre statorique, la résistance statorique et la force contre-électromotrice induite par la rotation.

En régime dynamique, le couplage dû à la vitesse de rotation est introduit sur les axes (D) et (Q). La commande vectorielle du couple électromagnétique est étudiée.

En régime statique, les expressions s'écrivent en notation complexe avec $\bar{V} = V_d + jV_q$ et $\bar{I} = I_d + jI_q$

$$\left. \begin{aligned} V_d &= R_s I_d - L_c I_q \omega_s \\ V_q &= R_s I_q + (L_c I_d + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} I_f) \omega_s \\ v_f &= R_f I_f \end{aligned} \right\}$$

Soit en notation complexe : $\bar{V} = R_s \bar{I} + j L_c \omega_s \bar{I} + \bar{E}$ en posant $\bar{E} = j \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} I_f \omega_s$.

Avec : \bar{V} la tension complexe au stator ;
 \bar{I} le courant complexe au stator ;
 R_s la résistance statorique ;
 L_c l'inductance cyclique du stator ;
 ω_s la pulsation des grandeurs statoriques ;
 M_{fs} l'inductance mutuelle entre le stator et la roue polaire ;
 R_f la résistance de la roue polaire ;
 L_f l'inductance propre de la roue polaire.

Les équations pour la machine synchrone en régime dynamique sont :

$$\left. \begin{aligned} v_d &= R_s i_d + L_c i_d^* + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_f^* - L_c i_q \omega_s \\ v_q &= R_s i_q + L_c i_q^* + (L_c i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_f) \omega_s \\ v_f &= R_f i_f + L_f i_f^* + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_d^* \end{aligned} \right\}$$

Avec : v_d la tension statorique suivant l'axe D en régime variable ;
 v_q la tension statorique suivant l'axe Q en régime variable ;
 i_d le courant statorique suivant l'axe D en régime variable (i_d^* est la dérivée du courant i_d) ;
 i_q le courant statorique suivant l'axe Q en régime variable (i_q^* est la dérivée du courant i_q) ;
 i_f le courant de la roue polaire en régime variable (i_f^* est la dérivée du courant i_f).

Pour les machines synchrones à aimant permanent, la tension $U_f = 0$ et on posera $M_{fs} i_f = k \phi_f$ (constante).

Concernant la machine asynchrone, le programme se limite au schéma électrique statique avec les fuites électromagnétiques totalisées au rotor et la résistance statorique est négligée (schéma à 3 composants : inductance propre statorique, inductance totale de fuite ramenée au stator et résistance rotorique ramenée au stator). Seule la commande scalaire en couple est étudiée.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} - L_{cs} \omega_s I_{qs} - \frac{3}{2} M_{sr} \omega_s I_{qr} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + L_{cs} \omega_s I_{ds} + \frac{3}{2} M_{sr} \omega_s i_{dr} \\ 0 &= R_r I_{dr} - L_{cr} \omega_r I_{qr} - \frac{3}{2} M_{sr} \omega_r I_{qs} \\ 0 &= R_r I_{qr} + L_{cr} \omega_r I_{dr} + \frac{3}{2} M_{sr} \omega_r I_{ds} \end{aligned}$$

Soit en notation complexe :

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + j\omega_s L_{cs} \vec{I}_s + j\omega_s \frac{3}{2} M_{sr} \vec{I}_r$$

$$O = \frac{R_r}{g} \vec{I}_r + j\omega_s L_{cr} \vec{I}_r + j\frac{3}{2} M_{sr} \vec{I}_s$$

Avec : \vec{V}_s la tension complexe statorique en régime permanent ;

\vec{I}_s le courant complexe statorique en régime permanent ;

\vec{I}_r le courant complexe rotorique en régime permanent ;

ω_s la pulsation des grandeurs statoriques ;

g le glissement de la pulsation rotorique ;

R_s la résistance statorique ;

L_{cs} l'inductance propre du stator ;

R_r la résistance rotorique ;

L_{cr} l'inductance propre du rotor ;

M_{sr} l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor.

