



CentraleSupélec

OPTION ENERGIE

<http://www.option-energie.ecp.fr>

PARCOURS PROCÉDES : PROGRAMME PÉDAGOGIQUE ET FICHES DE COURS

Le programme pédagogique du Parcours Procédés (P) est détaillé dans le tableau ci-dessous.

Les élèves-ingénieurs du cursus ECP rattachés à ce parcours peuvent, s'ils le souhaitent, être dispensés du cours « compléments de transferts thermiques ». Les conditions de dispense de ce cours sont précisées dans son descriptif (voir plus bas). Si ces conditions sont réunies, la dispense est automatiquement accordée ; en revanche, **tout élève-ingénieur ECP obtenant cette dispense doit obligatoirement suivre et valider un cours électif supplémentaire.**

Par ailleurs, le programme pédagogique du Parcours P propose le choix de 2 cours parmi 4. Mais certains de ces cours au choix font partie du programme pédagogique du M2 « Procédés pour l'Energie » rattaché à la Mention « Energie » de l'Université Paris-Saclay¹ et associé au Parcours P ; **le suivi de ces activités est donc obligatoire pour la validation du M2 en parallèle du parcours.**

PROGRAMME PÉDAGOGIQUE DU PARCOURS PROCÉDES

(cliquer sur le nom de l'activité pour atteindre son descriptif)

Dispense possible	Compléments de transferts thermiques
Obligatoire	Contrôle-commande
Obligatoire	Génie des procédés pour l'énergie
Obligatoire	Hydrodynamique physique
Obligatoire	Matériaux de structure pour l'énergie
Obligatoire	Mécanique des fluides numérique
Obligatoire	Methodologie en ingénierie des matériaux
Obligatoire	Methodologie en transferts thermiques
Obligatoire	Thermodynamique et transfert de matière
2 cours à choisir dans cette liste	Energétique industrielle
	Optimisation énergétique des procédés
	Physique des matériaux
	Transferts turbulents

¹ Site web : <http://www.universite-paris-saclay.fr/fr/formation/master/m2-procedes-pour-lenergie>

Obligatoire	Projet numérique de simulation des procédés
Obligatoire	Activités de laboratoire
Obligatoire	Miniprojet numérique

COMPLEMENTS DE TRANSFERTS THERMIQUES

Coordonnateur(s) : Hervé Duval (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Hervé Duval (CentraleSupélec), Laurent Soucasse (CentraleSupélec), Marie-Laurence Giorgi (CentraleSupélec)

Code : PR4520BA

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Conditions de dispense : avoir suivi et validé avec une note de 13/20 ou plus le cours de S7 « transferts thermiques avancés » (EN1110 - Benoît Goyeau), et demander la dispense.

Descriptif :

Ce cours propose de modéliser les transferts de quantité de mouvement et d'énergie. Il approfondira et complètera les connaissances déjà acquises par les élèves-ingénieurs dans ces domaines. Les notions abordées seront les suivantes :

- Rappels sur les concepts de base de transferts thermiques.
- Théorèmes de transport. Equations de bilan de masse globale, de quantité de mouvement, et d'énergie. Cas de la convection forcée, de la convection naturelle et de la convection mixte.
- Couches limites mécanique et thermique (approximations des couches limites, calculs de couches limites par la méthode intégrale).
- Méthode générale de calcul des transferts radiatifs entre corps opaques à travers un milieu transparent.

[Retour à la liste](#)

CONTROLE-COMMANDE

Coordonnateur(s) : Didier Dumur (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Didier Dumur (CentraleSupélec)

Code : PR3950BD

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.5

Descriptif :

Ce cours a pour objectif de présenter les techniques de commande rencontrées dans le domaine énergétique, depuis les structures classiques de régulation PID jusqu'aux stratégies plus avancées comme la commande prédictive. La mise en œuvre et les performances des lois de commande abordées, en termes de comportement vis-à-vis des non-linéarités, de rejet de perturbations, de robustesse, ... sont analysées sur deux exemples concrets représentatifs de la complexité des processus à piloter dans ce domaine.

Un premier cours a pour objectif de fournir les concepts méthodologiques des systèmes asservis, qui seront utilisés lors des cours suivants. On y aborde en particulier, outre la notion de bouclage, les outils nécessaires à l'étude de la stabilité et de la précision des systèmes asservis en temps continu.

