



## Table des matières

1EL1010 – Rayonnement et propagation.....	2
1EL1500 – Physique des Ondes .....	6
1EL2000 – Energie Electrique .....	11
1EL3000 – Génie Industriel.....	15
1EL4000 – Matériaux.....	18
1EL5000 – Mécanique des milieux continus .....	21
1EL6000 – Réseaux et Sécurité.....	24
1EL7000 – Sciences des Transferts .....	28
1EL8000 – Systèmes Electroniques .....	33
1EL9000 – Thermodynamique.....	38



---

## 1EL1010 – Rayonnement et propagation

---

**Responsables** : Dominique Lecoïnte

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

**Langues d'enseignement** : FRANCAIS

**Type de cours** : Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### **Présentation, objectifs généraux du cours**

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

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

Pour l'ingénieur du 21<sup>ème</sup> siècle, la maîtrise de la théorie

électromagnétique ne peut être ignorée. Mais, dans un environnement où les défis technologiques sont de plus en plus complexes, comment l'ingénieur aborde-t-il les problèmes, quels sont les moyens à sa disposition pour les résoudre ? Cette démarche sera le fil conducteur de ce cours

d'électromagnétisme. Partant d'applications variées et concrètes, ce cours présente la démarche d'un ingénieur pour passer d'une scène réelle à la mise en équations sous forme d'un problème électromagnétique, puis le passage à la résolution par utilisation le plus souvent d'outils numériques spécialisés.

Les problèmes présentés et leurs formulations théoriques couvriront un large spectre de fréquences : du continu, en passant par les radiofréquences et micro-ondes jusqu'à l'optique. L'accent sera mis sur les différents types de problèmes, en particulier, la propagation libre et guidée et le rayonnement.

Les petites classes permettront une mise en pratique sur des problèmes très variés : propagation libre et interférences, propagation guidée et fibre optique, rayonnement et antennes... L'essor des outils numériques a radicalement transformé la méthodologie de résolution des problèmes électromagnétiques. Plusieurs petites classes utiliseront un logiciel électromagnétique industriel afin d'illustrer la démarche actuelle d'un ingénieur pour la résolution des problèmes électromagnétiques.



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

SG1 et SG3

### Prérequis

Aucun

### Plan détaillé du cours (contenu)

#### 1. Introduction

Présence de l'électromagnétisme dans de nombreux secteurs industriels  
diversité des applications de l'électromagnétisme

importance de la simulation numérique - état de l'art pour les outils numériques

contenu du cours et liens entre les parties - situation du cours dans l'ensemble du cursus

#### 2. Mise en équations d'un problème électromagnétique : les 3 piliers de la scène réelle à la mise en équation : phase de modélisation étude en temporel ou en régime harmonique

premier pilier : équations de Maxwell cas général

deuxième pilier : équations constitutives des milieux - modèles les plus classiques - linéarité, homogénéité, isotropie, dispersion

troisième pilier : équations de passage d'un milieu à un autre - écriture selon le choix des modèles de milieu

lien avec les outils numériques (exemple CST)

Application : TD numérique : CST présentation et prise en main

#### 3. Synthèse : les différents types de problèmes : objectif, hypothèses associées et simplification, applications emblématiques

états quasi-stationnaires

propagation

rayonnement

diffraction

#### 4. Propagation libre

onde plane

polarisation d'une onde plane

exemple d'une autre solution - faisceaux gaussiens

propagation en milieu conducteur - épaisseur de peau

transmission d'une onde d'un milieu à un autre

application : TD : duplexeur

application : TD : polarimétrie

#### 5. Propagation guidée : théorie des guides

approche physique des modes à travers le guide à lames parallèles

développement théorique - mode TE, TM, TEM

exemple du guide rectangulaire

exemple du guide coaxial

application : TD : fibre optique

Application : TD numérique : transition ligne coaxiale - guide rectangulaire



6. Propagation guidée : théorie des lignes  
du mode TEM vers la théorie des lignes  
théorie des lignes  
adaptation  
application : TD : réalisation d'un circuit d'adaptation pour ligne micro-  
ruban

7. Rayonnement et antennes  
champ rayonné - champ lointain  
technologie des antennes  
caractéristiques des antennes (approche expérimentale) - diagramme de  
rayonnement gain et directivité - impédance d'entrée  
bilan de liaison  
application : TD : antenne  
application : TD numérique : réalisation d'une antenne Yagi

### **Déroulement, organisation du cours**

11 cours de 1h30, 5 TD de 1h30, 3 TD Numériques de 1h30 et 1 contrôle  
final écrit de 2h00.

Toutes les occurrences sont présentées en langue française.

### **Organisation de l'évaluation**

1 contrôle final écrit sans documents de 2h00

Les acquis en compétence seront validés durant le contrôle final. Des  
questions identifiées permettront de valider les jalons 1 des compétences C1  
et C2. Au minimum, deux questions par compétence. L'élève ayant obtenu  
la moyenne sur les questions associées à la compétence évaluée validera le  
jalon 1.

### **Support de cours, bibliographie**

Polycopié de cours et d'exercices.

Planches projetées durant le cours (EDUNAO)

Techniques micro-ondes de Marc Hélier, édition Ellipses

### **Moyens**

Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) :

Dominique Lecointe, Dominique Picard

Taille des TD (par défaut 25 élèves) : En général, 2 groupes en TD  
numérique alternent avec 2 groupes en TD traditionnel.

Outils logiciels et nombre de licences nécessaires : logiciel MWS. Licence  
éducation obtenue de la part du fournisseur.

Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Salles informatiques (2  
salles informatique de 25 postes) pour les TD numériques



### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

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

- mettre en équations un problème réaliste par le choix de modèles plus ou moins complexes.
- juger la pertinence des modèles et leurs limitations.
- choisir une méthodologie de résolution incluant des outils de simulation modernes.
- maîtriser, de la théorie à la pratique, les structures des ondes électromagnétiques se propageant dans un milieu donné.
- maîtriser, de la théorie à la pratique, les systèmes permettant la propagation d'un signal électromagnétique.
- maîtriser, de la théorie à la pratique, les systèmes rayonnant un signal électromagnétique.

Ces différents acquis d'apprentissage permettent de valider le jalon 1 de la compétence C1.2 (Savoir utiliser un modèle présenté en cours de manière pertinente (modèle décrivant un phénomène, sans couplages). Faire le choix d'hypothèses simplificatrices adaptées au problème étudié.).

### **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

Les différents acquis d'apprentissage permettent de valider le jalon 1 de la compétence C1.2 (Savoir utiliser un modèle présenté en cours de manière pertinente (modèle décrivant un phénomène, sans couplages). Faire le choix d'hypothèses simplificatrices adaptées au problème étudié.).

Également, les différents acquis d'apprentissage permettent de valider le jalon 1 de la compétence C2.1 (savoir délimiter la notion d'un domaine scientifique)



---

## 1EL1500 – Physique des Ondes

---

**Responsables** : Mohammed Serhir  
**Département de rattachement** : DÉPARTEMENT PHYSIQUE  
**Langues d'enseignement** : FRANCAIS, ANGLAIS  
**Type de cours** : Cours de Sciences pour l'ingénieur  
**Campus où le cours est proposé** : CAMPUS DE PARIS - SACLAY  
**Nombre d'heures d'études élèves (HEE)** : 60  
**Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE)** : 30,50

---

### **Présentation, objectifs généraux du cours**

Ce cours fournit les éléments de base nécessaires à l'ensemble des disciplines qui utilisent des ondes : sismologie, télécommunication, télédétection (radar, sonar...), techniques d'imagerie, photonique, ... en s'appuyant sur les cas de l'électromagnétisme et de l'acoustique.

Objectif : maîtrise de l'analyse de Fourier, des concepts d'onde et de leurs applications dans différents domaines :

- 1) filtrage spatial, comme le montage 4f en optique de Fourier, pour le traitement des images
- 2) les approximations simplificatrices adaptées en fonction de la longueur d'onde, la taille du système et la distance à laquelle le phénomène est observé : diffraction et rayonnement
- 3) directivité d'une antenne.
- 4) Comportement d'un milieu (transparent, absorbant ou opaque) en fonction de ses propriétés diélectriques ou optiques.
- 5) Calcul des coefficients de réflexion et de transmission d'une onde à travers une interface.

