



CentraleSupélec

# OPTION ENERGIE

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

## PARCOURS RESEAUX D'ENERGIES : PROGRAMME PEDAGOGIQUE ET FICHES DE COURS

Le programme pédagogique du Parcours Réseaux d'Energies (RE) est détaillé dans le tableau ci-dessous. La charge horaire de ce parcours étant inférieure à celles des Parcours Energie Thermique, Procédés et Energies Fossiles, **le programme comporte un cours électif supplémentaire imposé pour les élèves-ingénieurs ECP rattachés à ce parcours.**

### PROGRAMME PEDAGOGIQUE DU PARCOURS RESEAUX D'ENERGIES

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

Obligatoire	<a href="#">Contrôle-commande des réseaux d'énergie</a>
Obligatoire	<a href="#">Méthodes numériques et optimisation</a>
Obligatoire	<a href="#">Réseaux d'énergie embarqués</a>
Obligatoire	<a href="#">Réseaux de fluides énergétiques</a>
Obligatoire	<a href="#">Réseaux électriques</a>
Obligatoire	<a href="#">Stockage d'énergie</a>
Obligatoire	<a href="#">Transferts thermiques et mécanique des fluides pour les réseaux de fluides énergétiques</a>
Obligatoire	1 cours électif supplémentaire (voir rubrique « activités communes » cours électifs »)
Obligatoire	<a href="#">Projet numérique</a>
Obligatoire	<a href="#">Activités de laboratoire</a>

### CONTROLE-COMMANDE DES RESEAUX D'ENERGIE

**Coordonnateur(s) :** Guillaume Sandou (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** Guillaume Sandou (CentraleSupélec)

**Durée :** 18h hors contrôle

**ECTS :** 2.0

## **Descriptif :**

Ce cours se propose de donner aux étudiants un aperçu relativement complet des méthodes de commande fréquemment rencontrées dans le domaine des réseaux d'énergie. Le module s'articule autour d'exposés théoriques de méthodes et de cas d'étude issus du domaine des réseaux d'énergie.

### Partie 1 : régulation continue :

Cette partie présente les techniques usuelles de régulation avec un fort accent sur le régulateur PID (Proportionnel - Intégral - Dérivé).

- Rappel des objectifs de commande
- Méthodes de réglage d'un régulateur PID
- Régulation de tendance
- Commande par modèle interne
- Commande des systèmes non linéaires (principales non-linéarités - introduction à la méthode du premier harmonique)

Cette partie est illustrée par la mise en œuvre d'une régulation cascade puissance / niveau pour un barrage hydroélectrique.

### Partie 2 : régulation numérique :

Cette partie expose des méthodes permettant l'implantation d'une commande continue à l'aide d'un régulateur numérique.

- Structure de la commande numérique
- Choix de la période d'échantillonnage
- Discrétisation et transposition de correcteurs continus

La régulation thermique d'un bâtiment illustre cette partie.

### Partie 3 : commande par variables d'état :

Le régulateur linéaire quadratique est présenté, permettant une alternative aux méthodes fréquentielles pour la synthèse de lois de commande pour les réseaux d'énergie.

[Retour à la liste](#)

---

**METHODES NUMERIQUES ET OPTIMISATION**

**Coordonnateur(s) :** Philippe Dessante (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** Philippe Dessante (CentraleSupélec), Guillaume Sandou (CentraleSupélec)

**Durée :** 18h hors contrôle

**ECTS :** 2.0

**Descriptif :**

La complexité des problèmes rencontrés par l'ingénieur, en particulier pour optimiser ses choix, fait qu'il doit souvent aller au-delà des solutions analytiques. Cet enseignement est destiné à des non-spécialistes du domaine qui pourront l'utiliser dans des applications très diverses. Il sera donc présenté des principes et des méthodes parmi lesquels l'ingénieur confronté à une application pourra aisément trouver une solution à son problème.

