

---

# PROGRAMME INGÉNIEUR

2024-2025

2e année / 3e année

---

## Option Disciplinaire

## Energies Renouvelables et Intégration au Réseau

OD ENRRES

---

RESPONSABLE DU PROGRAMME

Boris CONAN



INGÉNIEUR - OD ENRRES

# 1er Semestre

| Unité d'Enseignement | Crédits ECTS | Parcours     | Acronyme  | Libellé   |
|----------------------|--------------|--------------|---|---|
| UE 73                | 12           | Tronc commun | COSEL<br>ENTRE<br>EOLE1<br>EOLE2                | Contrôle des systèmes électriques<br>Grands enjeux de la transition énergétique<br>Energie éolienne I<br>Energie éolienne II  |
| UE 74                | 13           | Tronc commun | COREL<br>FOREL<br>PRAO1<br>SDSE<br>SOLAR_ENRRES | Commande des réseaux électriques<br>Fonctionnement des réseaux électriques<br>Projet Réponse à un appel d'offres 1<br>Sciences des données pour le secteur énergétique<br>Energie solaire |

# 2e Semestre

---

| Unité d'Enseignement | Crédits ECTS | Parcours     | Acronyme                                  | Libellé   |
|----------------------|--------------|--------------|---|---|
| UE 83                | 14           | Tronc commun | EMERG<br>ESERE<br>HYDRO<br>PRAO2<br>SMART | Technologies émergentes<br>Enjeux socio-économiques, réglementaires et<br>environnementaux<br>Energie hydraulique<br>Projet Réponse à un appel d'offres 2<br>Smart grids pour les ENR |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Contrôle des systèmes électriques [COSEL]

Responsable(s) du cours : Malek GHANES

### Pré-requis

---

### Objectifs

---

Après avoir suivi le cours, le candidat devrait acquérir les connaissances et compréhensions approfondies suivantes :

- Grandeurs électriques : Tensions, courants et puissances monophasés et triphasés
- Electronique de puissance
- Systèmes Photovoltaïques (PV) avec système de stockage, Problématique de contrôle
- Machines électriques, Problématique de contrôle
- Systèmes éoliens, Problématique de contrôle

### Plan de l'enseignement

---

I. Tensions, courants et puissances monophasés et triphasés

II. Electronique de puissance

1. Présentation
2. Hacheurs (partie III)
3. Onduleurs (parties III et IV)
4. Redresseurs (partie IV)

III. Installation PV autonome

1. PV : Cellule, module, champ photovoltaïques
2. Batterie
3. Commande (régulateur)
  - 3.1. Régulateur tout ou rien
  - 3.1. Régulateur MLI (avec hacheur)
  - 3.2. Régulateur MPPT (avec hacheur)
4. Onduleur

IV. Machines électriques et leur commande

V. Commande des systèmes éoliens

- TD sur les parties I, II, III et IV
- TP sur la partie III
- DS

### Bibliographie

---

### Évaluation

---

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.5)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.5)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS<br>MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX<br>PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS<br>SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|---------------------|-----------------|----------------------|--------|-----------------------|
| Français        | 3            | 18 hrs              | 4 hrs           | 8 hrs                | 0 hrs  | 2 hrs                 |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Grands enjeux de la transition énergétique [ENTRE]

Responsable(s) du cours : Jean-Marc BEN GUIGUI

### Pré-requis

### Objectifs

- Analyser et critiquer différents scénarios de la transition énergétique
- Evaluer les besoins en matériaux, ainsi que leur éventuelle criticité, pour les principales ENR (éolien, solaire, hydraulique), et considérer la fin de vie des moyens de production
- Comprendre les phénomènes, les mécanismes et les interactions entre les enjeux énergétiques et écologiques pour réussir à réduire les impacts environnementaux
- Acquérir des méthodes afin de concevoir, d'évaluer et de piloter des systèmes de production ENR

### Plan de l'enseignement

Partie 1 : Le mix énergétique et la place des énergies renouvelables dans la transition énergétique

- La place des énergies renouvelables,
- La cohérence avec l'atténuation du changement climatique (SSP du GIEC),
- Les éventuelles interactions avec les autres limites planétaires,
- Les modalités d'élaboration du scénario (rôle des experts, citoyens, lobbys, etc.).
- Études des différents scénarios possibles : A. Lovins ("Réinventer le feu"), Négawatt, RTE, ADEME, WWS, etc.

