

---

# PROGRAMME INGÉNIEUR

2025-2026

2e année / 3e année

---

## Option Disciplinaire Contrôle et Gestion de l'Energie

OD ECONTROL

---

RESPONSABLE DU PROGRAMME

Mohamed Assaad HAMIDA



# 1er Semestre

Unité d'Enseignement	Crédits ECTS	Parcours	Acronyme	Libellé
UE 73	12	Tronc commun	CONEN INFEM METOD SIMUS	Chaîne de conversion de l'énergie Informatique embarquée Méthodologie de la commande linéaire Simulation des systèmes électriques
UE 74	13	Tronc commun	CAVAN CONUM LTIOT ODAS P1ECONTROL	Commandes Avancées Conception numérique sur FPGA Low tech IoT Observation et diagnostic Projet 1

# 2e Semestre

---

Unité d'Enseignement	Crédits ECTS	Parcours	Acronyme	Libellé
UE 83	14	Tronc commun	GENER MCIA P2ECONTROL PENER TENER	Gestion intelligente de l'énergie Model checking et IA Projet 2 Projet énergie Rôle de l'électricité pour la transition énergétique

## INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

# Chaîne de conversion de l'énergie [CONEN]

Responsable(s) du cours : Mohamed Assaad HAMIDA

### Objectifs

Cet enseignement traite de l'analyse et de la synthèse des principales structures de la chaîne de conversion de l'énergie. Pour la partie sources, l'objectif est de présenter un aperçu large des différentes sources d'énergies conventionnelles et renouvelables. Pour la partie convertisseurs statiques, il s'agit de comprendre le fonctionnement et d'analyser les formes d'ondes des convertisseurs tels que les redresseurs triphasés, hacheurs et onduleurs. Pour la partie machines électriques, il s'agit de maîtriser le principe de la conversion électromagnétique et de modéliser en régime permanent des machines synchrones et asynchrones.

A la fin de l'enseignement les étudiants seront capables de :

- Comprendre le fonctionnement des différentes sources d'énergie (renouvelables ou conventionnelles)
- Comprendre le fonctionnement des différents types de convertisseurs statiques et leurs utilisations dans les systèmes d'énergie électriques.
- Connaître les différents actionneurs électriques et leurs modélisations.

### Plan de l'enseignement

- Sources de l'énergie
  - o Sources conventionnelles
  - o Sources renouvelables
- Systèmes de stockage de l'énergie
- Convertisseurs statiques
  - o Hacheur
  - o Onduleur
  - o Redresseur
- Actionneurs électriques

### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

- Electric Power and Energy Systems, Sivagama Sundari Meenakshi Sundaram
- Electronique de puissance, G. SEGUIER, P. DELARUE, F. LABRIQUE, Dunod
- Electrical Motor Controls for Integrated Systems, Gary Rockis (Author), Glen A. Mazur

## Compétences auxquelles forme cet enseignement

---

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

## Compétences observées via cet enseignement

---

Aucune compétence observée

## Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

---

Énergie propre et d'un coût abordable / Industrie, innovation et infrastructures / Lutte contre les changements climatiques

## Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

---

Ce cours contribue au développement durable en formant les étudiants aux sources d'énergie renouvelables et conventionnelles et aux systèmes de conversion de l'énergie électrique. Il sensibilise aux enjeux de la transition énergétique, de l'efficacité énergétique et de l'utilisation responsable des systèmes électriques.

## 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	14 hrs	8 hrs	8 hrs	0 hrs	2 hrs

# INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

## Informatique embarquée [INFEM]

Responsable(s) du cours : Mikael BRIDAY

### Objectifs

Ce cours explore les systèmes embarqués, soumis à de strictes contraintes et souvent intégrés dans des environnements critiques tels que l'avionique et l'automobile. En interaction étroite avec des procédés, ces systèmes nécessitent l'implémentation de lois de commande abordées dans d'autres cours. Les étudiants travailleront à deux niveaux d'abstraction:

- avec une programmation directe sur carte embarquée;
- en utilisant un système d'exploitation temps réel (RTOS pour real-time operating system) qui offre des services de plus haut niveau;

Dans ce dernier cas, la programmation multi-tâche et les mécanismes de synchronisation entre tâches sont traitées.

### Plan de l'enseignement

Programmation directe sur carte embarquée:

- Représentation de l'information ;
- Structure d'une carte micro-contrôleur;
- Programmation des entrées/sorties parallèles, analogiques ;
- Programmation des compteurs intégrés, d'une PWM ;
- Interruptions (avec les problèmes de synchronisation associés).

Utilisation d'un exécutif temps réel:

- Décomposition fonctionnelle des systèmes embarqués ;
- Architecture logicielle d'un système de pilotage ;
- Implantation synchrone et asynchrone : rôle de l'exécutif ;
- Primitives de synchronisation, de gestion des événements et du temps ;
- ordonnancement temps réel
- Exemples d'applications Temps Réel.

### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

- D. Patterson & J. Hennessy, Computer Organization and Design – ARM Edition, Morgan Kaufmann, 2017
- Les systèmes d'exploitation temps réel - Techniques de l'Ingénieur R5080 et R5082 - J.P. Elloy Y. Trinquet

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

Aucune compétence observée

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Consommation et production responsables / Éducation de qualité / Énergie propre et d'un coût abordable / Industrie, innovation et infrastructures

## Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Ce cours sensibilise les étudiants à la conception de systèmes embarqués sobres en ressources, en mettant l'accent sur l'efficacité énergétique, l'optimisation du code et la maîtrise du matériel. Il aborde le rôle des microcontrôleurs dans des applications à impact sociétal positif (capteurs environnementaux, objets à faible consommation, systèmes autonomes), en soulignant la responsabilité de l'ingénieur dans la réduction de l'empreinte énergétique et matérielle des systèmes numériques.

## Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	16 hrs	4 hrs	12 hrs	0 hrs	0 hrs

## INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

# Méthodologie de la commande linéaire [METHOD]

Responsable(s) du cours : Guy LEBRET

### Pré-requis

Un premier cours d'automatique classique est requis (typiquement le cours SiSCo de 1e année de Centrale Nantes)

### Objectifs

Proposer une méthodologie de synthèse de lois de commande des systèmes linéaires multivariables, basée sur l'approche d'état.

### Plan de l'enseignement

- Introduction des concepts de l'approche d'état, commandabilité, observabilité, placement de pôles par retour d'état et par retour d'état reconstruit.
- Obtention de stabilité robuste par restauration du transfert de boucle
- Ajout explicite d'une action intégrale.
- Description de la méthodologie et mise en oeuvre dans le cas monovarié (choix de pôles).

### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

Ph. de Larminat, 'Automatique, Commande des Systèmes Linéaires', Hermès  
Ph. de Larminat, 'Le Contrôle d'Etat Standard', Hermès.  
G. Lebre, 'Méthodologie de la Commande', Polycopié Centrale de Nantes.

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

Aucune compétence observée

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Éducation de qualité / Énergie propre et d'un coût abordable / Industrie, innovation et infrastructures / Travail décent et croissance économique

### Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Enseignement de qualité qui puise ces sources dans la littérature scientifique internationale du domaine. Les lois de commande développées sont utilisées dans le monde industriel.

## 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 ECONTROL

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

## Simulation des systèmes électriques [SIMUS]

Responsable(s) du cours : Mohamed Assaad HAMIDA

### Objectifs

L'objectif de ce cours est de présenter les outils de base de la simulation des systèmes dynamiques.

### Plan de l'enseignement

Le cours commence par une introduction aux techniques d'intégration numérique, nécessaire pour la simulation des systèmes dynamiques. Le cours se poursuit par la présentation de différentes solutions logicielles: Matlab/Simulink, Amesim, ...

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

Aucune compétence observée

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Énergie propre et d'un coût abordable

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	12 hrs	0 hrs	20 hrs	0 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

## Commandes Avancées [CAVAN]

Responsable(s) du cours : Franck PLESTAN / Guy LEBRET

### Pré-requis

Les pré-requis de ce cours sont un cours d'automatique classique (PID appliqués aux systèmes monovariables) et un cours d'automatique des systèmes linéaires multivariables décrits par une représentation d'état.

### Objectifs

Après avoir suivi le cours, les étudiants auront acquis les connaissances nécessaires pour mettre en œuvre des lois de « commande prédictive », des lois de « commande non linéaires ».

- Commande prédictive : les principes de commande prédictive sont de plus en plus mise en œuvre dans l'industrie. Ils seront décrits et mis en œuvre dans le cadre des systèmes linéaires à travers des exemples développés en TD et TP sous Matlab.
- Commande non linéaire : le focus sera mis sur des algorithmes de commande nécessitant peu d'information sur les systèmes : commande par modes glissants (standard, ordre supérieur, adaptative) et commande sans modèle.

### Plan de l'enseignement

#### Commande prédictive

- Introduction, idée de base de la commande prédictive
- Techniques de prédiction dans le cadre des systèmes linéaires
- Algorithmes des commande PFC (Predictive Functional Control) et GPC (Generalised Predictive Control).
- Prises en compte des contraintes de saturations, réglages de la commande GPC.

