

Programme de la formation

Mastère Spécialisé Nouvelles Technologies de l'Energie

PROGRAMME DETAILLE

UE 1 Harmonisation (71 h)

Responsables : C. Azzaro – H. Schneider

- Mise à niveau en Procédés
 - Thermodynamique et transferts
- Mise à niveau en Electricité
 - Circuits électriques et réseaux
 - Conversions statique
 - Conversion électromécanique

Connaissances et Capacités

Les bases de l'énergie, du génie des procédés et de l'électricité nécessaires au bon déroulement de la formation

Contenu du cours- Syllabus

L'harmonisation est proposée en début de semestre pour une remise à niveau des étudiants provenant d'horizons très différents. Sont ainsi revus :

Les bases des circuits électriques continus ou alternatifs monophasés et triphasés.

Les différentes structures de l'électronique de puissance (Hacheur, Onduleur, redresseur)

Les différentes machines électromagnétiques (moteur à courant continu, machine synchrone, machine asynchrone)

Les bases de la thermodynamique (1^{er} et deuxième principe, propriétés des corps purs, machine énergétique cyclique)

Les Transferts de chaleur et de matière

Ouvrages de Référence

Systematic Methods of Chemical Process Design, Lorenz T. Biegler / Ignacio

E.Grossmann / Arthur W. Westerberg

Editeur Pearson ISBN 0134924223

Electrotechnique T Wildi G Sybille Editeur De Boeck ISBN 2-8041-4892-0

UE 2 Conception systémique (74h30)

Responsables : C. Azzaro-Pantel – E. Carrera-Guillarte

Module 1 : Chaîne logistique « Hydrogène » - 31 h

Intervenants : C. Azzaro-Pantel, E. Carrera-Guillarte

Connaissances et Capacités

- Connaître les principes de modélisation d'un système énergétique (chaîne logistique) : Approches de modélisation ascendante (bottom-up) en ingénierie vs descendante (top-down) en économie
- Appliquer ces principes au cas de la chaîne logique de l'hydrogène (multi-procédés, multi-acteurs, multi-objectifs, multi-usages)
- Comprendre le rôle de la modélisation prospective dans le processus de déploiement de chaînes logistiques énergétiques
- Comprendre et analyser les principaux résultats des modèles énergétiques
-

Contenu du cours- Syllabus

- Modélisation et optimisation de chaînes logistiques « énergie »
 - Principes de modélisation d'une chaîne logistique « énergie »
 - Classification des modèles énergétiques : modèles descendantes (top-down), ascendantes (bottom-up) et hybrides
 - Prise en compte de l'aspect multicritère
- Illustration dans un **bureau d'études de conception d'une chaîne « hydrogène »**
 Utilisation d'un modèle existant
 Analyse de scénarios de déploiement (production centralisée / décentralisée)
 Calcul de LCOE, du potentiel de réchauffement climatique

Ouvrages de Référence

Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan, Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Crettaz, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes

Module 2 : Ecoconception et Analyse du Cycle de Vie – 18 h 30

Intervenants : C. Azzaro-Pantel – V. Jacquot

Connaissances et Capacités

- Intégrer une approche d'éco-conception dans la conception de systèmes énergétiques ;
- Identifier les étapes de la méthodologie Analyse de Cycle de Vie ;
- Etre capable d'analyser et de critiquer une analyse de cycle de vie déjà réalisée ;
- Savoir appliquer la méthode d'analyse de cycle de vie sur l'étude d'un système énergétique

Contenu du cours- Syllabus

1. Conception et Analyse de Procédés et Systèmes Énergétiques Intégrant des Critères de Développement Durable

Formulation du problème : Identifier les enjeux et les objectifs de conception des systèmes énergétiques en tenant compte des critères de développement durable.

- **Métriques de Développement Durable** : Comprendre les indicateurs clés pour évaluer la durabilité des systèmes énergétiques, en intégrant des dimensions économiques, environnementales et sociales
- **Formulation de critères économiques pertinents pour les systèmes énergétiques (concept de LCOE)** : Savoir appliquer des critères économiques, tels que le **LCOE (Levelized Cost of Energy)**

2. Introduction à l'écococonception l'ACV

Principes fondamentaux et cadre normatif (ISO 14040/44)
Intérêt de l'ACV pour les systèmes énergétiques

3. Méthodologie et Étapes de l'ACV

Définition des objectifs et du champ de l'étude

Définition des objectifs et du périmètre
Fonction du produit ou du système
Unité fonctionnelle et flux de référence
Arbre des processus et exemples d'application