Partie 2 : Intensité matérielle des ENR, criticité des matériaux, fin de vie des moyens de production

- Familles de matériaux pour les ENR, propriétés & recyclabilité.
- Intensité matérielle des ENR (quantités de matériaux nécessaires pour produire de l'énergie) et fin de vie des systèmes de production ENR.
- Ressources et criticité des matériaux pour les ENR.
- Analyse de la partie "matériaux" de différents scénarios de transition énergétique.

Partie 3 : Méthodes et outils de conception, d'évaluation et de pilotage des systèmes de production ENR

- Finitude des ressources et limites planétaires
- Retour sur l'investissement énergétique
- Sobriété, efficacité énergétique et énergies renouvelables
- Méthodes et outils de conception, d'évaluation et de pilotage des systèmes de production ENR
- Comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre (GES)
- Analyse du cycle de vie (ACV) : De l'extraction des matières premières à la fin de vie
- Études de cas sur l'évaluation environnementale de systèmes de production ENR

### Bibliographie

- Bihouix, P., & De Guillebon, B. (2020). Quel futur pour les métaux? EDP sciences.
- Boutaud, A., & Gondran, N. (2020). Les limites planétaires. La Découverte.
- Fizaine, F. (2015). Les métaux rares : opportunité ou menace ? Enjeux et perspectives associés à la transition énergétique. Editions Technip.
- IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Jancovici, J. M. (2013). Transition énergétique pour tous: ce que les politiques n'osent pas vous dire. Odile Jacob.
- Jancovici, J. M (2004). L'avenir climatique-Quel temps ferons-nous. Editions du Seuil, 285 p.
- Jolliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (2010). Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan (Vol. 23). PPUR Presses polytechniques.

Jedliczka, M., Marignac, Y., Salomon, T. (2015). Manifeste NégaWatt: En route pour la transition énergétique !. France: Babel.

Pitron, G. (2018). La guerre des métaux rares: la face cachée de la transition énergétique et numérique. Éditions Les liens qui libèrent.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223).

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., ... & Foley, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).

Vidal O. (2018). Matières premières et énergie : les enjeux de demain. ISTE Group.

## Évaluation

Évaluation collective :      EVC 1 (coefficient 0.4)  
    EVC 2 (coefficient 0.6)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 16 hrs           | 16 hrs          | 0 hrs             | 0 hrs  | 0 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Energie éolienne I [EOLE1]

*Responsable(s) du cours : Boris CONAN*

### Pré-requis

### Objectifs

Connaître le déploiement actuel de l'éolien terrestre et en mer, et les enjeux des déploiements futurs  
 Acquérir une bonne compréhension du fonctionnement des éoliennes  
 Acquérir les bases en physique de l'atmosphère permettant d'aborder la compréhension et l'estimation du gisement éolien et ses spécificités  
 Estimer les performances des éoliennes et les effets de parcs  
 Acquérir et utiliser les concepts de l'aérodynamique des profils portants et des rotors

### Plan de l'enseignement

- Les grands chiffres de l'éolien, potentiel d'implantation et capacité éolienne installée dans le monde et en Europe, les grands enjeux de développement
- Les composants d'une éolienne standard et les principe généraux de fonctionnement (rotor, chaîne de transmission, génératrice, structures et fondations)
- Fondamentaux de météorologie et de la couche limite atmosphérique : mécanismes globaux de la météorologie, caractéristiques et physique de la couche limite atmosphérique, ressource éolienne
- Productible et effets de parcs
- Aérodynamique des profils portants, théories et modèles
- Aérodynamique des rotors, théories et modèles

Des exercices numériques accompagnent ce programme pour apprendre à analyser des données atmosphériques, estimer la production des éoliennes, estimer les pertes de productible par effets de parcs et étudier les performances et les chargements sur une éolienne à axe horizontal.