Thématiques abordées dans ce cours :

- Résolution des équations de la physique par les méthodes des différences finies et des éléments finis
- Techniques d'optimisation
- Rappels sur les méthodes de résolution des équations partielles
- Stabilité des schémas temporels
- Méthode des éléments finis ; nombreux exemples explicatifs mathématiques ou physiques
- Problèmes d'optimisation avec et sans contraintes
- Techniques stochastiques et directes appliquées à des cas mono et multi-objectifs
- Exemple complet d'optimisation du plan de production d'un gestionnaire énergétique

[Retour à la liste](#)

---

<b>RESEAUX D'ENERGIE EMBARQUES</b>
------------------------------------

**Coordonnateur(s) :** Jean-Claude Vannier (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** Bernard Bonafos (Airbus), François-Xavier Vallet (Renault)

**Durée :** 21h hors contrôle

**ECTS :** 3.0

**Descriptif :**

Ce cours vise à donner une vision des différentes configurations répondant à la problématique de production et de distribution d'énergie dans un système embarqué. Il aborde essentiellement les problèmes spécifiques à la gestion de l'énergie électrique dans les systèmes embarqués pour en maîtriser le dimensionnement. Il est divisé en deux parties : la première porte spécifiquement sur les systèmes électriques automobiles, et la seconde sur les réseaux d'avions. Les interventions sont accompagnées d'études de cas.

Réseau électrique de bord d'un véhicule automobile :

Ce module aborde la problématique industrielle et technique du dimensionnement en énergie électrique des organes de génération et de stockage de l'énergie électrique des véhicules automobiles. Le réseau de puissance, les organes, leurs caractéristiques : batterie, alternateur,

démarrateur. Modélisation. Fonctionnement du réseau de bord (véhicule en parking, en phase démarrage, en roulage), usages clients et dimensionnement de la génération d'énergie. Le couplage batterie-alternateur-charge pour un véhicule thermique est au cœur de ce cours.

#### Réseaux d'avions :

Identification des différents types de réseaux. Définition et caractéristiques des différents éléments constitutifs d'un réseau. Intégration du système électrique dans l'avion. Processus de validation et de vérification. Apports de la modélisation des lignes et / ou des câbles. Les mutations du secteur vers le plus et tout électrique. Description des besoins et de l'apport des équipements électriques. Le choix de la tension (AC ou DC, quel niveau ?), les contraintes et conditions de fonctionnement d'un système embarqué : stabilité du bus continu (impact de la présence d'une batterie). Fiabilité des systèmes embarqués : définition, stratégies de fonctionnement en mode dégradé (redondance, ...). Quelques éléments sont donnés sur les réseaux pneumatique et hydraulique utilisés dans les avions.

[Retour à la liste](#)

---

### **RESEAUX DE FLUIDES ENERGETIQUES**

**Coordonnateur(s) :** Marc Petit (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** Françoise Barbier (Air Liquide), Marielle Lacoste (GDF Suez), Nelly Rangod (Dalkia), Emmanuel Saron (GRTgaz)

**Durée :** 21h hors contrôle

**ECTS :** 3.0

#### **Descriptif :**

Ce cours vise à élargir la connaissance des réseaux d'énergie, en complément des réseaux électriques. Pour cela seront abordés les réseaux gaziers (gaz et hydrogène) et les réseaux de chaleur. L'objectif global est d'expliquer les architectures et modes d'exploitation de ces réseaux, en comparaison avec les réseaux électriques.

#### Réseaux de gaz :

Le cours commence par un aperçu des systèmes gaziers (cartographie des ressources, consommations et usages du gaz naturel, nouveaux gaz). Ensuite, les réseaux de transport et de distribution de gaz seront présentés avec un accent mis sur l'exploitation et la conduite. Une troisième partie abordera le gaz GNL (liquéfaction, terminaux méthaniers, transport maritime). Le cours se terminera sur quelques éléments des marchés gaziers (structure, régulation, politiques énergétiques). Une intervention plus spécifique sera consacrée à l'hydrogène et aux réseaux H2.