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

SG1 et SG3

### **Prérequis**

- Optique géométrique (lentille convergente)
- Électrostatique, Magnétostatique
- Équations de Maxwell dans le vide
- Onde plane électromagnétique
- Décomposition d'une fonction périodique en série de Fourier
- Équations aux dérivées partielles (Laplace, d'Alembert)

### **Plan détaillé du cours (contenu)**

#### **1-Introduction**

Expliquer le contenu du cours et le fil conducteur entre les parties. Situer le



cours dans l'ensemble du cursus (présenter les enseignements où ce cours sera utile). Préliminaires mathématiques : Transformée de Fourier, distribution de Dirac

## **2-Principes de base de l'imagerie, Développement en ondes planes**

Propagation : champ proche, champ lointain, ondes évanescentes, diffraction et auto-diffraction d'une onde, limite de résolution

TD1 : Propagation et diffraction, dimensionnement satellite, mesure distance Terre-Lune

TD2 : Traitement optique des images

## **3-Sources d'ondes**

Potentiel retardé, approximation en champ lointain, approximation dipolaire

TD3 : Rayonnement par une antenne filaire et par un réseau d'antennes, lobes d'émission

## **4-Rayonnement**

Champ rayonné : structure locale d'onde plane. Puissance rayonnée

TD4 : Rayonnement par une antenne de téléphonie mobile (antenne dipolaire magnétique)

## **5-Diffusion, diffraction par un réseau périodique**

Introduction à la diffusion par un ou plusieurs diffuseurs ordonnés.

Diffraction de Bragg

TD5 : Diffusion/Diffraction de la lumière par un cristal photonique simplifié

## **6-Équations de Maxwell dans la matière, du microscopique au macroscopique**

Établissement des équations de Maxwell valables pour tout milieu : passage à la moyenne pour l'établissement des équations de Maxwell macroscopiques

TD6 : Constante diélectrique, atténuation et bilan d'énergie d'une onde dans un milieu absorbant

## **7-Relations constitutives, équations de Maxwell généralisée, propagation libre dans la matière**

Constante diélectrique généralisée. Notions d'homogénéité, linéarité, isotropie, dispersion. Liens entre dispersion et inertie. Définition de l'indice optique. Signification des parties réelle et imaginaire de l'indice et de la constante diélectrique. Bilan d'énergie. Définition des milieux transparents, opaques et absorbants

TD7 : Couches minces : traitements antireflets. Microscope à onde évanescente

## **8-Relations de continuité. Réflexion, réfraction**

Lois de Snell Descartes. Réflexion et réfraction d'une onde TE ou TM.

Angle de Brewster



TD8 : Guide d'ondes diélectrique : application à la fibre optique  
TD9 : Milieu non-linéaire : génération de second harmonique  
TD10 : Diffusion Brillouin : couplage entre onde acoustique et onde électromagnétique

### **9-Milieu à indice négatif – Métamatériau**

Propagation dans un matériau double-négatif : lentille parfaite, invisibilité

#### **Déroulement, organisation du cours**

9 séances de cours magistral en Amphi

10 séances de travaux dirigés en groupe de 33 élèves

Dans le cas de l'occurrence en anglais le cours magistral est enseigné en anglais, en revanche une seule salle de TD où l'enseignement est assuré en anglais (dans les trois autres salles de TD l'enseignement est assuré en français ).

L'occurrence 1.2 sera enseigné en anglais et l'occurrence 1.4 sera enseigné en français

#### **Déroulement des séances :**

- 1 CM1
- 2 CM2
- 3 TD1
- 4 CM3
- 5 TD2
- 6 CM4 (test 1)
- 7 TD3
- 8 CM5
- 9 TD4
- 10 CM6
- 11 TD5
- 12 CM7 (test 2)
- 13 TD6
- 14 CM8
- 15 TD7
- 16 TD8
- 17 TD9
- 18 CM9 (test 3)
- 19 TD10
- 20 Examen final

#### **Organisation de l'évaluation**

Contrôle continu (QCM) sans documents : Test 1 de 15 min à la séance 6 pendant le CM4. Test 2 de 15 min à la séance 12 pendant le CM7. Test 3 de 15 min à la séance 18 pendant le CM9. Contrôle final (examen écrit) de 2 heures avec documents (65%).



Chaque contrôle continu (QCM) compte avec une pondération 0.35/3 de la note, le contrôle final comptant avec une pondération de 0,65

La compétence C.1 est évaluée à travers un exercice parmi les exercices du contrôle final. Si la note brute à cet exercice est supérieure à 50%, l'élève aura validé la compétence C.1 dans le cadre de ce cours.

La compétence C.2 est validée si la note de la session est supérieure à 10/20

### **Support de cours, bibliographie**

Polycopiés de cours et d'exercices avec corrigés.

### **Moyens**

**Equipe enseignante** : Hichem Dammak, Pierre-Eymeric Janolin, Bruno Palpant, Thomas Antoni, Charles Paillard, Nicolas Mallick, Mohammed Serhir, Gaëlle Vitali-Derrien, Romain Pierrat (vacataire), Aurélie Bonnefois (vacataire)

**Taille des TD** (par défaut 35 élèves) : 4 salles de TD de 30 élèves.

**Outils logiciels** et nombre de licences nécessaires : Python installé sur les PC des élèves

**Salles de TP** (département et capacité d'accueil) : Non

### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

- 1) **Appliquer** les méthodes de filtrages spatial, comme le montage 4f en optique de Fourier, pour le traitement des images
- 2) **Appliquer** les approximations simplificatrices adaptées en fonction de la longueur d'onde, la taille du système et la distance à laquelle le phénomène est observé : diffraction d'une onde ou rayonnement d'une antenne
- 3) **Déterminer** la zone de rayonnement et la directivité d'une antenne.
- 4) **Décrire** si un milieu est transparent, absorbant ou opaque à partir de ses propriétés diélectriques ou optiques.
- 5) **Appliquer** les conditions aux limites pour un système présentant une ou plusieurs interfaces.
- 6) **Calculer** les coefficients de réflexion et de transmission d'une onde à travers une interface.

### **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

C1.1 : Analyser les aspects scientifiques du comportement global d'un système à envergure limitée (par exemple partie isolée d'un système complexe), incluant l'identification des facteurs qui influencent son comportement (**diffraction, diffusion, réflexion, transmission, absorption, interférences**)

C1.2 : Utiliser correctement un modèle présenté en cours, dans ses conditions de validité (modèle décrivant un phénomène, sans couplages) (**approximations champs lointain, approximation dipolaire, approximation onde plane, optique de Fourier/traitement d'images, réseau d'antennes, diffusion par un réseau périodique, couche anti-reflet, diffusion Brillouin**)



C1.3 : Confronter les résultats d'une simulation à des mesures expérimentales ou aux résultats de calcul approximatifs en tenant compte des erreurs de mesure, des approximations du modèle ou des incertitudes, à partir de la connaissance des ordres de grandeur.

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



---

## 1EL2000 – Energie Electrique

---

**Responsables** : Martin Hennebel

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

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

**Type de cours** : Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### **Présentation, objectifs généraux du cours**

L'énergie électrique est indispensable au fonctionnement et au développement de la société dans toutes les régions du globe. Les progrès continus depuis plus de cent ans ont permis d'intégrer son usage dans de nouveaux secteurs d'activité (transports terrestre, maritime ou aérien, systèmes embarqués, énergies renouvelables, spatial). Aujourd'hui, les objectifs de respect de l'environnement et du développement durable sont aussi des moteurs de l'amélioration des technologies associées à cette énergie et favorisent son déploiement à différents niveaux de puissance. Le cours d'énergie électrique se propose de donner les méthodes et les outils fondamentaux pour l'analyse des systèmes utilisant l'électricité en tant que vecteur énergétique. Il associe la connaissance de la physique à celle des matériaux magnétiques pour caractériser les éléments constituant les systèmes d'énergie électrique.

Dans un premier temps, le cours précise les enjeux de l'énergie électrique pour le fonctionnement de la société et présente les principaux acteurs. Il montre aussi ses nombreuses interactions avec les différentes disciplines scientifiques.

Il présente ensuite les grandeurs principales, les concepts et les outils nécessaires à l'analyse des systèmes d'énergie électrique et donne des exemples d'application.