Inventaire des émissions et des extractions

Méthode de réalisation d'un inventaire
Bases de données d'inventaire (ex. : EcolInvent)

Analyse des impacts environnementaux

Méthodes de caractérisation des impacts
Catégories d'impacts et indicateurs clés

Interprétation et analyse critique des résultats

Influence des choix de modélisation sur les résultats
Identification des limites et des incertitudes
Comparaison de scénarios et recommandations
Identification des principaux enjeux environnementaux liés aux technologies énergétiques actuelles et émergentes
Analyse des bénéfices environnementaux liés à l'intégration des systèmes énergétiques sur l'ensemble de la chaîne de valeur

Programme et contenu du Bureau d'étude :

1. **Mise en œuvre d'une analyse de cycle de vie** appliquée à un système énergétique (ex. : panneaux photovoltaïques, éoliennes)
2. **Utilisation du logiciel SimaPro** pour la modélisation et l'évaluation des impacts environnementaux
3. **Restitution des résultats** sous forme d'un rapport écrit respectant le cadre de l'ACV et d'une présentation orale

Ouvrages de Référence

Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan, Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Crettaz, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes

Module 3 : Optimisation de procédés et systèmes énergétiques – 14 h 30

Intervenant : C. Azzaro-Pantel,

Connaissances et Capacités

Les problématiques d'optimisation revêtent une importance croissante dans les systèmes énergétiques. Ce cours a pour objectif de permettre aux étudiants d'acquérir une maîtrise des différentes méthodes d'optimisation appliquées à la conception et à l'exploitation de ces systèmes, avec une attention particulière portée sur les approches **multi-objectifs**. En effet, les critères d'optimisation tels que les coûts, l'efficacité énergétique et les indicateurs environnementaux sont souvent contradictoires, rendant ainsi la prise de décision particulièrement complexe.

Le cours introduit également des outils d'**Aide à la Décision Multicritères (MCDM)**, permettant de sélectionner une solution parmi un ensemble de solutions « optimales », offrant ainsi un cadre structuré pour résoudre les problèmes complexes auxquels les systèmes énergétiques sont confrontés.

Contenu du cours- Syllabus

- **Identification des problèmes d'optimisation multi-objectifs** : Exemples de décisions et de critères dans l'optimisation des systèmes énergétiques.
- **Présentation des principales méthodes d'optimisation multi-objectifs** : Introduction aux approches d'optimisation et d'aide à la décision adaptées aux systèmes énergétiques.
- **Identification des stratégies d'optimisation pertinentes** : Sélection des approches appropriées en fonction des spécificités d'un problème donné.
- **Formulation des critères d'optimisation** : Définition des critères techniques, économiques et environnementaux pour l'optimisation des systèmes énergétiques.

- **Étude de cas en bureau d'études** : Analyse d'un système de cogénération chaleur-électricité par une turbine à gaz, avec formulation du problème, optimisation multi-objectifs et prise de décision basée sur des critères techniques, économiques et environnementaux.

Ouvrages de Référence

Optimisation multiobjectif 2002, Y. Collette, P. Siarry

Module 4 : Le Bond Graph Causal : un outil efficient pour la conception des systèmes énergétiques – 10 h 30

Intervenant : A. Jaafar

Connaissances et Capacités

Notions élémentaires en physique (éléments sur la puissance et l'énergie) en électricité (formalisme circuit), en mécanique et hydraulique. Connaissances élémentaires en électronique de puissance (convertisseurs DC DC) et en conversion électromécanique.

Contenu du cours- Syllabus

Part A : concepts théoriques de base des Bond Graphs
concepts généraux pour la modélisation pour les systèmes énergétiques multiphysiques ;
Eléments et composants de base des Bond-Graphs ;
Construction de Bond Graphs en électricité, mécanique and hydraulique ;
Exemples multidisciplinaires: EHA (Electro-Hydraulic Actuator), Générateur Photovoltaïque
Propriétés Causales des Bond Graphs : sens physique des couplages énergétiques, vision mathématique et Automatique ;
Du Bond Graph causal à l'analyse des systèmes : établissement formalisé d'une fonction de transfert à partir des chemins causaux

Part B. Applications : le Bond Graph en "electrical engineering"
Modèle à granularité variable de cellules de commutation et de convertisseurs statiques en électronique de puissance
Modèles pour la conversion électromécanique (machines électriques)
Exemples de systèmes en electrical engineering : systèmes hybrides à énergies renouvelables