Le couple électromagnétique, peut s'exprimer :

$\Gamma = p \frac{3M_{sr}}{2L_{cr}} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds})$ si la commande permet d'orienter le flux tel que $\phi_{qr} = 0$, nous retrouvons une expression du couple électromagnétique analogue à celui d'une machine à courant continu :

$$\Gamma = p \frac{M}{L_{cr}} \varphi_r \cdot i_{qs} \text{ en posant } M = \frac{3}{2} M_{sr}$$

$$\varphi_r = L_{cr} \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds}$$

$$O = L_{cr} \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs}$$

La mise en place de cette commande est simple, il suffit d'imposer les courants statoriques par une comparaison avec des courants références I_{sref} calculés à partir du flux ϕ_r (à la limite de la saturation de la machine) et de la position θ_s calculée à partir de l'intégration de la somme entre la vitesse de rotation du rotor et le glissement souhaité (couple) : $\theta_s = \int (\omega_r + g \omega_s) dt$

$$I_{sref} = \frac{\Phi_r}{M} \sqrt{1 + \left(\frac{L_r}{R_r} \omega_r \right)^2} \begin{cases} \cos(\theta_s) \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

Pour toutes les machines, il est indispensable de montrer la nécessité d'une commande avec un contrôle du couple électromagnétique et non une commande en tension sans contrôle du courant absorbé par l'actionneur.

Une fois les caractéristiques mécaniques (couple / vitesse) obtenues, les différents paramètres de réglages sont introduits de façon à justifier la nature des convertisseurs à associer. Selon le cahier des charges, les quadrants de fonctionnement sont identifiés en fonction de l'application envisagée.

La nécessité de l'optimisation de l'accélération dans un système de commande est mise en évidence. L'analyse de la chaîne cinématique et la nature des charges entraînées, puis l'utilisation des théorèmes généraux de la dynamique ou de l'énergétique (par exemple pour calculer l'inertie équivalente ramenée à l'arbre moteur) y trouvent tout leur sens.

S24 Transmettre l'énergie

S241 Liaisons mécaniques

Les liaisons mécaniques sont ici abordées par leurs conditions fonctionnelles et leurs surfaces fonctionnelles (précision, tenue aux efforts, rigidité).

Des exemples sont traités au cours de TD ou d'activités expérimentales de façon à couvrir les grandes familles que sont les assemblages (démontables ou permanents), les guidages en rotation et en translation.

L'étude des montages de roulements avec précharge est à exclure mais le réglage du jeu dans les montages de roulements à contact oblique doit être abordé, en s'appuyant par exemple sur leur caractère hyperstatique.

La fonction lubrification est abordée mais le graissage centralisé n'est pas au programme.

S242 Composants mécaniques de transmission

On cherche ici à apporter une culture des solutions techniques concernant les systèmes de transmission avec et sans transformation de mouvement.

Des TD ou activités expérimentales sont l'occasion d'aborder la caractérisation cinématique de la transmission, son rendement, ses conditions fonctionnelles.

Les étudiants doivent être capables de justifier un choix constructif et de comparer plusieurs solutions technologiques.

S3 Chaîne d'information

S31 Acquérir, traiter et communiquer l'information

S311 Capteurs et détecteurs

Le domaine industriel a besoin de contrôler de très nombreux paramètres physiques (longueur, force, poids, pression, déplacement, position, vitesse, température, luminosité, ...). À chacune de ces grandeurs à mesurer peut correspondre un ou plusieurs types de capteurs fonctionnant selon un phénomène physique spécifique : variation de résistance, variation d'induction magnétique, variation capacitive, de fréquence, de flux lumineux... On prend soin cependant de se limiter aux grandeurs physiques les plus courantes.

S312 Traitement de l'information

Les structures à base d'Amplificateurs Linéaires Intégrés (ALI) sont analysées avec le modèle de l'ALI parfait.

Les fonctions de transfert ou transmittances des filtres analogiques peuvent aussi bien être exprimées en fonction de $j\omega$ ou de p . Le principe des filtres à capacités commutées n'est pas au programme, on n'exclut pas toutefois l'utilisation de fonctions intégrées spécialisées analogiques dans un circuit PSOC.