Les cours deux et trois précisent la structure de régulation PID, son rôle, les méthodes de réglage, les dispositifs d'anti-saturation et l'influence de non-linéarités. L'agencement des boucles de commande au sein d'un système complexe est ensuite examiné, en particulier la structure cascade et les stratégies d'anticipation pour la prise en compte de perturbation. Ces principes théoriques sont mis en œuvre et analysés en considérant la régulation de température de vapeur d'une unité de surchauffe / désurchauffe d'un générateur de vapeur.

Les cours quatre et cinq s'intéressent à l'implantation de stratégies de commande avancées en génie des procédés, présentant la démarche de commande prédictive, linéaire et non-linéaire, et la notion d'observateur souvent nécessaire dans ce contexte. L'ensemble est mis en œuvre pour la commande d'un procédé complexe.

Ce module doit permettre de comprendre et d'analyser les structures de régulation implantées classiquement pour la commande de procédés complexes, ainsi que les lois associées, et donne les outils susceptibles d'être mis en œuvre pour quantifier les performances d'un système industriel. Il intervient donc de façon transverse vis-à-vis des autres cours de l'option. Les acquisitions visées sont liées au domaine de la modélisation des systèmes, de l'implantation de schémas de commande et du choix et du réglage de régulateurs appropriés.

Le volume horaire du cours est réparti pour moitié sous forme d'enseignement magistral, pour moitié sous forme de travaux dirigés avec Matlab / Simulink.

Pré-requis : transformée de Laplace, représentation des systèmes par fonctions de transfert et variables d'état, notion de bouclage, structure d'asservissement.

[Retour à la liste](#)

GÉNIE DES PROCÉDÉS POUR L'ÉNERGIE

Coordonnateur(s) : Marie-Laurence Giorgi (CentraleSupélec)

Intervenants(s) : Marie-Laurence Giorgi (CentraleSupélec)

Code : PR3610AC

Durée : 15 h hors contrôle (contrôle commun avec le cours de Thermodynamique et transferts de matière)

ECTS : 1.5

Descriptif :

Ce cours a pour objectif d'apporter les connaissances nécessaires à la conception et à la modélisation des installations rencontrées dans l'industrie des procédés et des matériaux (opérations unitaires et réacteurs).

Contenu :

- Génie de la réaction chimique (modèles de réacteurs, notions de cinétique chimique)
- Dimensionnements d'opérations unitaires (distillation, extraction liquide / liquide, appareils à contact permanent)
- Modèle de l'étage idéal, hauteur et de nombre d'unités de transfert, efficacité de Murphree
- Bilan énergétique dans un procédé (optimisation, efficacité énergétique)
- Nombreuses études de cas (comme par exemple, le retraitement du combustible nucléaire ou la séparation éthanol / benzène)

[Retour à la liste](#)

HYDRODYNAMIQUE PHYSIQUE

Coordonnateur(s) : Hervé Duval (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Hervé Duval (CentraleSupélec)

Code : PR1570AA

Durée : 18h hors contrôle

ECTS : 1.5

Descriptif :

L'objectif de ce cours est d'apporter les éléments de mécanique des fluides et de physico-chimie nécessaires à l'étude des phénomènes hydrodynamiques rencontrés dans l'industrie des procédés et des matériaux. On se limitera volontairement aux écoulements incompressibles et on mettra l'accent sur le rôle joué par les interfaces dans le comportement des fluides.

Contenu :

- Notions de physique des liquides et des gaz (échelles caractéristiques, milieu continu, modèles microscopiques de viscosité, ...), notions de physico-chimie des interfaces (loi de Laplace, loi de Young, ...)
- Rappels de cinématique des fluides (dérivée particulaire, rotations et déformations dans un écoulement, ...)
- Dynamique des fluides (tenseur des contraintes visqueuses, équations de Navier-Stokes, fluides non-newtoniens, régimes d'écoulement, ...)
- Ecoulements à petits nombres de Reynolds (propriétés des écoulements rampants, lubrification, ...)
- Ecoulements où les effets visqueux sont négligeables (conservation de la quantité de mouvement, théorème de Bernoulli, écoulements potentiels, ondes dans les fluides, ...)