Il met l'accent sur le comportement des couplages magnétiques en utilisant l'application de l'électromagnétisme au cas des éléments utilisant des matériaux magnétiques. Le comportement de ces matériaux est analysé pour en établir une modélisation énergétique et préciser les performances selon l'amplitude d'excitation ou la fréquence. La représentation de type circuit magnétique est employée pour le passage de la physique des éléments à leurs modèles.

L'application naturelle de cette partie est l'étude des transformateurs et des systèmes de couplages par induction.

Ensuite, la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique est formalisée par le principe des travaux virtuels basé sur les énergie et



coénergie magnétiques pour exprimer les forces et couple produits par les actionneurs et les générateurs.

Une application de la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique est proposée avec l'étude de la motorisation à courant continu qui permet de poser les bases de fonctionnement des systèmes de motorisation ou de génération en variation de vitesse.

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

SG1 et SG3

### **Prérequis**

Aucun

### **Plan détaillé du cours (contenu)**

Introduction à l'électrotechnique

Omniprésence de l'électrotechnique : production, transport, conversion, utilisation et contrôle de l'énergie électrique. Caractère multi-physique et aspects économiques.

Transport et utilisation de l'énergie électrique

Monophasé, triphasé, définition et calcul des puissances. Dimensionnement et facteur de puissance.

Bases de la physique pour l'électrotechnique

Électromagnétisme appliqué à l'électrotechnique. Matériaux magnétiques, création et canalisation du champ, aimants permanents. Méthodes de modélisation, circuit magnétique, réluctance, FMM. Prise en compte des pertes de puissance dans les circuits magnétiques.

Principes des couplages magnétiques

Notions de flux commun et de flux de fuites. Inductances de fuites partielles et inductances de fuites totales. Modélisation du couplage magnétique.

Transformateurs monophasé et triphasé : fonction et structure ;

transformateur parfait ; modélisation du transformateur réel, mise en œuvre à 50 Hz et influence de la fréquence variable ; réalisation : circuit magnétique, isolants, conducteurs.

Conversion électromécanique

Lien entre énergies électrique, magnétique, et mécanique. Système à partie mobile ; calcul des forces et des couples ; couple de réluctance.

Machine à courant continu

Principe et réalisation. Équations fondamentales. Modes d'excitation.

Problèmes de fonctionnement. Principes de la commande en variation de vitesse. Moteur DC Brushless

### **Déroulement, organisation du cours**

Cours Magistraux (CM), travaux dirigés (TD). Pendant la durée des travaux de rénovation du bâtiment Bréguet, des séances de travaux pratiques (TP) seront organisées en fonction de la disponibilité des installations. En raison des capacités d'accueil du laboratoire de travaux pratiques, les TD se déroulent en parallèle des TP.



En conditions de fonctionnement nominales, les activités se répartissent comme suit :

CM 13h30

TD 9h

TP 6h

### **Organisation de l'évaluation**

L'évaluation se fera par un examen écrit de 2h. Les TPs seront pris en compte dans la note finale du module pour 20%. L'absence à un TP donnera la note 0/20 au TP.

Les TP sont des évaluations obligatoires

### **Support de cours, bibliographie**

Polycopié fourni par l'équipe enseignante

Electrical Machines, Drives and Power Systems (Theodore Wildi, Prentice-Hall Intl)

### **Moyens**

- Equipe enseignante : Martin Hennebel - Michael Kirkpatrick - Romaric Landfried – Mohamed Bensetti

- Taille des TD : 25

- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire :

- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : Département Systèmes d'Énergie Électrique

L'occurrence 1.1 est enseignée en anglais, les occurrences 1.2, 1.3 et 1.4 sont enseignées en français.

### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

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

- Modéliser les dispositifs et matériels électriques basés sur le couplage magnétique

- Faire le choix d'un modèle de comportement adapté (forme intégrale des équations de Maxwell, schéma équivalent de type circuit ...)
- Identifier les paramètres de ce modèle à l'aide de données expérimentales et/ou des propriétés géométriques et physiques
- Valider la qualité du modèle

- Prédéfinir un système de transmission d'énergie à courant alternatif (triphase) avec ses principaux éléments

- Analyser et évaluer une motorisation à base d'actionneurs à courant continu ou alternatif

- Analyser le comportement électrique, magnétique et mécanique de l'actionneur



- Comparer au comportement nominal
- Évaluer les performances et critiquer les résultats obtenus

### **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

Ce cours permet de valider le jalon 1 des compétences C1 et C2 :

Le cours, et notamment les séances de travaux pratiques, permettent de développer la compétence C1, c'est à dire l'analyse, la modélisation et la résolution, ainsi que la conception de systèmes complexes. Ces compétences s'appliquent aux systèmes de puissances triphasés, aux systèmes magnétiques (transformateurs, aimants) et aux systèmes d'actionnement électromécaniques (actionneurs, moteurs).

Ce cours permet de développer une compétence approfondie dans le domaine de l'ingénierie des systèmes de puissance électrique, qui correspond au jalon 1 de la compétence C2.



---

## 1EL3000 – Génie Industriel

---

**Responsables** : Ludovic-Alexandre VIDAL

**Département de rattachement** : DÉPARTEMENT GÉNIE INDUSTRIEL ET OPÉRATIONS

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

**Type de cours** : Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### **Présentation, objectifs généraux du cours**

- Sensibiliser les élèves de 1ère année aux problématiques de l'entreprise, des organisations et des produits, et leur importance dans la société, l'économie et l'innovation.
- Les ouvrir au caractère pluridisciplinaire du monde de l'entreprise et de la conception de produits et de services, et leur faire prendre conscience des verrous scientifiques et technologiques autour des processus de l'entreprise (processus d'innovation, de conception, de production, de supply chain, de logistique,...).
- Montrer que le choix d'une stratégie de développement d'un produit, d'un service ou d'une organisation résulte d'un compromis dans un ensemble de contraintes : disponibilité des ressources et des compétences, concurrence, cycle de vie, impact environnemental, stratégie et culture d'entreprise...).
- Faire maîtriser les concepts et modèles fondamentaux (et leur application à travers quelques exemples) qui capturent l'essentiel du génie industriel des processus, ainsi que les outils associés qui permettent d'appréhender ces phénomènes, et donner l'envie d'approfondir dans des cours plus approfondis par la suite.

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

SG1 et SG3

### **Prérequis**

Aucun

### **Plan détaillé du cours (contenu)**

Le cours permet d'aborder les concepts fondamentaux du génie industriel. Les différents chapitres du cours permettent aux étudiants d'appréhender l'ensemble du cycle de vie des produits et services auxquels seront confrontés nos futurs ingénieurs.

Couplés aux acquis de chaque TD (dans un ratio 1h de cours pour 2h de TD environ), les enseignements permettront aux élèves de comprendre en profondeur les systèmes industriels ou organisationnels, leurs enjeux et leurs interdépendances tout au long du cycle de vie.



Séance 1 (Introduction 1h30) : Cycle de Vie d'un Produit / d'une Organisation  
Concept de cycle de vie d'un produit / d'une organisation, Parties prenantes et Valeurs, Approche systémique, Grandes Phases et Processus.

Séances 2&3 : Processus de Conception - Processus de conception, Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle, Cahier des Charges Fonctionnel, Conception à coût objectif/coût total, Analyse du Cycle de Vie (ACV), Cycle en V, Bloc-Diagramme, Flexibilité de la conception, AMDEC Produit.

Séances 4&5 : Processus de Production - Approches Make-to-Order, MRP, Modèles mathématiques élémentaires associés, Flux poussés par l'amont, Approches Make-to-Stock, Kanban, Modèles mathématiques élémentaires associés, Flux tirés par l'aval.

Séances 6&7 : Processus de Logistique - Enjeux de la chaîne logistique, Pilotage des flux, Dimensions de la performance logistique, Niveaux de stock, Taux de service, DRP, Entrepôts et cross-docking, Livraisons et tournée de véhicules, Fonction Achat, Durabilité de la Supply Chain, Traçabilité.

Séance 8&9 : Processus de Maîtrise de la Qualité Produit Notion de fiabilités produit, Lois de Survie, Paramètres de sûreté de fonctionnement (taux de défaillance), Courbe en baignoire, Montages de composants en Parallèle ou Série. Maintenabilité et disponibilité, Introduction à la Maîtrise Statistique des Processus. Introduction au 6 Sigma. Cartes de contrôles de la moyenne et de l'étendue. Mesures de capacité machine.