#### Réseaux de chaleur :

Le cours commence par la définition d'un réseau de chaleur puis par la description de ses éléments essentiels (centrales de production de chaleur, canalisations de transport et points de livraison des clients) et de l'architecture de ces réseaux. Ensuite, le réglage des réseaux au

travers des grandeurs importantes (pression, température, débit) est explicité. Les critères de dimensionnement des pompes et centrales de production seront abordés, ainsi que la question des pertes. Une étude de cas servira d'illustration.

[Retour à la liste](#)

---

### **RESEAUX ELECTRIQUES**

**Coordonnateur(s) :** Martin Hennebel (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** Martin Hennebel (CentraleSupélec)

**Durée :** 24h hors contrôle

**ECTS :** 3.0

#### **Descriptif :**

L'objectif de cet enseignement est de donner une présentation générale du fonctionnement des réseaux électriques, tant des réseaux de transport et de distribution que des réseaux isolés. Il s'agit ici d'aborder les notions fondamentales nécessaires à la compréhension du bon fonctionnement des réseaux électriques. Il s'agit aussi de comparer les réseaux continentaux et isolés afin d'en cerner les similitudes et les différences.

Thématiques abordées concernant le système électrique « terrestre » :

- Présentation du secteur de l'énergie électrique : production, consommation, architecture des réseaux (production, transport, distribution). Organisation du secteur et rôle des différents acteurs (producteurs, GRT, GRD).
- Les contraintes et conditions de bon fonctionnement d'un réseau électrique (équilibre production-consommation, réglage de la tension, réglage de la fréquence).
- La sûreté du système (rôle d'un système de protection).
- Insertion des ENR (éolien, PV et autres) : développement des ENR dans le monde, comparaison de différents pays (France, Allemagne, Danemark, Espagne), aspects législatifs.

[Retour à la liste](#)

---

### **STOCKAGE D'ENERGIE**

**Coordonnateur(s) :** Marc Petit (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** Marie-Claire Chiodaroli (Storengy), Pierre Millet (Université Paris Sud), Nelly Rangod (Dalkia), Mathieu Rouzère (EDF)

**Durée** : 15h hors contrôle

**ECTS** : 2.0

**Descriptif :**

Ce cours vise à présenter les différents systèmes de stockage utilisés pour donner de la flexibilité aux réseaux énergétiques (électricité, gaz, chaleur). Les systèmes présentés concernent des applications embarquées ou stationnaires. Le cours est décomposé en 4 interventions :

Stockage électrochimique (6h) :

Cette intervention présente succinctement les caractéristiques principales du stockage électrochimique, les différents types de batteries d'accumulateurs et leurs performances. Puis les applications dans le domaine embarqué (automobile et spatial) sont présentées avec des éléments et critères de choix. Enfin les applications stationnaires (réseaux électriques) sont évoquées.

Stockage air comprimé (3h) :

Cette intervention présente la technologie CAES (Compressed Air Energy Storage) dans sa version « gaz » (technologie mature) et dans sa version adiabatique (encore à l'état de R&D).

Stockage thermique (3h) :

Cette intervention présente les technologies de stockage thermique (eau, vapeur, solide, matériaux) et leurs caractéristiques de mise en œuvre.

Stockage gaz et CO<sub>2</sub> (3h) :

Cette intervention présente les caractéristiques du stockage en cavités géologiques.