Ouvrages de Référence

X. Roboam & al, "Conception systémique pour la conversion d'énergie électrique ¹, Gestion, analyse et synthèse", paru Septembre 2012 aux éditions Hermes, ISBN 978-2-7462-3192-4
G. Dauphin-Tanguy, Les Bond Graphs, édition Hermès, Paris, 2000

UE 3 Smart-grids, stockage et vecteur hydrogène (40h15)

Responsables : A. Jaafar, L. Montastruc

Module 1 : Hybridation énergétique des systèmes – 19 h 15

Intervenant : A.Jaafar

Connaissances et Capacités

Connaître les architectures des systèmes énergétiques hybrides.
Connaître les caractéristiques énergie/puissance des sources d'énergie.
Etre capable d'analyser une mission d'un système énergétique et de juger sur l'intérêt de son hybridation.
Savoir concevoir et dimensionner un système hybride
Proposer une stratégie de gestion d'énergie permettant de respecter les performances énergétiques des sources d'énergie d'un système hybride.

Contenu du cours- Syllabus

A la fin du cours, l'étudiant connaît les architectures des systèmes hybrides et les caractéristiques énergie/puissance des sources et des éléments de stockage de l'énergie.

Il sera capable d'analyser la mission d'un système énergétique, de juger sur la pertinence de son hybridation et de concevoir et dimensionner un système hybride.

L'étudiant sera également capable de proposer une stratégie de gestion d'énergie d'un système énergétique multi-sources en respectant les caractéristiques intrinsèques des sources associées.

En plus des théories relatives à l'hybridation et à la gestion d'énergie des systèmes multi-sources, le cours est basé sur plusieurs exemples de systèmes énergétiques hybrides issus du retour d'expérience du laboratoire Laplace dans ce domaine de recherche. Ces exemples concernent en particulier le domaine de transport (l'aéronautique, le ferroviaire et le routier).

Le cours est accompagné d'un Bureau d'étude et de recherche qui consiste à alimenter un EHA (actionneur électrohydrostatique) d'un Airbus 320 par un système énergétique hybride : pile à combustible associée à un supercondensateur. L'étudiant est amené à évaluer l'intérêt de l'hybridation, dimensionner les sources d'énergie/puissance et appliquer une stratégie de gestion d'énergie permettant de respecter les caractéristiques dynamiques des sources.

Ouvrages de Référence

Frederic P. Miller , Automobile Hybride: Véhicule, Moteur thermique, Moteur électrique, Pile à combustible, Supercondensateur, Batterie d'accumulateurs, Biocarburant ; octobre 2010.

Amine Jaafar, « Sizing and Energy Management of a Hybrid Locomotive Based on Flywheel and Accumulators », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, n°8, pp. 3947 – 3958, October 2009.

Olivier Langlois, Conception d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique, Thèse INP Toulouse 2006.

Amine Jaafar, Energy management of a hybrid system based on a fuel cell and a Lithium Ion battery: experimental tests and integrated optimal design, Math. Comput. Simulation, 2016.

Module 2 : Réseaux électriques décentralisés, embarqués – 14 h

Intervenant : N. Roux

Connaissances et Capacités

- Connaître les critères caractéristiques (sécurité, stabilité...) d'un réseau électrique embarqué ou décentralisé par rapport à un réseau de distribution classique.
- Appréhender les éléments principaux (stockage...) utilisés dans le dimensionnement d'un tel réseau.
- Proposer différentes architectures de réseaux par rapport à un cahier des charges donné.
- Savoir lire un schéma électrique complet d'une installation photovoltaïque en étant capable d'identifier les différents appareillages nécessaires ainsi que leur fonction et dimensionnement.

Contenu du cours- Syllabus

1. Sécurité et fiabilité
 - Concepts liés (ségrégation défaut, reconfiguration, réseau de secours, ...)
 - Exemple d'un réseau aéronautique
2. Profil de mission à remplir
 - Intérêt de l'hybridation des sources afin d'optimiser leur utilisation
 - Utilisation du plan de Ragone dans le dimensionnement d'éléments de stockage
3. Qualité (réseau AC et DC)
 - Définition des normes de qualité (courant, tension)
 - Solutions d'amélioration de la qualité
4. Stabilité (réseau AC et DC)
 - Structure et fonctionnement des réseaux électriques AC
 - Principes des réglages de fréquence et de tension sur les réseaux (primaire, secondaire, ...)
 - Limitation de puissances des lignes de transport
 - Instabilité liée aux interactions filtres-systèmes régulés
5. Problèmes CEM

- Types de couplage
- Mesures des perturbations et moyens de protection
- Enjeux de la CEM pour les réseaux électriques
- Problématique de la foudre
- 6. Etude des installations PV raccordées au réseau de distribution
 - Définitions des appareillages électriques et des classes de protection
 - Schéma de liaison à la terre en BT
 - Parafoudres
 - Etude d'exemples de schéma d'installations

Ouvrages de Référence

T. Christen et M. W. Carlen, « Theory of Ragone plots », Journal of Power Sources 91, pp. 210-216.

O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse ENS Cachan, 2002.