[Retour à la liste](#)

MATERIAUX DE STRUCTURE POUR L'ENERGIE

Coordonnateur(s) : Jean-Hubert Schmitt (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Jean-Hubert Schmitt (CentraleSupélec)

Code : PR1565AA

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.5

Descriptif :

L'objectif de ce cours est de comprendre les choix qui sont faits en termes de matériaux pour les applications dans le secteur de l'énergie. En se fondant sur les connaissances de base en mécanique des solides, ainsi que sur les contraintes technologiques et économiques de la production d'énergie, les principales contraintes matériaux sont identifiées et quantifiées. A partir d'un rappel des bases de la science des matériaux, c'est-à-dire des relations entre les microstructures et les propriétés mécaniques, ainsi que des évolutions microstructurales en fonction du temps et de la température, les typologies de matériaux utilisés sont déduites de façon argumentée. Cette approche permet également de conclure sur les évolutions actuelles des matériaux pour les applications énergétiques (développement de nouveaux alliages, importance des matériaux composites...).

Le cours aborde successivement les aspects suivants :

- Rappels sur les mécanismes physiques de l'élasticité et de la plasticité, notion de dislocations et d'écrouissage, mécanismes d'accroissement de la limite d'élasticité
- Effets de la température sur le comportement mécanique des matériaux, activation thermique et fluage
- Introduction aux notions d'endommagement et de rupture, influence des mécanismes de déformation et de la microstructure, rupture fragile et transition ductile-fragile
- Comportement cyclique et tenue en fatigue
- Influence des conditions environnementales, corrosion et oxydation

Il est illustré par quelques études de cas simples, étudiées sous forme de TD (réservoirs sous pression, aubes de turbines, tenue des cuves de réacteurs nucléaires, ...).

[Retour à la liste](#)

MECANIQUE DES FLUIDES NUMERIQUE

Coordonnateur(s) : Sébastien Ducruix (CNRS)

Intervenant(s) : Sébastien Ducruix (CNRS)

Code : PR3940BD

Durée : 15h contrôle inclus

ECTS : 1.5

Descriptif :

L'objectif de ce module de calcul numérique est l'apprentissage de la méthodologie d'utilisation d'un logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamics) commercial et de son utilisation dans le cadre de l'étude des transferts de chaleur et de matière.

La première séance concerne la définition et la numérisation du domaine de calcul ainsi que sa discrétisation. Les principales techniques utilisées en milieu industriel sont d'abord présentées, puis les étudiants réalisent le maillage sur ordinateur d'un mélangeur coudé à l'aide d'un logiciel commercial dédié.

La deuxième séance aborde l'utilisation du logiciel de résolution des équations de Navier-Stokes. Les différents modèles de turbulence ainsi que le choix des conditions aux limites sont présentés. Les étudiants effectuent durant cette séance la simulation de l'écoulement dans le mélangeur.

Enfin, les dernières séances sont consacrées à la réalisation complète d'une étude numérique sous forme de mini-projet. Ce travail sera orienté vers la prédiction des transferts de matière.

[Retour à la liste](#)

METHODOLOGIE EN INGENIERIE DES MATERIAUX

Coordonnateur(s) : Jean-Hubert Schmitt (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Jean-Hubert Schmitt (CentraleSupélec)

Code : PR1580AA

Durée : 9h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

L'objectif de ce cours est d'illustrer sur quelques cas particulier l'importance des notions acquises sur les relations entre le comportement mécanique des matériaux et leur microstructure. S'appuyant sur des analyses simplifiées des conditions mécaniques s'appliquant à certaines pièces de structure ou à certains assemblages, on évalue les paramètres matériaux critiques pour résister de façon durable à ces sollicitations. On en déduit ainsi des indices de performance, permettant de sélectionner les matériaux les mieux adaptés et à tracer quelques grandes lignes pour leur développement futur.

Partant des quelques exemples simples, traités sous forme d'exercices, on se donnera les éléments nécessaires permettant d'aborder une optimisation plus complexe tant en termes de contraintes mécaniques que de combinaison de matériaux. Ce travail donnera lieu à une étude en petits groupes qui sera présentée lors de la dernière séance et tiendra lieu d'évaluation.

[Retour à la liste](#)

METHODOLOGIE EN TRANSFERTS THERMIQUES

Coordonnateur(s) : Laurent Soucasse (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : enseignants-chercheurs et industriels (un encadrant pour chaque groupe d'élèves)

Code : EN3006AD

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 2.0

Descriptif :

L'activité repose sur une équipe pédagogique regroupant des enseignants-chercheurs et des industriels. Le travail s'effectue en petits groupes de 4 à 5 élèves sur différentes études de cas au cours desquelles il s'agit de résoudre un problème de thermique dans des configurations d'intérêt pratique sur la base des connaissances acquises et avec l'aide des encadrants.