Séance 10 : Conférence Industrielle (3h) Synthèse de l'ensemble du cycle de vie produit / organisation et des grands processus au travers d'un cas réel.

Séance 11 : Contrôle (2h) Contrôle final.

### **Déroulement, organisation du cours**

Certaines des séances seront réalisées en mode pédagogie inversée pour les cours magistraux (libérant des heures présentes pour favoriser un apprentissage proactif et flexible des concepts), suivis de TD en présentiel pour répondre aux questions éventuelles avant d'aborder les sujets de TD.

Les occurrences de ce cours seront enseignées dans les langues suivantes

Occurrence 1.1. Anglais

Occurrence 1.2. Français

Occurrence 1.4. Français

### **Organisation de l'évaluation**

2 contrôles continus auront lieu pendant le cours.

Contrôle écrit de 2h pour chaque session initiale.

Examen avec document et calculatrice, mais sans ordinateur ni connexion internet.

La note de contrôles continus (intermédiaires) vaudra pour 40% (20% chaque contrôle continu) et celle du contrôle final pour 60%.



## **Support de cours, bibliographie**

Donnée au fur et à mesure du cours par séance (références spécifiques).

## **Moyens**

Equipe enseignante : Ludovic-Alexandre Vidal et Julie Le Cardinal pour les cours magistraux. Loïc Pineau, Ludovic-Alexandre Vidal & Julie Le Cardinal pour exercices et études de cas. Quelques conférenciers industriels.

## **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

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

- C1.1 Analyser : Étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.
- C1.2 Modéliser : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
- C1.4 Concevoir : Spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe
- C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique (adapté au Génie Industriel)

## **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

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

- C1.1 Analyser : Étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.
- C1.2 Modéliser : Utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes
- C1.4 Concevoir : Spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe
- C2.1 Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique (adapté au Génie Industriel)



---

## 1EL4000 – Matériaux

---

**Responsables :** Véronique Aubin

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

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

**Type de cours :** Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### Présentation, objectifs généraux du cours

- Sensibiliser les élèves de 1ère année aux problématiques matériaux et à leur importance dans la société, l'économie et l'innovation
- Les ouvrir au caractère pluridisciplinaire du monde des matériaux et leur faire prendre conscience des verrous scientifiques et technologiques autour des matériaux (e.g. aéronautique, pile à combustible, ITER, électronique au-delà de la loi de Moore, récupération et transformation de l'énergie, matériaux pour la santé, biomatériaux, MEMS-NEMS,...)
- Donner aux élèves la capacité à lire des documents scientifiques et techniques sur n'importe quel matériau, savoir en extraire les caractéristiques importantes pour une application ciblée, et interpréter ces éléments en lien avec les caractéristiques structurales, physiques et mécaniques du matériau
- Montrer que le choix d'un matériau résulte d'un compromis dans un ensemble de contraintes : disponibilité des ressources, procédés d'élaboration, propriétés d'usage, cycle de vie, impact environnemental et coût
- Faire comprendre les phénomènes physiques à l'origine des propriétés des matériaux, proposer, à travers quelques exemples, des modèles simples qui capturent l'essentiel de la physique des phénomènes et des outils qui permettent d'appréhender ces phénomènes, et donner l'envie d'approfondir dans des cours plus fondamentaux par la suite

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

SG1 et SG3

### Prérequis

Aucun

### Plan détaillé du cours (contenu)



- Introduction : importance actuelle des matériaux, défis associés aux matériaux dans les grands enjeux de société, prise en compte des contraintes liées au développement durable
- Introduction aux grandes familles de matériaux : définition à partir de la nature de la liaison chimique, propriétés résultantes et d'usage, initiation au choix des matériaux
- Structures et transformations de phase des matériaux :
  - o Notions d'ordre-désordre : du cristal à l'amorphe via les polymères et les cristaux liquides et comment décrire et mesurer l'ordre et le désordre
  - o Défauts (0D à 3D) : rôle crucial du défaut dans les matériaux, illustration par différents couples défaut/propriété
  - o Equilibres thermodynamiques et diagrammes de phases, leur rôle en élaboration des matériaux
- Propriétés des matériaux :
  - o Propriétés mécaniques en lien avec la structure : mécanismes de déformation plastique
  - o Propriétés fonctionnelles en lien avec la structure : conduction thermique et électrique, ferroélectricité, magnétisme, optique

### **Déroulement, organisation du cours**

(1 séance = 3 heures d'enseignement) sauf la séance 1 de 1h30 et la séance 12 qui sera de 2 heures

- Séances 1 : cours
- Séances 2 à 9 : cours + TD
- Séance 10 : 3h de bureau d'étude
- Séance 11 : examen

### **Organisation de l'évaluation**

Contrôle continu pendant le cours (25% de la note finale) par QCM

Evaluation obligatoire :

- Document de synthèse sur un matériau et son application produit à l'issue de la séance de bureau d'étude (évaluation obligatoire) : 25% de la note finale.
- Examen écrit final de 2h : 50 % de la note finale

La compétence C1 est validée si l'étudiant obtient une note supérieure à 12 à l'examen final ou au BE. La compétence C2 est validée quand le cours est validé (note globale à l'UE >10).

### **Support de cours, bibliographie**

Matériaux de M. Ashby et D. Jones, Physique de l'état solide de C. Kittel, Des Matériaux de Dorlot et Baïlon



### **Moyens**

- Equipe enseignante : Véronique Aubin, Brahim Dkhil, Camille Gandiolle, Jan Neggers, Elsa Vennat
- Taille des TD : 35 élèves
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaires : CES Edupack de 100 licences
- Salles de TP : salles informatiques

Les occurrences 1.1 et 1.3 sont données en français, l'occurrence 1.4 en anglais.

### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

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

- Analyser les aspects scientifiques du comportement global d'un système à envergure limitée (par exemple partie isolée d'un système complexe), incluant l'identification des facteurs qui influencent son comportement

Comment :

- o Pour une application donnée, savoir décrire les contraintes imposées par cette application, les sollicitations. Savoir prioriser ces contraintes pour faire un choix de matériaux. Effectuer un choix de matériau multi-critères.
- o Pour un matériau donné, savoir expliquer les propriétés macroscopiques en fonction de son agencement atomique, de ses défauts et de sa microstructure aux différentes échelles
- o Lire des documents scientifiques et techniques sur un matériau, en extraire les caractéristiques importantes pour une application ciblée, interpréter ces éléments en lien avec les caractéristiques structurales, physiques et mécaniques du matériau

- Utiliser correctement un modèle présenté en cours, dans ses conditions de validité (modèle décrivant un phénomène, sans couplages)

Comment :

- o Savoir utiliser un diagramme de phase pour prédire la microstructure d'un matériau en fonction de son histoire thermomécanique
- o Savoir exploiter un diffractogramme pour identifier la structure et l'agencement atomiques du matériau analysé
- o Savoir exploiter le modèle d'interaction des dislocations avec la microstructure pour expliquer le comportement mécanique d'un matériau cristallin
- o Savoir interpréter les propriétés électroniques d'un matériau pour en déduire ses propriétés fonctionnelles, semiconductivité et ferroélectricité

### **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

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

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



---

## 1EL5000 – Mécanique des milieux continus

---

**Responsables :** Guillaume Puel

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

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

**Type de cours :** Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### **Présentation, objectifs généraux du cours**

On souhaite montrer par des applications variées l'extrême diversité des utilisations de la Mécanique dans les projets industriels classiques et de haute technologie.

Les concepts de base sont introduits dans un cadre commun et unifié à la mécanique des solides tridimensionnels déformables et à la mécanique des structures minces. Des problèmes impliquant la mécanique à différentes échelles illustrent le cours, avec des ouvertures proposées notamment sur les applications concernant le génie civil, les transports, la biomécanique ou les nanotechnologies.