Module 3 : Les Smart grids : des réseaux électriques intelligents – 7 h

Intervenant : X. Roboam

Connaissances et Capacités

Notions élémentaires en physique (éléments sur la puissance et l'énergie) en électricité (réseaux électriques). Connaissances élémentaires en électronique de puissance.

Contenu du cours- Syllabus

- I. Emergence des smart grids : évolution et contexte
 1. Fonctionnement actuel des réseaux électriques: rappels
 2. Des réseaux électriques en pleine mutation
 3. Emergence du concept de smart grids
 4. Principaux verrous des smart grids
- II. Les services systèmes et services au réseau
 1. Rappel des principes de réglage des producteurs et des réseaux électriques actuels
 2. Les services réseaux et systèmes
 - dans les réseaux continentaux
 - dans les réseaux insulaires
- III. Nouveaux degrés de liberté :
 1. Le stockage, pour compenser l'intermittence de production, consommation
 2. L'intégration de la mobilité électrique: concept vehicle to grid (V2G) ; grid to vehicle (G2V)
 3. Les outils de prédictions pour la production (vent, irradiation) et la consommation
 4. Concepts de base pour la gestion des réseaux de distribution (GRD)
 5. Nouveaux concepts pour la gestion des réseaux de transport (GRT): lignes virtuelles
- IV. Les mécanismes de marchés et de régulation (en bref)
- V. Nécessité d'une vision technico économique
- VI. Les smart grids « démarrent » dans les réseaux insulaires
- VII Les microréseaux, smart home, compteur communicant

Ouvrages de Référence

Smart Grids, les réseaux électriques intelligents, ss la direction de N. Hadj Said et J.C Sabonnadière, éditions Hermes, EGEM Génie Electrique, ISBN 978 2 74622594 7

B. Robyns & Al, "Gestion et valorisation du stockage de l'énergie dans les réseaux électriques", édition ISTE, 2015, ISBN 978-1-78405-069-6

UE 4 Vecteur Hydrogène 52h20

Module 1 : Electrochimie – 18 h 20

Intervenant : H. Vergnes

Connaissances et Capacités

Acquérir les bases de l'énergétique et de la cinétique électrochimique
Comprendre le fonctionnement des générateurs électrochimiques

Contenu du cours- Syllabus

- Introduction : Grandeurs mesurables dans une chaîne électrochimique. Deux siècles de développement de l'électrochimie.
- Les chaînes électrochimiques à l'équilibre. Force électromotrice. Potentiel d'électrode. Loi de Nernst. Générateurs primaires, secondaires, piles à combustible. Capacité, rendement.
- Les chaînes électrochimiques traversées par un courant : Transfert électronique hétérogène. Couplage du transfert électronique hétérogène et des phénomènes de transport en solution. Les divers régimes cinétiques. Loi de Butler-Volmer. Intensité limite.
- Applications à la mise au point de procédés électrochimiques de synthèse. Applications à la corrosion. Applications à l'étude du fonctionnement des générateurs (charge, décharge).
- Aperçu sur les diverses méthodes électrochimiques. Potentiostat.

Ouvrages de Référence

A. J. BARD et L.R. FAULKNER. *Electrochimie : Principes, méthodes et applications*. MASSON

Module 2 : Piles à combustible et Applications de l'hydrogène – 24 h 30

Intervenant : Christophe Turpin

Connaissances et Capacités

Technologies des piles à combustible

Caractérisations par polarisation $V(I)$ et spectroscopie d'impédance

Modélisation petits signaux et larges signaux des piles à combustible

Applications transport et stationnaire

Contenu du cours- Syllabus

Le bureau d'étude et de recherche est axé sur la pile à combustible et consiste en :

Evaluer deux méthodologies complémentaires de caractérisation expérimentale :

- Tracé dynamique de courbe tension-courant.
- Spectroscopie d'impédance.

Paramétrer un modèle dynamique de pile PEM à partir de ces caractérisations expérimentales effectuées.

Evaluer le comportement dynamique de la pile PEM face à des perturbations générées par la connexion de convertisseurs statiques.