### Bibliographie

Introduction to wind energy systems 2013, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K  
 Wind Energy Handbook, 2001 John Wiley & Sons, Ltd  
 Wind energy explained, - Theory, Design and Application. 2009 John Wiley & Sons, Ltd  
 Wind resource assessment - A practical guide to developing a wind project. 2012 John Wiley & Sons, Ltd

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.5)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.5)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 16 hrs           | 4 hrs           | 10 hrs            | 0 hrs  | 2 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Energie éolienne II [EOLE2]

Responsable(s) du cours : Laurent STAINIER

### Pré-requis

Cours introductif à la mécanique des milieux continus (élasticité linéaire)

### Objectifs

- Comprendre les enjeux mécaniques dans la conception et le fonctionnement des éoliennes
- Acquérir les bases de la dynamique des structures, et en particulier les structures élancées comme les éoliennes (à axe horizontal)
- Comprendre les bases des interactions entre vibrations structurales et écoulements aérodynamiques, et leurs conséquences sur le dimensionnement des éoliennes

### Plan de l'enseignement

- Bases de la mécanique des structures: théorie des poutres, modèles numériques par éléments finis (4h CM, 4h TD)
  - Dynamique des structures et vibrations: modes et fréquences propres, analyse modale, particularités des systèmes tournants (4h CM, 4h TD, 4h TP)
  - Introduction aux couplages aéro-mécaniques: notions de divergence et flottement illustrées sur le modèle simplifié de la section typique, équations du système couplé et méthodes de résolution (4h CM, 2h TD, 4h TP)
- Les TP consisteront en des exercices numériques sur des modèles simplifiés d'éolienne.

### Bibliographie

- Énergie éolienne, 2019 (3ème éd.), Dunod.
- Wind Energy Explained, Theory Design and Application, 2009 (2nd edition), Wiley.
- Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials, 2013, Woodhead Publishing.
- A Modern Course in Aeroelasticity, 2022 (6th edition), Springer.

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.5)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.5)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 16 hrs           | 6 hrs           | 8 hrs             | 0 hrs  | 2 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Commande des réseaux électriques [COREL]

Responsable(s) du cours : Bogdan MARINESCU

### Pré-requis

### Objectifs

- Savoir analyser la stabilité et les propriétés structurelles d'un système électrique interconnecté
- Acquérir les bases de la commande robuste pour différents objectifs du réseau (contrôle des générateurs, amortissement des oscillations de puissance du réseau, ...)

### Plan de l'enseignement

- Performances & robustesse des systèmes de grande taille ; loop-shaping et concepts de base
- Systèmes multi-entrées/multi-sorties
  - o Forme d'espace d'état et représentations DAE
  - o Propriétés structurelles et réduction du modèle
- Techniques de commande robuste
  - o Méthodologies (principe du modèle interne, H2/H infini, ...)
  - o Etudes de cas de systèmes électriques de puissance : commande avec un cahier de charges mixte (objectifs locaux et réseau)

### Bibliographie

- T. Kailath, Linear Systems, Prentice-Hall, 1980.
- J. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum, Feedback Control Theory, MacMillan 1990. [www.ebooksdirectory.com](http://www.ebooksdirectory.com)
- Ph. de Larminat, Automatique, 2ème éd. Hermès, 1996.
- H. Bourlès, Systèmes linéaires – de la modélisation à la commande, Hermès, 2006.
- M. Ilic, J. Zaborsky, Dynamics and Controls of Large Electric Power Systems, Willey 2000.

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.4)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.6)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 16 hrs           | 6 hrs           | 8 hrs             | 0 hrs  | 2 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Fonctionnement des réseaux électriques [FOREL]

Responsable(s) du cours : Vinu THOMAS

### Pré-requis

### Objectifs

Acquérir les bases du fonctionnement dynamique des systèmes électriques interconnectés. Une vision « système » d'analyse et commande, propre à l'automaticien, est donnée. Après avoir suivi ce module, les étudiants seront capables de :

- Comprendre et faire l'analyse des principaux phénomènes dynamiques des systèmes électriques interconnectés
- Connaître les régulations de base et classiques d'un système électrique
- Utiliser des logiciels d'analyse et simulation des réseaux électriques
- Connaître le secteur électrique (thématiques RTE, EDF, Enedis ou constructeur de matériel comme, par exemple, Alstom, Siemens, ABB)

### Plan de l'enseignement

- Production d'électricité et gestion de réseaux (généralités)
- Ecoulement des charges/load-flow
- Dynamiques de base (fréquence/tension) d'un réseau électrique ; équilibre production/consommation
- Stabilité (en tension, en fréquence/transitoire, en petits mouvements)
- Régulations primaires/secondaires/tertiaires ;
- Services système de tension & fréquence
- Zoom sur le réseau français et européen

### Bibliographie

- P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.  
 G. Rogers, Power System Oscillations, Kluwer Academic, 2000.  
 M. Ilic, J. Zaborsky, Dynamics and Control of Large Electric Power Systems, Wiley, 2000.  
 P.W. Sauer, M.A. Pai, Power Systems Dynamics and Stability, Prentice Hall, 1998.  
 J. Cladé, Electrotechnique, Eyrolles, 1989.