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

SG1 et SG3

### **Prérequis**

Aucun

### **Plan détaillé du cours (contenu)**

- Notion de déformation : approche lagrangienne du mouvement, tenseur des déformations de Green-Lagrange, tenseur des petites déformations (1h30)
- Notion de contrainte : relations fondamentales de la dynamique pour un domaine matériel, tenseur des contraintes de Cauchy, équation d'équilibre local
- Critères de résistance : essais de caractérisation mécanique, critères de rupture par clivage, critères de Tresca et de von Mises, concentrations de contraintes
- Comportement des matériaux : diversité des comportements mécaniques, comportement élastique linéaire isotrope, thermoélasticité
- Élasticité : propriétés de la solution, résolutions exactes et approchées, simplifications d'un problème d'élasticité (séance en classe inversée avec 3h de TD)



- a) Contrôle intermédiaire (analyse de solutions numériques, 30 min) / b) Approximation des poutres : mise en évidence des hypothèses du modèle poutres, définition des efforts généralisés
- Approximation des poutres : approximation de la cinématique, relations de comportement, liaisons
- Approximation des poutres : méthodes de résolution, phénomène de flambement
- Problème de synthèse sur les poutres (3h)
- Bureau d'études : problème de dimensionnement avec rendu noté (3h)
- Contrôle final (2h)

### **Déroulement, organisation du cours**

Cours/TD sauf la séance 1 (1h30 de cours) et les séances 5, 9 et 10 (3h de TD)

Les occurrences 1.1 et 1.4 sont en anglais ; les occurrences 1.2 et 1.3 sont en français.

### **Organisation de l'évaluation**

Note finale = 20% contrôle intermédiaire (contrôle continu) + 20% rapport du bureau d'études (séance 10) (contrôle continu) + 60% contrôle final (examen écrit)

Tous documents autorisés et calculatrices non communicantes pour le contrôle final

### **Support de cours, bibliographie**

Polycopié

### **Moyens**

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Andrea BARBARULO, Didier CLOUTEAU, Ann-Lenaig HAMON, Guillaume PUEL
- Taille des TD : 40
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaire : Comsol Multiphysics (avec le module Structural Mechanics)
- Salles de TP : aucune (les séances avec Comsol se font en salles de TD classiques)

### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

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

1. Modéliser le comportement mécanique d'un solide déformable
  - a. Justifier le choix de modélisation pertinent (2D ou 3D, axisymétrie, structures minces, ...)



- b. Traduire en équations et conditions aux limites appropriées les sollicitations subies par le domaine et les interactions de ses frontières avec l'extérieur
- c. Identifier les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs (rigidité, résistance, ...) pertinentes pour le problème posé

## 2. Déterminer la réponse mécanique (stationnaire) d'un solide déformable

- a. Aboutir à une solution exacte ou approchée du problème posé, analytique ou numérique
- b. Dédire de la solution obtenue les quantités permettant de faire des choix de conception ou de dimensionnement
- c. Critiquer la validité de la solution obtenue

### Description des compétences acquises à l'issue du cours

Le contrôle intermédiaire sur l'analyse de solutions numériques permet d'évaluer le jalon 1 des sous-compétences **C1.2** "Modéliser : utiliser et développer les modèles adaptés, choisir la bonne échelle de modélisation et les hypothèses simplificatrices pertinentes" et **C1.3** "Résoudre : résoudre un problème avec une pratique de l'approximation, de la simulation et de l'expérimentation".

Le rendu du bureau d'études (séance 10) permet d'évaluer le jalon 1 des sous-compétences **C1.1** "Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche trans-disciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines" et **C1.4** "Concevoir : spécifier, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe".

Ces deux éléments permettent donc de valider le jalon 1 de la compétence **C1**, tandis que la validation du jalon 1 de la compétence **C2** est directement lié à la note finale pour ce cours.



---

## 1EL6000 – Réseaux et Sécurité

---

**Responsables :** Pierre Wilke

**Département de rattachement :** CAMPUS DE RENNES

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

**Type de cours :** Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### **Présentation, objectifs généraux du cours**

Ce cours de SPI a pour but de donner aux élèves ingénieurs de CentraleSupélec une connaissance de base en réseau et de les sensibiliser à la sécurité informatique.

Pour le réseau, l'accent sera mis sur la compréhension de l'ensemble des différents mécanismes mis en œuvre pour permettre aux utilisateurs que nous sommes de naviguer sur le web ou d'utiliser les services Internet.

Ainsi, seront introduites les différentes couches réseau, en partant du physique jusqu'à l'applicatif, mais aussi les services réseau additionnels, tels que le DNS (Domain Name System). La pratique en TD et TP permettra aux étudiants de se confronter à la mise en œuvre technique des différentes notions abordées, dans des situations et systèmes réalistes.

Concernant la sécurité informatique, les cours permettront d'introduire les concepts fondamentaux et de présenter succinctement quelques mécanismes de sécurité. Ces cours seront complétés par des TP qui illustreront les risques de sécurité et des exemples de contre-mesures pouvant être déployées.

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

SG1 et SG3

### **Prérequis**

- Systèmes d'information et programmation
- Pratique de base de la programmation en langage Python

### **Plan détaillé du cours (contenu)**

Partie 1 : Réseau - Couches basses

- Couche physique / Accès réseau (Ethernet)
- Protocole de résolution d'adresse (ARP - Address Resolution Protocol), adressage MAC (Media Access Control)



## Partie 2 : Réseau – Couches intermédiaires

- Protocole et adressage IP
- Routage IP et protocoles de routage
- Protocoles de transport (TCP et UDP)
- TD1 : Analyse de trames réseau (Wireshark)
- TD2 : Spécification d'un protocole de communication
- TP1 : Manipulation d'équipements réseau (commutateurs / routeurs)
- Travail personnel : BGP (Border Gateway Protocol), peering, migration de IPv4 vers IPv6, contrôle de congestion, contrôle de flux, qualité de service...

## Partie 3 : Réseau – Services et Couches applicatives

- Résolution de noms de domaines (DNS – Domain Name System)
- Protocole HTTP et technologies du Web
- TD3 : Implémentation du protocole spécifié en TD2 en Python (programmation sockets)
- Travail personnel : protocoles d'email (IMAP, POP, SMTP), service d'annuaires (LDAP)...

## Partie 4 : Sécurité informatique

- Introduction à la sécurité, concepts fondamentaux
- Aspects juridiques et sociétaux
- Introduction à la cryptographie et aux protocoles cryptographiques
- Introduction aux logiciels malveillants (malware)
- TP2 : Virtual Private Network (OpenVPN)
- TP3 : Sécurité des applications Web
- Travail personnel : IPSec, DNSSEC, TLS, Sécurité de la messagerie instantanée...

### **Déroulement, organisation du cours**

Réseau – Couches basses : CM (1h30)

Réseau – Couches intermédiaires : CM (3h), TD (6h), TP (3h), travail personnel (9h)

Réseau – Services et couches applicatives : CM (3h), TD (3h), travail personnel (9h)

Sécurité informatique : CM (3h), TP (6h), travail personnel (10h)

Examen écrit (2h)

Les occurrences 1.2 et 1.4 sont enseignées en français

L'occurrence 1.3 est enseignée en anglais

### **Organisation de l'évaluation**

L'évaluation sera la moyenne d'un examen écrit (CF) en fin de session d'une durée de 2h et de l'évaluation des TPs 1 et 2 (évaluation obligatoire, EO)

- 50% pour l'examen final examen écrit (QCM) sans document

- 25% TP1



- 25% TP2

Les notes de TP participent toujours à la note finale, peu importe qu'elles l'améliorent ou qu'elles la fassent baisser.

### **Support de cours, bibliographie**

Transparents du cours mis à disposition au format électronique

Livres :

- J.F. Kurose and K.W. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach*, 7th ed. Eyrolles. Pearson. ISBN : 978-0133594140
- Ross J. Anderson, *Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems*, 2nd Edition. Wiley. ISBN : 978-0470068526 (accessible en ligne sur <https://www.cl.cam.ac.uk/~rja14/book.html>)

MOOC :

- Stanford Online: *Introduction to Computer Networking* (<https://lagunita.stanford.edu/courses/Engineering/Networking-SP/SelfPaced/about>)
- Coursera / Université du Maryland : *spécialisation Cybersécurité* (<https://www.coursera.org/specializations/cyber-security>)
- Cisco Networking Academy: modules CCNA1 et CCNA2 (<https://netacad.centralesupelec.fr/>)

### **Moyens**

- Équipe enseignante : membres de l'équipe CIDRE (Rennes), enseignants du campus Paris-Saclay (départements informatique et télécommunications) ;
- La plupart des TD et TP requièrent l'utilisation d'un ordinateur portable personnel ;
- Logiciels utilisés : Wireshark, Python, VirtualBox, OpenVPN (tous libres / open source) ;
- Certaines sessions de travaux pratiques mettent en oeuvre du matériel réseau spécifique ;
- Certains cours magistraux pourront être faits en visio-conférence depuis Rennes.

### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

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

- Connaître les concepts, protocoles et mécanismes des réseaux informatiques sur TCP/IP ;
- Analyser l'activité réseau générée par une application web ;
- Connaître les principales familles de schémas cryptographiques ;



- Connaître des techniques utilisées par les logiciels malveillants ;
- Mettre en place et administrer des réseaux informatiques commutés et interconnectés ;
- Concevoir et implémenter un protocole de communication applicatif ;
- Mettre en place et configurer un réseau privé virtuel (VPN) ;
- Détecter et analyser certaines vulnérabilités liées aux applications web.

### **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

- C1.1 - Analyser : étudier un système dans sa globalité, la situation dans son ensemble. Identifier, formuler et analyser un système dans le cadre d'une approche transdisciplinaire avec ses dimensions scientifiques, économiques, humaines, etc.
- C1.4 - Spécifier, concevoir, réaliser et valider tout ou partie d'un système complexe
- C2.1 - Approfondir un domaine des sciences de l'ingénieur ou une discipline scientifique



---

## 1EL7000 – Sciences des Transferts

---

**Responsables** : Ronan Vicquelin

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

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

**Type de cours** : Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### Présentation, objectifs généraux du cours

L'objectif de ce cours est d'inculquer les notions fondamentales de transferts de masse, d'espèces, de chaleur et de quantité de mouvement nécessaires à la caractérisation et au dimensionnement de multiples systèmes. Du fait de la grande analogie entre les transferts d'espèces et de chaleur d'une part, et du couplage fort entre la mécanique des fluides et les transferts thermiques et massiques inhérent au phénomène de convection d'autre part, ce paquet de sciences de l'ingénieur forme un tout très cohérent et fait partie du socle disciplinaire de base dans un ensemble de secteurs industriels très vaste couvrant l'énergie (nucléaire, fossiles, renouvelables), les transports (automobile, aéronautique, spatial), les procédés (industries chimique, biomédicale, ...), la santé ou encore le bâtiment. De plus, la maîtrise de ces sciences des transferts est indispensable dans le domaine en plein essor de l'optimisation des procédés industriels, tous secteurs confondus. Soulignons enfin que les défis environnementaux tels que la réduction, la dispersion ou la séquestration des polluants, ou encore le changement climatique sont autant d'enjeux sociétaux dont la physique est également gouvernée par ces sciences des transferts. Pour résoudre les grands défis du 21<sup>ème</sup> siècle, il faudra réaliser des développements importants et passionnants dans tous ces domaines de la technologie, de la santé et de l'environnement. Dans ce contexte, une bonne connaissance des transferts thermiques, massiques et de la mécanique des fluides est un atout pour l'avenir, et cet ensemble de matières est essentiel à la formation d'ingénieurs de haut niveau. Le cours repose sur un contenu théorique dense (transferts de masse, de chaleur et de quantité de mouvement par diffusion, convection ou rayonnement thermique dans diverses configurations : stationnaires / instationnaires, transferts isolés / couplés, couches limites) complété de résolutions concrètes de problèmes d'ingénieur au travers des divers TD qui seront traités.



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

SG1 et SG3

### Prérequis

Mathématiques et thermodynamique de base (étudiées pendant les 2 premières années universitaires)

### Plan détaillé du cours (contenu)

L'ordre des séances et les sujets de TD sont indicatifs. D'autres problèmes pourront être traités en cours

- **LES BASES DU RAYONNEMENT THERMIQUE :**  
Notions de corps opaque et de milieu transparent. Notions de flux émis, absorbé, réfléchi, partant, incident et radiatif. Ecriture de conditions aux limites en présence d'échanges radiatifs. Notion de luminance monochromatique directionnelle. Première expression du flux radiatif. Notion et propriétés du rayonnement d'équilibre.
- **PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET TRANSFERT RADIATIF :**  
Caractérisation de la surface d'un corps opaque : notions d'émissivité, d'absorptivité et de réflectivité. Notions de corps gris, de corps noir et de corps à propriétés radiatives isotropes. Modèles simples de transfert radiatif entre 2 corps opaques : (1) corps opaque convexe isotherme entouré par un corps noir isotherme ; (2) corps opaque convexe isotherme de petites dimensions entouré par une enceinte opaque isotherme.
- **INTRODUCTION A L'ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS FLUIDES :**  
Le théorème Pi. Quelques types d'écoulements. Exemple d'application du théorème Pi. Systèmes matériels et description du mouvement. Vitesse et accélération d'une particule fluide. Théorèmes de transport. Equation de bilan de masse. Description des mélanges d'espèces.
- **TRANSFERT DE MATIÈRE – ANALYSE DIMENSIONNELLE :**  
Bilan massique local pour une espèce. Vitesse d'espèce, vitesse barycentrique, vitesse de diffusion. Analogie entre les transferts de matière et de chaleur (diffusion et convection). Loi de Fick (pour un système binaire et/ou un système dilué). Physique de la diffusion et ordre de grandeur de la diffusivité. Conditions aux limites à l'interface entre deux phases. Utilisation de l'analyse dimensionnelle pour effectuer des estimations a priori. Temps et longueurs caractéristiques. Lien avec le théorème Pi. Conditions de Similitude.
- **BILAN DE QUANTITÉ DE MOUVEMENT :**  
Mouvement général d'une particule fluide. Taux de déformation. Notions sur l'analyse des contraintes dans un fluide. Relations entre les contraintes et les taux de déformation pour un fluide Newtonien. L'équation locale de bilan de quantité de mouvement. Équations d'Euler. Équations de Navier-Stokes. Analyse dimensionnelle des équations de Navier-Stokes. Équation locale de bilan pour l'énergie cinétique.



- **BILANS D'ÉNERGIE :**  
Bilan local d'énergie. Equations locales générales des transferts de matière, chaleur et quantité de mouvement et leur similarité. Le théorème de Bernoulli et ses applications. Bilan macroscopique d'énergie mécanique. Analyse d'écoulements incompressibles dans des conduites. Pertes de charge. Le diagramme de Moody. Pertes de charge singulières. Rendement d'une pompe et d'une turbine.
- **BILANS MACROSCOPIQUES :**  
Notion de bilan macroscopique. Bilans macroscopiques de masse et d'espèces. Le théorème des quantités de mouvement pour les écoulements permanents. Le théorème du moment angulaire. Turboréacteurs et moteurs fusées. Poussée de systèmes propulsifs (turboréacteur, moteur fusée). Bilan macroscopique d'énergie thermique.
- **INTRODUCTION A LA PHYSIQUE DE LA COUCHES LIMITE :**  
Couche minces et notions de la théorie de la couche limite. Estimations de grandeurs caractéristiques de la couche limite. Transition et décollement de couche limite. Définitions d'épaisseurs de couche limite. Équations de la couche limite laminaire sur une plaque plane. Solutions numériques des équations de la couche limite laminaire sur une plaque plane sans gradient de pression.
- **CONVECTION FORCÉE EXTERNE - MODÈLE DES COUCHES LIMITES MÉCANIQUE ET THERMIQUE 2D :**  
Solutions approximée des équations de la couche limite laminaire sur une plaque plane par la méthode intégrale. Notions sur les effets de gradient de pression. Notions de couche limite thermique en convection externe forcée. Démonstration de la forme générale d'une corrélation de convection forcée externe. Hypothèses simplificatrices et équation simplifiée du bilan d'énergie. Obtention de l'expression de cette corrélation via la méthode intégrale.
- **NOTIONS DE CONVECTION FORCÉE INTERNE :**  
Notions élémentaires sur les établissements de régimes et les régimes établis dans les conduites de section constante. Notion de vitesse débitante et de température de mélange. Résolution du profil de vitesse en régime laminaire établi. Expressions du nombre de Nusselt en écoulements laminaire et turbulent pour une conduite de section circulaire. Notions de convection forcée interne en régime turbulent. Diamètre hydraulique.