Le traitement de l'information fait appel à des solutions constructives de type matérielle et/ou logicielle qui peuvent être très complexes. Les principaux types de filtres sont décrits par leurs gabarits. L'approche de la chaîne de traitement se limite aux fonctions d'amplification, de mise en forme à seuils, de conversions A/N (CAN / CNA) et aux opérations mathématiques simples. Concernant les solutions constructives logicielles, les langages de description des algorithmes sont uniquement graphiques ou bien écrits en pseudo code. Ils introduisent des fonctions simples combinatoires, séquentielles, liées à une représentation par graphes d'états ou par organigramme.

S313 Transport et transmission de l'information

S3131 Conditionnement du signal

On souligne les avantages de la transposition des signaux en fréquence pour la transmission (adaptation du signal aux caractéristiques fréquentielles du canal de transmission, multiplexage fréquentiel, ...).

La modulation d'amplitude (AM) permet une initiation à la transmission de l'information. On se limite au principe de la multiplication du signal modulant par une porteuse, au taux de modulation m , à l'étude spectrale du signal modulé en amplitude dans le cas d'un signal modulant sinusoïdal ou quelconque à spectre borné. Pour la démodulation d'amplitude, on se limite au principe de la démodulation synchrone (oscillateur, multiplieur, filtre). La démodulation d'enveloppe n'est pas au programme.

La modulation ASK est présentée comme un sous ensemble de la modulation AM.

On caractérise la "qualité" de ce système de transmission en comparant le rapport signal sur bruit à son entrée avec le rapport à sa sortie.

S3132 Modes de transmission

Dans cette partie, on se limite à la transmission série de l'information entre deux systèmes (liaison point à point en bande de base). La notion de sens de transfert de l'information est traitée. L'utilisation d'un signal d'horloge local ou transmis est abordée. Dans le cas d'une transmission du signal d'horloge, on explicite la transmission séparée ou autoportée.

Les contraintes environnementales (bruits électromagnétiques, atténuations des supports) permettent de justifier la technologie du support de transmission (deux brins, coaxial ou fibre optique).

Les différents codages sur les niveaux et les transitions sont abordés (NRZ, NRZI pour les niveaux et Manchester pour les transitions) d'un point de vue temporel et fréquentiel de façon à dégager leurs avantages et inconvénients (les spectres sont fournis ou mesurés).

S3133 Réseaux

Les transmissions en mode série sont abordées au travers d'exemples industriels précis (liaison point à point et liaison multipoints). Pour les liaisons point à point asynchrones, on met en évidence la notion de protocole (champs de début et fin de trame pour la couche transport, incluant le bit de start et le ou les bits de stop pour la couche physique).

Pour les modes de transmission multipoints, on insiste sur les différentes topologies existantes et sur la notion d'adresse (adresse mac ou identificateur) ainsi que la notion de diffusion générale.

Les points communs fondamentaux de réseaux industriels sont mis en évidence au travers d'exemples de réseaux existants I2C, SPI, CAN, LIN, TCP/IP, Ethernet, Modbus, (support physique, trame).

La norme OSI (Open System Interconnection) est citée en montrant les écarts qui existent entre celle-ci et les principaux réseaux TCP/IP et CAN. On montrera la nécessité de découper les messages en paquets, puis d'incorporer ceux-ci dans des trames. La structure des trames est analysée afin de retrouver les notions de champ de début et de fin de trame, d'identification (adresses), de données, de contrôles d'erreurs.

La structure d'un système de détection d'erreur peut être analysée et simulée, à l'aide d'éléments algorithmiques ou logiques.

Les liaisons sans fils peuvent être utilisées lors d'activités expérimentales mais ne font pas l'objet de développement théorique.

Le multiplexage temporel peut être présenté en 4 cas d'étude différents, mettant en évidence le découpage en paquets dû à des contraintes de tailles ou de disponibilité.

Canal	Émetteur	Récepteur	Structure des données	Ordonnancement des paquets à la réception
Mono canal	Mono émetteur	Mono récepteur	Un flot de données de taille importante	Identique à celui de l'émission
Mono canal	Multi émetteur	Multi récepteur	Plusieurs flots de données de taille importante	Multiplexage temporel sur le canal Identique pour chacun des récepteurs à l'émission
Multi canal	Mono émetteur	Mono récepteur	Un flot de données de taille importante	Non respect de l'ordre d'émission
Multi canal	Multi émetteur	Multi récepteur	Plusieurs flots de données de tailles importantes	Non respect de l'ordre d'émission pour chaque flux de données

La durée de transmission induit une attente de récepteur pour ordonner et compléter les données.