[Retour à la liste](#)

THERMODYNAMIQUE ET TRANSFERTS DE MATIÈRE

Coordonnateur(s) : Marie-Laurence Giorgi (CentraleSupélec)

Intervenants(s) : Marie-Laurence Giorgi (CentraleSupélec)

Code : PR4530AA

Durée : 15 h hors contrôle (contrôle commun avec le cours de Génie des Procédés pour l'Énergie)

ECTS : 1.5

Descriptif :

Ce cours a pour objectif d'apporter les connaissances de thermodynamique et de transferts de matière nécessaires à la modélisation des installations rencontrées dans l'industrie des procédés et des matériaux.

Contenu :

- Thermodynamique des solutions
- Diagrammes binaires et ternaires
- Thermodynamique des séparations
- Modèles décrivant les équilibres liquide / solide, liquide / liquide et liquide / vapeur
- Modélisation des transferts de matière entre phases (diffusion, convection)

- Etablissement des corrélations pour calculer les coefficients de transfert par diffusion-convection

[Retour à la liste](#)

ENERGETIQUE INDUSTRIELLE

Coordonnateur(s) : Philippe Degand (Suez International)

Intervenant(s) : Philippe Degand (Suez International), Mathilde Béranger (Suez International)

Code : PR1550

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Exposés sur les principales composantes de l'utilisation d'énergie thermique et électrique dans l'industrie : les centrales, les fluides thermiques, les chaudières, les réseaux de vapeur, les réseaux de chauffage industriel par vapeur d'eau, eau surchauffée ou fluides organiques.

Focus particulier sur l'évaporation multiple effet (concentration et production d'eau adoucie) avec comparatif énergétique et économique entre dessalement d'eau de mer par osmose et par évaporation.

Focus sur les grands cycles de cogénération avec mise en évidence des paramètres de choix (ratio électricité / chaleur et coût de l'électricité produite). Exercice dirigé permettant de faire le comparatif chiffré entre les 2 principaux types de cycles.

Focus sur les différents types d'échangeurs de chaleur.

[Retour à la liste](#)

OPTIMISATION ENERGETIQUE DES PROCEDES

Coordonnateur(s) : Hervé Duval (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Jean-Marc Borgard (CEA), Jean-Luc Monsavoit et Denis Bossanne (IFP Energies Nouvelles)

Code : PR1510AD

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

L'objectif du cours est de présenter les outils nécessaires pour mener une réflexion sur l'optimisation énergétique des procédés, en se fondant en particulier sur une combinaison des bilans de matière, d'énergie et d'exergie. Le cours s'appuiera sur des exemples concrets présentés par des intervenants de l'industrie pour montrer les problématiques d'économie d'énergie et la démarche aboutissant à l'optimisation énergétique d'une unité de production. Ces exemples pourront concerner :

- L'élaboration des matériaux qui exige souvent de hautes températures et met en jeu des quantités importantes d'énergie,
- Les procédés pétrochimiques,
- Les procédés de séparation des gaz de l'air.

[Retour à la liste](#)

PHYSIQUE DES MATERIAUX

Coordonnateur(s) : Brahim Dkhil (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Brahim Dkhil (CentraleSupélec)

Code : PR1590AA

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

L'objectif de ce cours est d'apporter les connaissances et outils nécessaires à la compréhension des concepts et paramètres physiques clés au cœur d'un grand nombre de matériaux utilisés dans le domaine de l'énergie.

Contenu :

- Propriétés électroniques de la matière (structure de bandes électroniques, semiconducteur, transport électronique, jonction pn, supraconducteur)
- Propriétés optiques et diélectriques (phonon, absorption, réflexion, photoluminescence, condensateur)
- Cellules photovoltaïques (diode, semiconducteur, cellule Graëtzl, perovskites solaires)
- Couplage énergie mécanique et magnétique et/ou ferroélectrique et/ou optique (magnétisme, ferroélectricité, piézo-électricité-magnétisme, multiferroïques, photostriction, actionneurs et capteurs)
- Batteries et pile à combustible (défauts, diffusion ionique, électrochimie, oxydo-réduction)
- Génération/détection de chaleur (thermoélectricité, électro- et magnéto-calorique)

[Retour à la liste](#)

TRANSFERTS TURBULENTS

Coordonnateur(s) : Ronan Vicquelin (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Ronan Vicquelin (CentraleSupélec)

Code : EN3002AE

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Il s'agit de modéliser les transferts de masse globale, de masses des différentes espèces, de quantité de mouvement et d'énergie sous toutes formes dans des fluides monophasiques hétérogènes, éventuellement turbulents et / ou réactifs.