### **Déroulement, organisation du cours**

Le cours est proposé sur plusieurs occurrences en plusieurs langues :  
Séquence SG1

- Occurrence 1.1 (Français) : Hervé Duval
  - Occurrence 1.2 (Anglais) : Gabi Stancu
  - Occurrence BCPST (Français) : Julien Colin
- Séquence SG3



- Occurrence 1.3 (Français) : Fabien Bellet
  
- Occurrence 1.4 (Français & Anglais) : Ronan Vicquelin, Antoine Renaud
  - Amphithéâtre + TD (Français) : Ronan Vicquelin
    - *Modalité standard en français par défaut.*
  - Classe intégrée (Anglais) : Antoine Renaud
    - *Cette modalité en anglais est au choix des élèves une fois inscrit en occurrence 1.4 (affichée en français dans la campagne MyWay)*

Le cours est programmé sur 19 créneaux de 1h30 chacune, 3 éléments de préparation en distanciel (3 x 1h30) et une séance d'examen de 2h.

### **Organisation de l'évaluation**

Le Contrôle Final (CF) organisé sur 2h00 lors de la dernière séance peut être réalisé avec documents. L'étudiant obtient une note CF.

Contrôle Continu (CC) au travers de minimum deux questionnaires-test facultatifs traités en cours avec documents autorisés. Pour chaque test, l'étudiant obtient une note CC<sub>i</sub> : CC1 pour le test n°1, CC2 pour le test n°2, etc...

Ncc est le nombre de questionnaires-test (minimum 2). Le contrôle continu compte ainsi pour maximum 33% de la note finale et le contrôle finale compte minimum pour 67%.

### **Support de cours, bibliographie**

- Matériel de cours fourni
- Polycopié CentraleSupélec « Mécanique des Fluides » ; Tome I ; Sébastien Candel.
- « Transferts thermiques - Introduction aux transferts d'énergie » ; 5ème édition ; auteurs : Jean Taine, Franck Enguehard et Estelle Iacona ; Dunod, Paris, 2014.

### **Moyens**

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Fabien Bellet, Julien Colin, Hervé Duval, Antoine Renaud, Gabi Stancu, Ronan Vicquelin
  
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35



## Acquis d'apprentissage visés dans le cours

A l'issue de cet enseignement, l'élève sera capable de :

1. identifier les différents modes de transfert thermique / massique à l'œuvre dans une configuration donnée,
2. écrire des bilans appropriés (masse, espèces, quantité de mouvement, énergie) et d'équations de continuité aux interfaces pour déterminer l'évolution de différents champs (concentrations, vitesse, pression, température),
3. calculer des efforts et flux thermiques (locaux ou intégrés), des puissances, des rendements, des pertes de charges.
4. modéliser des systèmes complexes en vue de leur dimensionnement et leur optimisation :
  - Faire des approximations et des estimations d'ordres de grandeur,
  - Simplifier un problème d'apparence compliquée où plusieurs phénomènes de transfert coexistent, en n'en retenant que les principaux,
  - Modéliser des configurations complexes et utiliser les bilans fondamentaux pour résoudre des problèmes d'ingénieur.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

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

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

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

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

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

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

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

La compétence C2 est validée si la note finale  $NF \geq 10$ .



## 1EL8000 – Systèmes Electroniques

**Responsables** : Pietro Maris Ferreira

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

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

**Type de cours** : Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

### Présentation, objectifs généraux du cours

L'électronique et le numérique sont aujourd'hui omniprésents dans notre vie, que ce soit dans l'usage des objets connectés, dans les transports, dans le médical, dans les objets de notre quotidien, dans la défense et le spatial, ou dans les milliards d'ordinateurs connectés à travers le WEB.

Les technologies évoluent de façon exponentielle (loi de Moore) depuis une cinquantaine d'année, mais on retrouve un certain nombre de constantes dans la plupart des équipements : - des interfaces avec le monde physique (capteurs) et les hommes (dispositifs d'affichage, IHM),  
- un traitement des signaux analogiques (filtrage, ondelettes, ... et bientôt systèmes neuromorphiques),  
- une conversion analogique-numérique (avec ou sans compression de données) et numérique-analogique (transducteurs)  
- des unités de traitement numérique embarquées ou déportées (HPC, cloud...).

Le but de ce cours est dans une approche top-down, d'apprendre aux élèves à spécifier et concevoir des systèmes électroniques à partir de composants matériels comme des amplificateurs opérationnels, microcontrôleurs, FPGA. L'aspect microélectronique (CAO) et réalisation (technologie) de ces composants sera réservé aux étudiants souhaitant se spécialiser dans le domaine et étudié dans des cours de niveau plus élevé. Les principes et grandeurs physiques liés au fonctionnement de ces composants devront néanmoins être connus ou évoqués.

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

SG1 et SG3

### Prérequis

Aucun

### Plan détaillé du cours (contenu)

Electronique analogique :



- cours 1 : Panorama Historique et d'Economie des Systèmes Électroniques ; Circuits Linéaires
- cours 2 : Circuits Non-Linéaires - Distorsion ; Modulation ; Saturation ; Modélisation
- TD 1 : Montages à Amplificateur Linéaire - Amplificateur d'Instrumentation, TIA, Filtre Active 2eme Ordre
- cours 3 : Composants Semiconducteurs - Jonction PN ; Transistor MOS
- TD 2 : Modélisation des Systèmes Non-Linéaires - Multiplicateur de Tension Analogique ; Redresseur de Tension ; Échantillonneur/Bloqueur ; OTA.
- cours 4 : Interface et capteur
- TD 3 : Simulation LTSPICE de la chaîne d'instrumentation : Radar Ultrason
- TP : Montage d'une chaîne d'instrumentation : Radar Ultrason

#### Conversion analogique-numérique

- cours : échantillonnage et quantification, défauts et caractérisation, spécification d'une chaîne de conversion
- travail personnel : les familles de convertisseurs analogiques-numériques

#### Electronique numérique :

- cours 1 : Introduction et les composants du numérique, solutions logicielles vs matérielles, méthodologie de conception.
- Travail personnel : découverte de l'Arduino
- cours 2 : représentation des données, logique, portes, bascules
- cours 3 : Fonctions évoluées, opérateurs, machines d'état
- cours 4 : Introduction au langage VHDL
- TD 1 : Initiation au langage VHDL sur carte FPGA
- cours 5 : Architecture des unités de traitement, exemples en VHDL
- TD 2 : Implémentation de traitements sur FPGA, préparation du TP
- TP : implémentation d'un traitement sur carte FPGA

#### Déroulement, organisation du cours

Le cours est divisé en 3 parties : Analogique, numérique, et conversion. Chaque partie analogique et numérique est composée de cours, de TDs d'application, de travail à la maison et un TP de mise en œuvre.

Les TDs en électronique analogique sont des TDs 'papier' .

1 des TDs de numérique se font autour d'une carte électronique DE10 Altera en initiation à la conception en langage VHDL.

Les 2 TP forment un tout ; un projet comprenant un capteur, un étage analogique, un CAN et un étage numérique. Le premier TP consiste à concevoir, simuler et tester l'étage analogique, alors que le 2è TP permettra la conception de l'étage numérique en langage VHDL.

Le cours est donné en français pour les occurrences 1.1, 1.2 et 1.3. Il est donné en anglais à l'occurrence 1.4



### **Organisation de l'évaluation**

Le cours est évalué sur la base de 2 TPs et d'un examen écrit d'une durée de 2 heures avec document.

Évaluation finale = note de l'examen écrit pour 75%, TP analogique et TP numérique pour 25 %.

Les TP sont des évaluations obligatoires (EO)

Les TP 'analogiques' sont préparés par un TD qui permet de prédéterminer les fonctions qui seront testées. Les encadrants vérifieront que ce travail préliminaire a bien été fait et en tiendront compte dans leur notation. Les TP sont évalués sur la base du compte-rendu rédigé en temps réel et des éléments de simulation et de mesures produits, ainsi que de l'observation par les encadrants de TP des élèves en situation.

L'examen écrit de 2 heures sur table pose un problème d'ingénieur d'un système électronique pour lequel les élèves doivent apporter une solution par le choix d'un capteur, d'une chaîne de traitement analogique, d'un convertisseur analogique-numérique et un traitement numérique.

Évaluation des acquis d'apprentissage : Les compétences évoquées précédemment sont toutes évaluées à un niveau 1, c'est-à-dire dans le cas de problèmes simples, relativement fermés, et de façon guidée par les enseignants. Les compétences seront évaluées de 2 façons : - de façon théorique au moyen de l'examen écrit et de façon pratique par les TPs.