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.4)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.6)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Anglais         | 3            | 16 hrs           | 6 hrs           | 8 hrs             | 0 hrs  | 2 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Projet Réponse à un appel d'offres 1 [PRAO1]

*Responsable(s) du cours : Sandrine AUBRUN*

### Pré-requis

Majorité des enseignements de l'option disciplinaire ENRRES

### Objectifs

La simulation vise à expérimenter, à l'aide de modalités proches d'un serious game, les démarches et activités réalisées par un développeur de projets de production d'électricité ou de chaleur lors des phases de réponses à un appel à projets (activités à la fois technique, managériale et commerciale). En plus des connaissances acquises pendant la formation ENR-RES, cette simulation doit permettre aux élèves de renforcer/utiliser un certain nombre de compétences transversales indispensables à ce type de fonction : être autonome ; écouter, argumenter ses choix et négocier ; trouver l'information et la prioriser ; découper, distribuer et réaliser des tâches ; organiser son temps de travail ; développer son esprit d'analyse et de synthèse. La construction des appels d'offres est confiée à un intervenant du secteur de l'énergie. Il construit un appel d'offres pertinent et répondant à des défis actuels. Il aura la tâche d'évaluer tout au long du projet la performance technique, managériale et commerciale des groupes en lice. Il s'entourera d'acteurs et d'actrices de l'énergie pour animer les différentes étapes de la simulation et garantir que l'évaluation finale sera basée sur des critères professionnellement pertinents.

### Plan de l'enseignement

Découverte de l'appel d'offres

Première tentative de définition de l'offre technique, business model associé

Rencontre avec les parties prenantes pour affiner la réponse à l'appel d'offres

### Bibliographie

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 1            | 0 hrs            | 0 hrs           | 0 hrs             | 32 hrs | 0 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Sciences des données pour le secteur énergétique [SDSE]

Responsable(s) du cours : Bertrand MICHEL

### Pré-requis

### Objectifs

- Maitrise elementaire de la fouille de donnees
- Comprehension de la problematique de l'apprentissage statistique
- Pratique avec les libraires standards de Python
- Application de ces methodes sur des cas d'étude dans le secteur de l'énergie

### Plan de l'enseignement

- Revision du langage Python
- Rappels de statistique et representation des donnees
- Introduction a l'apprentissage statistique
- Methodes usuelles en classification - methodes CART et Forets aleatoire
- Methodes predictives dans le domaine de l'énergie

### Bibliographie

- The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, 2009 Springer.
- Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow by Aurelien Geron, O'Reilly 2017.

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 16 hrs           | 0 hrs           | 16 hrs            | 0 hrs  | 0 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Energie solaire [SOLAR\_ENRRES]

*Responsable(s) du cours : Pierre MARTY*

### Pré-requis

### Objectifs

Comprendre et maîtriser les concepts détaillés de la captation solaire et de tous les systèmes de conversion d'énergie solaire. Les étudiants devront maîtriser les équations fondamentales et les grands ordres de grandeurs, savoir faire des calculs de "coin de table" pour analyser rapidement une solution tout en développant un sens critique aiguisé.

### Plan de l'enseignement

- 1 - Captation solaire
- 2 - Solaire thermique
- 3 - Solaire à concentration
- 4 - Solaire passif
- 5 - Solaire photovoltaïque

### Bibliographie

J. Bernard, Energie Solaire Calculs & Optimisation Génie Energétique Niveau B, 2e édition. Paris: Ellipses Marketing, 2011.  
 J.-P. Oliva et S. Courgey, La conception bioclimatique: Des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation. terre vivante, 2006.  
 « Le capteur solaire à eau chaude », Energie+. <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16760> (consulté le janv. 24, 2019).  
 Syndicat des énergies renouvelables, « Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique », 2012.  
 W. Weiss et M. Spörk-Dür, « Solar Heat Worldwide », IEA Solar Heating & Cooling Programme, 2020. Consulté le: oct. 13, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>.