- Processus de diffusion dans la limite des faibles nombres de Knudsen. Diffusion de la chaleur. Diffusion dans un mélange d'espèces. Echelles caractéristiques.
- Equations locales instationnaires de bilan pour un fluide monophasique hétérogène réactif (système matériel déformable, en mouvement).
- Equations statistiques de bilan ; le problème de la fermeture ; comparaison avec le cas de la diffusion moléculaire (aux faibles nombres de Knudsen).
- Echelles caractéristiques de turbulence (production, dissipation, ...).
- Structures d'écoulements turbulents simples en régimes établi (conduite) ou développé (plaque).
- Principes de base des différentes voies de modélisation de la turbulence : fermetures par diffusion turbulente, modèles RANS, simulation des grandes échelles, simulation numérique directe.

[Retour à la liste](#)

PROJET NUMERIQUE DE SIMULATION DES PROCÉDES

Coordonnateur(s) : Daniel Baquerisse (Orano Group)

Intervenant(s) : Daniel Baquerisse et David Bideau (Orano Group)

Code : PR3930BD

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.5

Descriptif :

Le but de ce module de simulation des procédés est de réaliser un projet numérique pour faire découvrir aux élèves par la pratique un logiciel de simulation de procédés.

Ce logiciel comporte des modèles d'appareils unitaires, une base de données thermodynamiques et des méthodes numériques de calcul, et permet de simuler, de dimensionner et d'optimiser le fonctionnement d'un procédé.

Chaque groupe de deux à trois élèves réalisera, à l'aide de ce logiciel, un projet concret qu'il aura choisi parmi un éventail de sujets industriels. Le projet sera réalisé en tenant compte des contraintes de bon fonctionnement du procédé, des contraintes économiques et des contraintes énergétiques. Finalement, le groupe aura à présenter son projet devant les enseignants responsables et devant le reste des élèves.

En parallèle, les élèves bénéficient par petits groupes d'une initiation à la simulation dynamique comportant une découverte de la modélisation dynamique d'un procédé et une ouverture vers la pratique d'un logiciel à partir d'un fichier pré-programmé.

[Retour à la liste](#)

ACTIVITES DE LABORATOIRE

Coordonnateur(s) : Hervé Duval (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : doctorants, enseignants-chercheurs et chercheurs des laboratoires LGPM, MSSMat et SPMS de CentraleSupélec

Code : PR3630AD

Durée : 30h hors contrôle

ECTS : 2.5

Descriptif :

L'objectif de ce module est d'assurer un apprentissage des techniques expérimentales et des méthodes d'analyse ou de caractérisation du génie des procédés ou des matériaux.

Chaque sujet durera 30 heures, sera traité en binôme et sera en lien direct avec le travail d'un chercheur, pour illustrer sa démarche méthodologique, de la recherche bibliographique à la conception et à la réalisation des expériences.

Les sujets pourront être dans le domaine de l'extraction liquide-liquide, de la distillation, de la fermentation pour la production de biocarburants, de la pile à combustible, de la fragilisation par les métaux liquides ou par l'hydrogène ou de la fatigue thermomécanique.

Les enseignants de ce module seront des doctorants, enseignants-chercheurs et chercheurs des laboratoires LGPM, MSSMat et SPMS de CentraleSupélec.

[Retour à la liste](#)

MINIPROJET NUMERIQUE

Coordonnateur(s) : Hervé Duval (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Hervé Duval et Mehdi Ayouz (CentraleSupélec)

Code : PR3505AA

Durée : 12h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Sur 2 jours (4 x 3h), les élèves vont modéliser et simuler un procédé en développant leur propre code de calcul. Pour ce faire, ils travailleront en petits groupes. Le procédé choisi (évaporateur à film tombant par exemple) couplera les différents types de transfert (matière, énergie et quantité de mouvement). Les étudiants développeront une démarche complète et seront donc confrontés successivement à la physique du procédé, à la recherche de données, à la modélisation mathématique, au choix des algorithmes et des schémas numériques, à la programmation en langage Python, à la mise en forme et à l'interprétation des résultats. Cet enseignement s'appuiera sur les cours de Compléments de transferts thermiques, Méthodologie en transferts thermiques, Thermodynamique et transferts de matière et Hydrodynamique physique et ouvrira sur les cours de Simulation des procédés et Mécanique des fluides numérique qui utilisent des codes de simulation commerciaux (respectivement AspenPlus et Fluent).

[Retour à la liste](#)