Ouvrages de Référence

J. Larminie et A. Dicks, « Fuel Cell Systems Explained », Wiley, 2000.

J. P. Diard, B. L. Gorrec et C. Montella, « Cinétique électrochimique », Hermann, Paris, 1996.

Module 3 : Production hydrogène – 5 h 30

Intervenant : Santiago Suarez

Contenu du cours- Syllabus

Ce petit module de cours est dédié à la production d'hydrogène bas carbone par électrolyse, il aborde :

- Le marché mondial de l'hydrogène et les moyens de production conventionnels
- Les différentes technologies de production d'hydrogène vert par électrolyse
- La caractérisation et la modélisation des électrolyseurs d'eau
- L'alimentation électrique et les auxiliaires d'un système d'électrolyse
- Un calcul technico-économique du coût de l'hydrogène vert

Ouvrages de Référence

MC Péra, D. Hissel, H Gualous, C. Turpin Electrochemical components WILEY ISTE

J. P. Diard, B. L. Gorrec et C. Montella, « Cinétique électrochimique », Hermann, Paris, 1996.

Module 4 : Stockage de l'hydrogène – 4 h

Intervenant : JP Torré

Connaissances et Capacités

- Connaître les différentes technologies utilisées pour le stockage de l'hydrogène
- Connaître les avantages et les inconvénients de chaque technologie de stockage
- Comprendre les risques liés à l'hydrogène et au mode de stockage utilisé
- Comprendre quelles technologie de stockage utiliser en fonction de l'application visée

Contenu du cours- Syllabus

- Introduction et concepts de base (rappels)
- Stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse
- Stockage de l'hydrogène sous forme liquide (LH2)
- Stockage solide de l'hydrogène par absorption (Hydrures)
- Stockage solide de l'hydrogène par adsorption (adsorbants)
- Stockage de l'hydrogène dans les liquides organiques (LOHC)
- Stockage de l'hydrogène dans le sous-sol
- Risques associés à l'hydrogène
- Ouverture sur le mode de la recherche (technologies en rupture)

UE 5 Energies Renouvelables Electriques (50 h 45)

Responsable : G. David

Module 1 : Installations hydroélectriques de faible puissance – 8 h 45

Intervenant : G. David

Connaissances et Capacités

Connaitre les différents ouvrages et différentes solutions techniques mises en œuvre pour des centrales hydrauliques inférieures à 12 MW

Savoir conduire un prédimensionnement technico-économique d'une petite centrale

Contenu du cours- Syllabus

L'hydroélectricité : différents types d'ouvrages

Les barrages, leur classement et leur surveillance

Les différentes turbines et le choix en fonction des caractéristiques de l'ouvrage

L'hydrologie d'un aménagement, les ouvrages de prise d'eau, d'amenée et de restitution, les turbines et la puissance disponible, les impacts environnementaux et leurs mesures de réduction. Réglementation à appliquer.

Organisation et législation de la production hydraulique en France, contrats d'obligation d'achat

Prédimensionnement technico-économique d'une centrale (BE

Visite du site de production EDF Bazacle

Ouvrages de Référence

L'énergie hydraulique - Roger Ginocchio, Pierre Louis Viollet - Collection EDF RetD - Edition TEC et Doc - Lavoisier

Mini-centrales hydroélectriques - Pierre Lavy - EYROLLES Environnement

Module 2 : Photovoltaïque - 24 h 30

Intervenant : Henri Schneider

Connaissances et Capacités

Connaître le principe de valorisation de l'énergie solaire photovoltaïque en relation avec le gisement, la conversion PV et les systèmes PV.
Savoir concevoir et dimensionner une installation PV pour un cahier des charges donné.
Connaître les modalités de calcul des indicateurs économiques et positionner les solutions dans le contexte français CRE (Commission de Régulation de l'Energie)

Contenu du cours- Syllabus

I L'énergie solaire : contexte et généralités

II La conversion photovoltaïque :

Le rayonnement dans l'espace, sur Terre, masse atmosphérique

Principes physiques, cellule à jonction PN, caractéristique, influence éclairément et T

Matériaux et technologies des cellules photovoltaïques

III De la cellule au générateur photovoltaïque, modularité

Associations de cellules, mise en série, en parallèle, déséquilibres et protections

Modélisation, simulation, commande MPPT

IV Systèmes photovoltaïques

Problématique, architectures, gestion de l'énergie (raccordé, isolé, stockage, ...)