### Évaluation

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 1.0)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 20 hrs           | 10 hrs          | 0 hrs             | 0 hrs  | 2 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Technologies émergentes [EMERG]

Responsable(s) du cours : Ernesto MURA

### Pré-requis

### Objectifs

L'objectif de ce cours est de présenter un aperçu de différentes technologies émergentes dans le cadre des énergies renouvelables, leur gestion, transport et stockage.

### Plan de l'enseignement

L'enseignement est composé de 4 grandes parties :

- Partie 1 : biomasse : éléments fondamentaux sur la combustion de la biomasse, applications industrielles, gestion des polluants
- Partie 2 : géo énergie : principe, présentation de différentes technologies, applications industrielles
- Partie 3: stockage et transport d'énergie (hors énergie électrique) : réseaux de chaleur, filière hydrogène, carburants de synthèse, power-to-X
- Partie 4: stockage thermodynamique de l'énergie : présentation des différentes technologies et de leurs caractéristiques (densité d'énergie, rendement), études de cas

### Bibliographie

Cours d'énergétique de première année (CCENERG), Ecole Centrale Nantes

Cours de combustion, Denis Veynante, Ecole Centrale Nantes

### Évaluation

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 1.0)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 15 hrs           | 15 hrs          | 0 hrs             | 0 hrs  | 2 hrs              |

## INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

# Enjeux socio-économiques, réglementaires et environnementaux [ESERE]

Responsable(s) du cours : Boris CONAN

### Pré-requis

### Objectifs

- Connaître les outils juridiques à disposition du porteur d'un projet d'installations de production d'électricité issues d'énergies renouvelables
- Maîtriser les mesures locales d'évitement, de réduction, de compensation et d'accompagnement liées à l'implantation d'un projet ENR sur un territoire.
- Comprendre le fonctionnement du marché de l'énergie
- Acquérir des compétences dans la scénarisation du mix électrique français
- Identifier et analyser différents modèles économiques passés, présents et futurs dans plusieurs secteurs des énergies renouvelables (éolien, solaire, biomasse, hydrogène) et de leurs usages
- Appréhender les impacts environnementaux et sociétaux du développement des énergies renouvelables.

### Plan de l'enseignement

- Réglementation du secteur énergétique
- Fonctionnement des marchés de l'énergie
- Modèles économiques et financements de projets
- Impacts environnementaux et sociétaux des ENR

### Bibliographie

- JP Hansen, J Percebois, Energie : Economie et politiques, 2010, Ed. De Boeck
- S Méritet, JB Vaujour, Economie de l'énergie, 2015, Ed. Dunod.
- DR. Biggar, MR Hesamzadeh, The Economics of Electricity Markets, 2014, Wiley IEEE.
- Lepercq, T. (2019), Hydrogène le nouveau pétrole, Ed. Le Cherche-Midi
- Grandidier J.Y., Luneau, Y. (2017), Le vent nous portera
- Alexander Osterwalder et Yves Pigneur (2010),
- Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers
- 100 % d'énergies renouvelables d'ici 2050, rapport WWF-Ecofys (2011)
- Livre blanc des énergies renouvelables par le syndicat de Energies Renouvelables <https://www.energies-renouvelablesfr.com/attachment/359715/>

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.5)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.5)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 16 hrs           | 15 hrs          | 0 hrs             | 0 hrs  | 1 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Energie hydraulique [HYDRO]

Responsable(s) du cours : Alban LEROYER

### Pré-requis

### Objectifs

Appréhender les installations hydro-électriques dans leur ensemble et maîtriser les bases scientifiques et technologiques sous-jacentes.