Le multiplexage fréquentiel peut être présenté en 2 cas d'étude différents (la notion de paquets subsiste).

S4 Comportement des systèmes

S41 Solide indéformable

S411 Lois de mouvement

Le principe général des associations de liaisons en série ou en parallèle doit être connu mais on se limite à faire calculer des associations de 2 liaisons.

L'étude de l'agencement des liaisons et des répercussions sur le degré d'hyperstatisme est mise en relation avec la cotation fonctionnelle et les spécifications portées sur les dessins de définition des pièces.

Ainsi, on peut montrer comment il est possible de limiter les effets de l'hyperstatisme en imposant des spécifications géométriques sur les pièces. Cet aspect est abordé uniquement qualitativement.

La notion de liaison équivalente peut trouver sa justification au travers d'exemples : il s'agit de rendre un système isostatique (limitation du coût de réalisation, facilité de montage) ou de transformer des liaisons à contact linéique ou ponctuel par des liaisons à contact surfacique (limitation de la pression de contact). On montre toute l'utilité d'une étude locale de la liaison et les répercussions sur la conception de la pièce.

S412 Actions mécaniques

Pour la détermination des actions mécaniques, les études doivent se faire selon deux points de vue : local et global. Le point de vue local concerne la modélisation de l'action mécanique de contact à partir de la densité surfacique de charge. Le point de vue global, quant à lui, permet d'exprimer l'ensemble des actions mécaniques élémentaires sous forme d'un torseur.

Dans ce cadre, les liaisons, parfaites ou non, sont alors caractérisées par un torseur d'actions mécaniques transmissibles. Outre le rappel des lois fondamentales et le développement écrit des principes, les résultats d'étude peuvent être obtenus avantageusement par les outils informatiques spécifiques. L'accent est mis alors sur les hypothèses et les modèles de liaisons pour renseigner les logiciels.

On s'attache à étudier ou analyser le comportement local des liaisons. Il s'agit d'appliquer les différents modèles de répartition des charges surfaciques et de les comparer. Les études comportementales s'appuient sur les phénomènes et leurs conséquences (exemple : densité surfacique de charge, précision géométrique de la liaison, adhérence, frottement ...). Le but est de prédéterminer la géométrie de la liaison en adéquation avec le matériau et son procédé de mise en forme.

L'outil informatique doit être privilégié dans les approches dynamique et énergétique d'un problème complexe, pour éviter les calculs lourds et fastidieux, l'accent est mis sur l'exploitation des résultats (choix des grandeurs pertinentes) et sur la validation du modèle utilisé.

Dans les cas simples, la détermination des matrices d'inertie se fait au centre d'inertie à l'aide de logiciels adaptés. L'accent est mis sur l'analyse de la forme de la matrice d'inertie, la reconnaissance des termes inertiels utiles à l'étude et sur l'incidence d'une modification de forme du solide. L'élève peut être amené à déplacer une matrice d'inertie en un point différent du centre d'inertie pour résoudre le problème posé.

L'approche énergétique permet, dans le cadre du choix d'une motorisation et de sa commande, de déterminer l'inertie équivalente ramenée sur l'arbre de l'actionneur (ou la masse équivalente), de caractériser les sens de transfert d'énergie et de faire apparaître les réversibilités (quadrants de fonctionnement).

S42 Solide déformable

Dans ce chapitre, on insiste sur la notion de modèle. On s'attache à montrer les limites du modèle et à valider les hypothèses retenues dans le cadre d'un dimensionnement lors d'une démarche de conception ou dans le cadre d'une vérification.

Le modèle retenu est celui des poutres droites chargées dans leur plan de symétrie matérielle (notamment pour la flexion simple). Dans le cas d'un modèle hyperstatique d'ordre 1, la prise en compte de la résistance des matériaux permet de déterminer l'équation supplémentaire nécessaire.