Production énergétique, gisement solaire, caractérisation, dimensionnement, ACV

Systèmes raccordés au réseau

Systèmes autonomes non raccordés

V Calculs économiques : taux d'actualisation, inflation, TRI, LCOE, ...
Les mécanismes d'aides : tarifs de rachat, compléments de rémunération.

Ouvrages de Référence

PHOTOVOLTAICS Fundamentals, technology and practice
Konrad Mertens WILEY Editions ISBN 978-1-118-63416-5

Techniques de l'ingénieur D3935 Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule - Stephan Astier

Techniques de l'ingénieur D3936 Conversion photovoltaïque : de la cellule aux systèmes - Stephan Astier

Sites Internet : EPIA (www.epia.org), PV resources (www.pvresources.com), Observ'ER (www.energies-renouvelables.org), INES (www.institut-solaire.com)

Module 3 : Systèmes éoliens – 17 h 30

Intervenant : X. Roboam

Connaissances et Capacités

Connaissances de bases nécessaires en physique énergétique (notions énergie/puissance), notions élémentaires en électricité et en conversion électromécanique (notions élémentaires sur la génération électrique).

Contenu du cours- Syllabus

1. Historique, contexte, marchés de l'aérogénération électrique éolienne. Principaux acteurs du marché ; éléments de développement et de frein à l'expansion de la filière. Eléments de coûts et de développement d'un parc éolien.
2. Caractérisation de la ressource éolienne (le vent), effets d'altitude et de sillage, éléments théoriques (limite de Betz) sur le productible éolien et sur l'efficacité énergétique des aérogénérateurs ; du contrôle mécanique par réglage des pâles aux zones de fonctionnement du démarrage à l'arrêt en sécurité.
3. Constitution des aérogénérateurs électriques : nacelles avec et sans multiplicateur de vitesse ;
4. éléments de conception des chaînes éoliennes selon leur taille et leur technologie ; mini TD ;
5. Analyse transitoire et réglage stable du point de fonctionnement dans le plan couple vitesse ;
6. Principales architectures de conversion de puissance des chaînes asynchrones et synchrones respectivement avec et sans multiplicateur, avec et sans électronique de puissance ;

Ouvrages de Référence

B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'ingénieur D3960, Novembre 2004

B. ROBYNS, A DAVIGNY, B. FRANCOIS, A HENNETON, J SPROOTEN, "*Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables*", Hermès Sciences Publications-Lavoisier, ISBN. 978-2-7462-2489-6, 5-2012

UE 6 Energies Renouvelables non electriques (44 h 20)

Module 1 : biocarburants et systèmes bioénergétiques – 22 h 20

Intervenants : M. Alliet-Gaubert, C. Joannis Cassan

Connaissances et Capacités

- Connaître les différents biocarburants et leur filière de fabrication
- Connaître l'état des lieux de la filière
- Comprendre, à travers plusieurs exemples, comment la recherche et l'innovation peuvent apporter des solutions pour renforcer l'intérêt des filières biocarburants
- Recherche bibliographie
- Capacités de synthèse, discrimination
- Présentation orale et capacité de persuasion

Contenu du cours- Syllabus

Introduction sur les biocarburants :

- Définition, les grandes familles, classification et Propriétés
- Situation Mondiale, Européenne, Française
- Bilans Environnementaux et Economique
- Législation et ouverture sur l'emploi

Filière bioéthanol 1^{ère} génération:

- Propriétés et utilisations de l'éthanol carburant
- Procédé de production par filière : Schéma général, fermentation, préparation des matières premières, séparation de l'éthanol, perspectives d'amélioration
- Bilans énergétique et environnemental
- Développement de la filière (France, Europe, Monde)

Le biodiesel :

- Données générales : Physico-chimie, normes, rappel sur les production mondiales et européennes, sites de productions

- les matières premières et leur préparation.

Chimie et procédés, catalyse basique (Lurgi), hétérogène (EsterFIP), ouverture vers procédé HVO

Le biogaz :

- Généralités et Production : Biogaz, GNV, Biogaz-carburant
- Transformations biologiques et Procédés
- Bilans environnementaux et économique en comparaison des autres utilisations

Les systèmes énergétiques biocatalysés: biopiles et électrolyseurs microbiens

- Contexte historique : de la recherche à la réalité économique pour des marchés de niche
- Deux familles de biopiles:
 - o Les piles microbiennes
 - o Les piles enzymatiques
- Production d'hydrogène par électrolyse microbienne

Le rôle de la recherche dans la production et l'utilisation du bioéthanol et du biodiesel, en relation avec les aspects énergétiques et environnementaux