### Plan de l'enseignement

- Grands chiffres de l'hydraulique, Fonctionnement des installations hydrauliques
- Hydraulique à surface libre :
  - o Caractéristiques des écoulements
  - o Ecoulement permanent uniforme
  - o Ecoulement non uniforme et permanent
  - o Equations de Barré St Venant
- Machines hydrauliques :
  - o Généralités sur les secteurs d'application de l'Hydraulique et classification des machines hydrauliques (roto-dynamiques et volumétrique)
  - o Fonctionnement, dimensionnement et technologie des machines roto-dynamiques
- Dimensionnement de barrage
- Projet de conception d'un petit aménagement hydro-électrique

### Bibliographie

Hydrodynamics of Pumps, C.E. Brennen, Oxford University Press

Techniques de l'ingénieur, B470 -> B474, B4313, BM4281, B4300, B4302, B4304, B4306, B4308

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.4)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.6)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 20 hrs           | 6 hrs           | 4 hrs             | 0 hrs  | 2 hrs              |

## INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

# Projet Réponse à un appel d'offres 2 [PRA02]

*Responsable(s) du cours : Sandrine AUBRUN*

### Pré-requis

Majorité des enseignements de l'option disciplinaire ENRRES

### Objectifs

La simulation vise à expérimenter, à l'aide de modalités proches d'un serious game, les démarches et activités réalisées par un développeur de projets de production d'électricité ou de chaleur lors des phases de réponses à un appel à projets (activités à la fois technique, managériale et commerciale). En plus des connaissances acquises pendant la formation ENR-RES, cette simulation doit permettre aux élèves de renforcer/utiliser un certain nombre de compétences transversales indispensables à ce type de fonction : être autonome ; écouter, argumenter ses choix et négocier ; trouver l'information et la prioriser ; découper, distribuer et réaliser des tâches ; organiser son temps de travail ; développer son esprit d'analyse et de synthèse. La construction des appels d'offres est confiée à un intervenant du secteur de l'énergie (XX). Il construit un appel d'offres pertinent et répondant à des défis actuels. Il aura la tâche d'évaluer tout au long du projet la performance technique, managériale et commerciale des groupes en lice. Il s'entourera d'acteurs et d'actrices de l'énergie pour animer les différentes étapes de la simulation et garantir que l'évaluation finale sera basée sur des critères professionnellement pertinents.

### Plan de l'enseignement

Etablissement de la réponse à l'appel d'offres

Finalisation des solutions techniques proposées et du business model associé

Réponse à l'appel d'offres par un rapport + présentation orale devant les parties prenantes

### Bibliographie

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 2            | 0 hrs            | 0 hrs           | 0 hrs             | 48 hrs | 0 hrs              |

# INGÉNIEUR - OD ENRRES

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Smart grids pour les ENR [SMART]

Responsable(s) du cours : Bogdan MARINESCU

### Pré-requis

### Objectifs

L'objectif de ce cours est de sensibiliser au fonctionnement des convertisseurs à électronique de puissance, (à la fois sur le hardware et la commande), comprendre l'impact que les convertisseurs ont sur le réseau aujourd'hui et comment ils peuvent le stabiliser, mais aussi de se projeter dans le futur pour comprendre les limitations des contrôles actuels, et définir quels nouveaux contrôles permettront de faire progresser la pénétration d'énergie renouvelable dans le réseau.

### Plan de l'enseignement

- introduction à l'électronique de puissance aux composants (IGBT et autres technos) et leur topologies (2 niveaux, 2 niveaux avec point neutre), MMC...
- la commande des onduleurs de tension (MLI, vectorielle, filtrage )
- La Commande grid-following des convertisseurs et pour quels objectifs.
- Les services systèmes classiques pour le réseau (réglage de tension, réglage de fréquence)
- le rôle de RTE dans les raccordements, les codes de réseaux européens, raccordement HVDC, ENR et machines synchrones
- l'implémentation des services systèmes dans le contrôle grid-following.
- les services systèmes spécifiques aux ENR (cf nouveaux code européens RfG/HVDC, LFSM, injection de courant réactif, inertie virtuelle) et leur implémentation
- les limitations de la commande grid-following, et la commande grid-forming
- l'état de l'art du grid-forming actuel, les besoins du réseau et les challenges dans les développements à venir.

### Bibliographie

A.Monti, F. Milano, E. Bomprad, X. Guillaud, Converter-based Dynamics and Control of Modern Power Systems, Academic Press 2020.

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.4)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.6)

| LANGUE DU COURS | CRÉDITS ECTS | COURS MAGISTRAUX | TRAVAUX DIRIGÉS | TRAVAUX PRATIQUES | PROJET | DEVOIRS SURVEILLÉS |
|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|--------------------|
| Français        | 3            | 20 hrs           | 6 hrs           | 4 hrs             | 0 hrs  | 2 hrs              |