Même si l'élasticité n'est pas explicitement au programme, les limites du modèle « poutre » peuvent être montrées à l'aide d'un logiciel d'éléments finis. Les notions d'élasticité sont alors abordées dans le seul but de donner du sens à l'utilisation du logiciel d'éléments finis. On peut notamment aborder les critères de Tresca et Von Mises grâce à la notion de contrainte équivalente.

Les notions de contrainte et de concentration de contraintes doivent être illustrées à partir d'utilisation de logiciel de calcul par éléments finis. Ces notions sont abordées qualitativement dans le cas de pièces de forme complexe.

Dans l'approche Produit-Matériau-Procédé, le choix du couple Matériau-Procédé est réalisé, à l'aide de logiciels adaptés, par la mise en place d'indicateurs de performance en lien avec le cahier des charges et l'analyse de diagrammes de choix de matériaux. Des critères tels que l'influence qualitative sur la géométrie des pièces, les contraintes économique et environnementale, permettent de valider le choix du tryptique Produit-Matériau-Procédé.

Le procédé d'obtention retenu pour la pièce (fonderie, injection plastique, forgeage, emboutissage et enlèvement de matière) est simulé afin de mettre en évidence la faisabilité.

À partir d'une documentation technique d'un matériau, l'élève doit être capable d'extraire les critères principaux permettant de justifier le choix.

S43 Modélisation des systèmes multi-physiques

S431 Systèmes de commande

Seul le schéma de principe d'un échantillonneur - bloqueur est explicité. La nécessité de cette fonction dans la conversion A/N de signaux à variation rapide est mise en évidence. La structure interne d'un échantillonneur - bloqueur n'est pas détaillée. Ses caractéristiques principales sont évoquées au travers d'applications industrielles en s'appuyant sur une documentation technique. Le théorème de Shannon est donné sans démonstration, simplement pour justifier le choix de la fréquence d'échantillonnage. Le phénomène de repliement de spectre est mis en évidence de manière expérimentale ou simulée.

On présente les critères de choix des convertisseurs CNA, CAN (précision, rapidité). La structure interne des convertisseurs n'est pas au programme. On se limite aux principales fonctions logiques (portes, compteur et fonction mémoire), étant entendu que celles-ci sont intégrées dans des circuits programmables et ne se présentent pas sous forme de composants discrets.

Le comportement des systèmes à événements discrets est décrit à l'aide d'outils de descriptions graphiques (algorithme, logigramme, graphe d'états). On s'appuie sur le diagramme étape / transition de la modélisation SysML.

On peut utiliser, en activités expérimentales, des langages propres aux automates, mais ceux-ci ne sont pas au programme.

S432 Systèmes asservis multi physiques

Les systèmes multi physiques sont limités aux domaines de l'électricité, de la mécanique et de la thermique.

Pour l'identification, on se limite à des modèles de comportement du premier ordre et du second ordre à pôles complexes conjugués sans retard pur. On privilégiera l'identification à partir des courbes de réponse temporelle (indicielle) et fréquentielle.

Pour la stabilité, on se limite au critère graphique du revers dans le plan de Bode. On présente les différents cas de stabilité d'un système du 2nd ordre en boucle fermée selon la position de ses pôles dans le plan complexe.

On met l'accent sur les relations entre le comportement temporel du système en boucle fermée et le comportement fréquentiel en boucle ouverte.

On attire l'attention des étudiants sur la nécessité de comparer des grandeurs homogènes, par exemple la nécessité d'adapter la sortie et sa consigne. On insiste sur la notion de perturbations et on montre l'influence d'une perturbation supposée constante sur la précision d'un système asservi.

Le choix du correcteur (nature et valeur des paramètres) est obtenu dans le domaine analogique. Lorsque sa réalisation est faite dans le domaine numérique, on discrétise l'équation différentielle décrivant le correcteur analogique afin d'obtenir l'équation de récurrence.

L'implémentation de cette équation est réalisée à partir d'un algorithme puis transférée dans le composant cible. Lors des activités expérimentales, certaines étapes du passage du correcteur analogique au correcteur numérique peuvent cependant être transparentes pour l'élève.