- Introduction sur les enjeux des filières biocarburants
- Le rôle de la recherche pour la production de bioéthanol
 - o Les biocarburants « deuxième génération »
 - o Innovation dans le domaine des procédés de production
 - o Concept de bioraffineries
- Le rôle de la recherche pour la production de biodiesel
 - o Innovation en matière de raffinage et de transformation des huiles végétales
 - o Diversification des matières premières
 - o Adéquation entre motorisation et carburants oxygénés
- Bilans énergétiques et environnementaux

Evaluation :

Projet bibliographique par groupe autour d'une problématique spécifique des biocombustibles tels que : la réduction des GES et autres polluants pour le bioéthanol, l'utilisation des terres agricoles pour la production de bioéthanol, le biodiesel produit à partir du procédé HVO, la compréhension des différents critères énergétique pour les carburants appliqué au bioéthanol de blé et au biodiesel de colza, le biogaz : quelle utilisation ? pour quelles raisons ?

Présentation des résultats sous forme de présentation orale

Module 2 : Valorisation biomasse Haute Température – 15 h

Intervenant : NZIHOU Ange

Objectif : Apporter des connaissances sur la phénoménologie de la conversion de la biomasse en vue du dimensionnement de réacteurs de vapogazéification.

Connaissances et Capacités

Apporter des connaissances sur la phénoménologie de la conversion de la biomasse en vue du dimensionnement de réacteurs de vapogazéification.

Contenu du cours- Syllabus

- **Problématique politique/économique/sociale/stratégique**
 - nouvelles énergies
 - énergie renouvelable
 - avenir des énergies fossiles ?
 - énergie "propre" (cycle du CO₂)
 - indépendance énergétique
- les voies de valorisation de la biomasse
 - pyrolyse lente basse T : bio -> liquide
 - pyrolyse rapide haute T : bio -> gaz+charbon
 - pyrolyse très haute température : bio -> gaz
- Généralités sur les procédés de conversion
 - Aspect technologique
 - filières (gaz, liquide, bases carburants, ...)
 - exemples de procédés
- **Phénoménologie de la conversion de la biomasse**
 - définition de la biomasse
 - les réactions, généralités
 - espèces mises en jeu
 - enthalpies de réaction => endothermicité => problématique de l'apport de la chaleur (combustion d'un résidu ou apport externe par combustion ou électrique)
 - la pyrolyse et la vapogazéification à haute température
 - espèces mises en jeu

- les réactions, détails
- la thermo
- comparaison aux résultats expérimentaux
- la cinétique
 - la catalyse
- bilan énergétique

- **les réacteurs à lit fluidisé pour la mise en œuvre de la vapogazeification de la biomasse**
 - introduction a la fluidisation
 - description des différentes approches de modélisation
 - l'approche corrélative GC
 - l'approche locale CFD
 - résumé des corrélations essentielles pour le prédimensionnement des réacteurs a lits fluidisés
 - méthode de prédimensionnement des réacteurs
- BER : exemple sur un procédé de conversion du bois en gaz
- description générale
- bilan enthalpique
- prédimensionnement des zones réactionnelles

Ouvrages de Référence

Phénomènes de transfert en génie des procédés Jean Pierre Couderc Christophe Gourdon, Alain Liné Edition Tech et Doc Lavoisier

Module 3 : Chaleur renouvelable – 7 h

Intervenant : C. Azzaro-Pantel

Contenu du cours- Syllabus

1. Introduction à la chaleur renouvelable

- 1.1. Définition et enjeux de la chaleur renouvelable
- 1.2. Bilan énergétique et part de la chaleur dans la consommation finale
- 1.3. Politiques et réglementations (européennes, françaises)
- 1.4. Comparaison avec les sources conventionnelles de chaleur

2. Les ressources de chaleur renouvelable

- 2.1. Solaire thermique
- 2.2. Biomasse et bioénergies thermiques
- 2.3. Géothermie
- 2.4. Chaleur fatale et récupération d'énergie

3. Évaluation technico-économique et impact environnemental

4. Études de cas et applications industrielles

Ouvrages de Référence

Panorama des chaleurs renouvelables

<https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/basedoc/panorama-chaleur-2020-web.pdf>

UE 7 Formation générale (81 h) + Projet long (60h)

Responsables : N. Roux – C. Azzaro

Module 1 : Journées thématiques Energies et développement durable – 60 h

Intervenants : industriels/chercheurs

Connaissances et Capacités

Disposer d'une connaissance élargie des enjeux de l'énergie et de la transition énergétique

...