[Retour à la liste](#)

---

<b>TRANSFERTS THERMIQUES ET MECANIQUE DES FLUIDES POUR LES RESEAUX DE FLUIDES ENERGETIQUES</b>
--

**Coordonnateur(s)** : Carolyn Jacobs (CentraleSupélec)

**Intervenant(s)** : Carolyn Jacobs (CentraleSupélec)

**Durée** : 18h hors contrôle

**ECTS** : 2.0

**Descriptif :**

Lorsqu'un fluide circule dans une conduite, il perd de la quantité de mouvement et il échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Les pertes mécaniques (dites pertes de charge) sont en général non souhaitées ; en revanche, les échanges thermiques sont, selon l'application, indésirables (par exemple dans les réseaux de fluides dont on veut maintenir la température) ou au contraire fortement exaltés (par exemple dans les échangeurs de chaleur). Ce cours a

pour ambition de présenter les notions élémentaires de mécanique des fluides et de transfert thermique concernant les écoulements de fluides énergétiques (principalement dans des conduites) et d'introduire les outils qui permettront aux étudiants de faire de premiers calculs de dimensionnement sur ces écoulements. A l'issue de cet enseignement, les étudiants pourront par exemple calculer, pour une canalisation de longueur, de section et de niveau d'isolation thermique donnés, et pour un fluide de nature et de débit donnés, la différence de température du fluide entre son entrée et sa sortie ainsi que la perte de charge (i.e. la chute de pression) qu'il subit ; ils auront également les connaissances de base pour pouvoir dimensionner un échangeur de chaleur selon un cahier des charges donné.

Les différentes thématiques suivantes seront couvertes par cet enseignement :

- Bilans macroscopiques de masse, chaleur et quantité de mouvement pour les systèmes 1D
- Phénoménologie des transferts thermiques - Conduction - Convection - Echange conducto-convectif à une paroi - Rayonnement
- Analogie électrique (transferts thermiques linéaires et stationnaires)
- Approximation de l'ailette
- Convection forcée externe et interne - Analyse dimensionnelle - Nombres adimensionnés caractéristiques - Corrélations de convection forcée - Calcul du coefficient de transfert
- Dimensionnement d'échangeurs de chaleur - Notion de différence de température moyenne logarithmique

Chacune des 6 séances de 3h de ce cours sera constituée d'une partie de cours puis d'un TD de mise en application. Le contrôle des connaissances, d'une durée totale de 3h, comportera 2 parties distinctes, l'une spécifique à la mécanique des fluides et l'autre spécifique aux transferts thermiques.

[Retour à la liste](#)

---

### **PROJET NUMERIQUE**

**Coordonnateur(s) :** Marc Petit (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** plusieurs enseignants-chercheurs de CentraleSupélec-Gif qui supervisent le travail

**Durée :** 15h hors contrôle

**ECTS :** 1.0

**Descriptif :**

Le projet numérique permet de mettre en application des méthodes et modèles pour l'étude de systèmes en lien avec les cours des Parcours RE et SE.

Les travaux seront l'occasion d'utiliser des outils de modélisation et simulation tels que Matlab, Matlab / Simulink, ou des logiciels de résolution par éléments finis.

Les projets seront proposés par des enseignants-chercheurs du Département Energie de Supélec et seront traités en binômes.

La répartition des sujets se fera à l'occasion de la première séance, puis les étudiants prendront contact avec l'encadrant référent.

[Retour à la liste](#)

---

### **ACTIVITES DE LABORATOIRE**

**Coordonnateur(s) :** Marc Petit (CentraleSupélec)

**Intervenant(s) :** Micheline Vidal, François Protat et d'autres enseignants du Département Energie de CentraleSupélec-Gif

**Durée :** 24h contrôle inclus

**ECTS :** 1.0

**Descriptif :**

Six séances de laboratoire sont proposées pour mettre en application certains éléments fondamentaux des systèmes électrotechniques de base. Un compte-rendu de TP est à rendre à la fin de chaque séance.

Les sujets abordés seront les suivants : systèmes triphasés, transformateur monophasé, machine synchrone, machine asynchrone, machine à courant continu, redresseurs de tension.

Les travaux se font en binômes ou en trinômes.

[Retour à la liste](#)

---