C1 est validé si la moyenne des 2 TPs est supérieure à 12 et la moyenne des questions marquées C1 lors de l'examen écrit est supérieur à 10

C2 est validé si la moyenne des questions marquées C2 lors de l'examen écrit est supérieur à 10

### **Support de cours, bibliographie**

"Digital Design and Computer Architecture"

David and Sarah Harris

Morgan Kaufmann Publishers

« Foundations of analog and digital electronic circuits »

Anant Agarwal and Jeffrey H Lang

Morgan Kaufmann Publishers

### **Moyens**

• Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Les enseignants interviennent selon leurs spécialités.

- Numérique : P. Bénabès, C. Lelandais, A Kolar, E. Libessart

- Capteurs : J. Juillard & L. Bourgois

- Analogique : E. Avignon, P. Maris, M. Roger.

• Taille des TD (par défaut 35 élèves) : Par groupe de 35 élèves



- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : 2 salles de TPs de 32 élèves en parallèle (4 encadrants).
- Matériel mis à disposition des élèves : Carte Altera DE10-Lite

### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

Le cours « Systèmes électroniques » apportera plus précisément aux élèves des notions de base pour :

- A) Spécifier une chaîne de traitement analogique
  - Comprendre les différentes technologies électroniques (circuits intégrés vs circuits imprimés) et leurs évolutions (technologies traditionnelles vers more than Moore ou beyond CMOS), Systems on Chip, packaging, interconnexions
  - Concevoir des architectures analogiques depuis des modèles simple (bloc Laplace par exemple) jusqu'à des circuits à base d'AOP, capacités, résistances, inductances.
  - Analyser sous forme matricielle les réseaux de Kirchoff simple (circuits RLC + AOP).
  - Déterminer si les limitations des AOPs sont respectés (bande passante, produit Gain-bande, impédances d'entrée et sortie, vitesse de balayage) par rapport une application donnée
  - Choisir un capteur interface entre le monde physique et les signaux électroniques
- B) Simuler et tester un circuit simple
  - Prendre en main des logiciels de simulations de type Spice (saisie de schéma, simulation AC, DC, et transitoire)
  - Paramétrer efficacement une simulation : temps de simulation et pas adapté, résolution d'éventuels problèmes de convergence sur des cas simples (circuits RLC + AOP).
  - Faire des montages propres sur des plaques à essais (simulation versus mesure)
  - Mesurer des courants, des tensions, des impédances avec les équipements appropriés (oscilloscopes, impédancemètres,).
  - Choisir le composant approprié à partir de sa documentation (limitations AOP)
- C) Spécifier et choisir le bon convertisseur analogique-numérique adapté à un problème donné en termes de fréquence d'échantillonnage, résolution, famille, et analyser l'effet de l'échantillonnage et de la quantification sur le signal à traiter (effets de repliement de spectre, de saturation ou non linéarité).
- D) Spécifier et choisir une architecture de traitement numérique adaptée à un problème donné
  - Type d'unité de traitement adaptée au problème (processeur, microcontrôleur, DSP, circuit programmable, ASIC dédié)



- Choix des outils de développement nécessaires à la mise en œuvre de ces composants

- E) Mettre en œuvre une application simple avec un microcontrôleur ou un circuit logique programmable.
- Connaître les périphériques disponibles dans un microcontrôleur en fonction de leur utilisation potentielle, et leur mise en œuvre simple en langage C
- Programmer, télécharger et tester une application simple sur microcontrôleur ou FPGA en langage VHDL

### **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

Ce cours permet de valider certaines compétences de type C1 – Analyser, concevoir et réaliser des systèmes complexes.

Cette validation se fait au moyen des TPs (C13 Résoudre, C14 concevoir) et de l'examen écrit (C11-Analyser, C12 Modéliser)

L'examen écrit permet aussi de valider des compétences de type C2 (C21-Approfondir un domaine de l'ingénieur, C22-Importer des connaissances d'autres domaines)

Ainsi nous allons apprendre lors de ce cours à :

- A) Spécifier une chaîne de traitement analogique simple
- B) Simuler et tester un circuit simple
- C) Spécifier et choisir le bon convertisseur analogique-numérique
- D) Spécifier et choisir une architecture de traitement numérique adaptée à un problème simple donné
- E) Mettre en œuvre une application simple avec un microcontrôleur ou un circuit logique programmable

Certains concepts de base devront être appris ou revus de façon autonome (les bases de la logique, les microcontrôleurs Arduino, les familles de convertisseurs), et nous utiliserons

Des concepts mathématiques étudiés par ailleurs (théorie de l'échantillonnage, filtrage, traitement du signal)



---

## 1EL9000 – Thermodynamique

---

**Responsables :** Marie-Laurence Giorgi

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

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

**Type de cours :** Cours de Sciences pour l'ingénieur

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

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

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

---

### **Présentation, objectifs généraux du cours**

Ce cours a pour objectif de donner les bases théoriques, les outils et les bonnes pratiques, nécessaires aux ingénieurs, pour la compréhension et la conception de systèmes visant à transformer une énergie brute en énergie utile et / ou à modifier les propriétés physico-chimiques de la matière au cours de transformations contrôlées. Les connaissances abordées permettront de dimensionner ces systèmes en cherchant les points de fonctionnement optimaux (par exemple en s'appuyant sur des transitions de phase) pour optimiser leur efficacité énergétique.

Le cours montrera en particulier comment les notions anciennes de la thermodynamique restent plus que jamais indispensables pour les enjeux du XXIème (production d'énergies traditionnelles ou renouvelables, efficacité énergétique des procédés, matériaux intelligents, recyclage, traitement de l'eau et des déchets ...) et comment les avancées récentes des connaissances permettent de prévoir les couplages multi-physiques dans les systèmes complexes.

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

SG1 et SG3

### **Prérequis**

Aucun

### **Plan détaillé du cours (contenu)**

#### 1) Efficacité énergétique

Description générale des notions fondamentales (systèmes ouverts, fonctions d'état)

Systèmes ouverts de transformation d'énergie (bilans d'énergie, d'entropie et d'exergie)

Efficacité des cycles de récupération d'énergie (dimensionnement de cycles thermodynamiques)

#### 2) Transitions de phases



Propriétés thermodynamiques d'un corps pur et de solutions  
Équilibres de phases, diagrammes de phases  
Transition de phases (équilibre et écart à l'équilibre, réactions chimiques, germination / croissance)

### **Déroulement, organisation du cours**

Le cours sera divisé en séances de 3h00 (1h30 CM et 1h30 TD).  
À la fin de chaque partie de cours, les étudiants réaliseront un projet en binômes ou trinômes (deux séances de 3h00 pour réaliser les projets et écrire les rapports associés).  
Une évaluation finale (contrôle écrit de 2 h) terminera le cours.  
La seconde session sera un contrôle écrit de 2 h.

La langue d'enseignement est le français pour les occurrences 1-1 et 1-2 et l'anglais pour l'occurrence 1-3.

### **Organisation de l'évaluation**

Deux projets avec deux rapports (40 %) et contrôle final individuel (60 %)  
Les projets sont des évaluations obligatoires (EO)

### **Support de cours, bibliographie**

D. Kondepudi, I. Prigogine, Modern Thermodynamics – From Heat Engines to Dissipative Structures, John Wiley and sons, England, 1998.  
C.H.P. Lupis, Chemical Thermodynamics of Materials, Elsevier Science Publishing, New York, 1983.

### **Moyens**

- Equipe enseignante (noms des enseignants des cours magistraux) : Marie-Laurence Giorgi, Sean Mc Guire
- Taille des TD : 35
- Outils logiciels et nombre de licence nécessaire : logiciels libres

### **Acquis d'apprentissage visés dans le cours**

À l'issue de l'enseignement, les élèves seront capables de :

1. Écrire les bilans d'énergie, d'entropie et d'exergie
2. Dimensionner et optimiser les cycles de récupération d'énergie
3. Proposer et évaluer des solutions pour optimiser l'efficacité énergétique des systèmes
4. Comprendre et utiliser des diagrammes d'équilibre pour l'élaboration de matériaux
5. Construire des modèles thermodynamiques décrivant les équilibres
6. Travailler en équipe de façon autonome et interdépendante vers un objectif commun à l'équipe

### **Description des compétences acquises à l'issue du cours**

C1.1, C1.2, C1.3, C2.1