Contenu du cours- Syllabus

Au-delà des enseignements sur les énergies renouvelables (Photovoltaïque, éolien, biogaz,...), au cœur de notre formation Nouvelles Technologies de l'Energie, nous souhaitons donner aux étudiants une vision élargie des problématiques et enjeux de l'énergie. Pour cela nous faisons appel à des industriels spécialistes des différents domaines. Ils interviennent une journée ou une demi-journée, les étudiants font un résumé de l'intervention qui est évalué.

Exemples de journées thématiques :

JT : Enjeux de la transition énergétique : ASTIER Stephan, Professeur émérite, Toulouse INP

JT : PV : CAUSSAT-BONNANS Brigitte

JT : Piles microbiennes

BASSEGUY Regine

JT : Piles microbiennes

BASSEGUY Regine, CNRS

JT : Procédés de Capture CO2

ALIX Pascal, IFPEN

JT : Energie Nucléaire

LATGE Christian, CEA

JT : Acceptabilité sociétale des énergies renouvelables

VERVIER Philippe Acceptable Avenirs

JT : Ecologie Industrielle

Marianne Boix, Ludovic Montastruc

JT : Aspect économique de l'énergie

LAFFORGUE Gilles, Toulouse Business School

JT : Analyse économique du marché de l'électricité

LEROYER Yvonne, Communauté de communes du Pays Basque

JT : Biogaz

PRIAROLLO Jeremie, Solagro

JT : Habitats

CAPITAINE Loic, Ecozimum

Nous effectuons également des visites de sites industriels pour illustrer les différents enseignements

Site de production Eolien Photovoltaïque Ville franche de Lauragais

Site de production hydroélectricité Le Bazacle Toulouse

Plateforme Smart ZAE SCLE INEO démonstrateur smart grids

Site de traitement des déchets et production biogaz Clerverts , Organic Vallée

Module 2 : Anglais – 21 h

Intervenant : Alexandra Hull

Connaissances et Capacités

Oral and written comprehension, production and interaction tasks
Key communication skills and human skills for professional purpose

Contenu du cours- Syllabus

The English and soft skills programme consist of 4 specific assignments per semester designed to develop language, communication and human skills for professional purpose.

INDIVIDUAL SCIENTIFIC PRESENTATIONS

Objective : to further develop and improve professional communication skills including:

- how to structure a presentation
- how to find ONE message that has impact for your audience
- how to create a storyboard and design simple and high impact slides
- how to connect with your audience by learning the importance of body language
- how to adapt a presentation to different audiences
- how to speak in "conversation" mode rather than "presentation" mode

Presentation input & teaching

Structuring a presentation and finding ONE clear message for the audience

Creating a storyboard and designing high impact slides

Body language & connecting with your audience

Module 3 : Soutenances de Projets longs et projets de fin d'études – 60 h

Connaissances et Capacités

Savoir résoudre un problème énergétique à l'aide des outils méthodologiques présentés pendant le semestre
Savoir travailler en équipe en prenant en compte le facteur humain
Savoir prendre en compte le facteur humain dans les projets techniques

Contenu du cours- Syllabus

A la fin du semestre théorique nous proposons aux étudiants de travailler en autonomie sur des projets industriels. C'est l'occasion pour eux de se placer dans le rôle d'un porteur de projet et de mettre en application l'ensemble des connaissances acquises au cours du semestre.

L'organisation en équipe projet permet de sensibiliser aux dimensions humaines et organisationnelles des projets.

Nous faisons intervenir à cette occasion des ergonomes qui incitent les élèves ingénieurs à avoir un regard global sur les projets qu'ils mènent et mèneront en appréhendant les dimensions humaines et organisationnelles, qui font partie intégrante de la dimension technique qu'ils ont à travailler.

Il s'agit d'amener les élèves à porter un regard critique/réflexif sur les pratiques du métier d'ingénieur, sa responsabilité individuelle et sociétale et sa capacité d'écoute et d'observation.

DATES DE LA FORMATION

Année universitaire 2025-2026 : du 22 septembre 2025 au 18 septembre 2026

RESPONSABLES DE LA FORMATION

Nicolas ROUX (INP-ENSEEIH)

Enseignant-Chercheur LAPLACE, Responsable filière Eco-Energie ENSEEIH
2, rue Charles Camichel – 31071 Toulouse Cedex7 France

Catherine AZZARO PANTEL (INP-ENSIACET)

Professeur, Enseignant-chercheur Université de Toulouse, Laboratoire de Génie Chimique, LGC UMR CNRS 5503

ENSIACET INPT – 4 allée Emile Monso – BP 44362 - 31432 TOULOUSE Cedex 4-France