#### Commande Non Linéaire

- Commande par modes glissants : standard, ordre supérieur et gain adaptatif
- Commande sans modèle

### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

- A first course in Predictive Control, J.A. Rossiter. 2018, Édition CRC Press.
- Predictive Functional Control, Principle and Industrial applications, J. Richalet, D. O'Donovan. 2009, Springer
- Commande predictive en Scilab, J. Richalet, G. Lavielle. 2016 Edition D-Booker.
- Predictive Control with constraints, J.M. Maciejowski. 2001, Prentice Hall.
- Sliding mode control and observation, Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, A. Levant. 2014, Springer.
- Model-free control, M. Fliess, C. Join. International Journal of Control, vol.86, no.12, pp.2228-2252, 2013

## Compétences auxquelles forme cet enseignement

---

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

## Compétences observées via cet enseignement

---

Aucune compétence observée

## Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

---

Éducation de qualité / Industrie, innovation et infrastructures

## Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

---

Enseignement de qualité qui puise ces sources dans la littérature scientifique internationale du domaine. Les lois de commande développées sont utilisées dans le monde industriel

## 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 ECONTROL

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

## Conception numérique sur FPGA [CONUM]

Responsable(s) du cours : Olivier Henri ROUX

### Objectifs

Objectifs :

- Maîtriser les spécificités et caractéristiques des approches synchrones
- Etre capable de mettre en œuvre un système synchrone et le programmer avec différents langages dont le VHDL

Moyens :

- Etude des systèmes logiques synchrones vs asynchrones
- Etude des architectures matérielles et du langage VHDL.
- Travaux pratiques sur cible FPGA pour le contrôle d'une partie opérative non simulée

Objectives:

- Master the specificities and characteristics of synchronous approaches
- Be able to implement a synchronous system and program it with different languages including VHDL

Means :

- Study of synchronous vs asynchronous logic systems
- Study of hardware architecture and VHDL language.

Practical work on FPGA target for the control of a non-simulated operative part

### Plan de l'enseignement

- 1) Architectures matérielles synchrones
- 2) VHDL et FPGA

### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

<https://en.wikipedia.org/wiki/VHDL>

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - Intermédiaire

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Consommation et production responsables

### Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Les compétences acquises dans ce cours trouvent des applications directes dans le domaine du développement durable, notamment dans la conception de systèmes électroniques à faible consommation d'énergie. Les architectures synchrones implémentées sur FPGA permettent d'optimiser l'efficacité énergétique des systèmes embarqués utilisés dans la gestion intelligente de l'énergie, les réseaux électriques intelligents (smart grids) et les systèmes de contrôle des énergies renouvelables. Par ailleurs, la maîtrise du VHDL et des architectures matérielles favorise le développement de solutions matérielles durables, fiables et reconfigurables, contribuant à l'allongement de la durée de vie des équipements et à la réduction des déchets électroniques.

## Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	8 hrs	4 hrs	20 hrs	0 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

## Low tech IoT [LTIOT]

Responsable(s) du cours : Pierre-Emmanuel HLADIK

### Objectifs

Cet enseignement porte sur les objets connectés (IoT: Internet of Things) dans le cas de capteurs connectés. D'une part il permet de comprendre les échanges de données entre un micro-contrôleur et un capteur à travers la liaison série asynchrone les bus I2C, SPI et CAN. D'autre part l'information recueillie par le capteur est envoyée sur un réseau LPWAN (Low Power Wide Area Network) qui permet de transmettre des données (sans fil) sur une longue distance (plusieurs km) avec une consommation énergétique très faible. Au-delà de la compréhension de ces principes technologique nous aborderons aussi des aspects liés à leur utilisation dans des perspectives de sobriété numérique et de pérennité propre aux réflexions sur la low-tech.

A la fin de l'enseignements les étudiants seront capables de :

- Comprendre et mettre en œuvre les principaux moyens d'échange de données par bus (liaison série asynchrone, I2C, SPI, CAN) entre les systèmes dans une architecture embarquée hétérogène,
- Comprendre et mettre en œuvre les principes d'échanges de données sans fil à faible consommation énergétique (BLE, LPWAN),
- Connaître et mettre en perspective les aspects de sobriété numérique dans le cadre des systèmes embarqués pour l'IoT.

### Plan de l'enseignement

Introduction (cours)

- o Classification des réseaux locaux industriels, principes généraux de la communication

Communication par bus (cours, TD et TP)

- o Liaison série asynchrone
- o Bus I2C
- o Bus SPI
- o Bus CAN

Communication sans fil baise consommation énergétique (cours, TD et TP)

- o BLE
- o LPWAM

Introduction à la sobriété numérique (cours, TD)

- o Pertinence énergétique
- o Caractérisation et cas d'étude

### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

- Stéphane Lohier, Dominique Présent, Réseaux et transmissions - 7e édition, Dunod, 2020
- Guy Pujolle, Les reseaux 9e edition, Eyrolles, 2018
- Bharat Chaudhari, Marco Zennaro, LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications, Elsevier, 2020

## Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

## Compétences observées via cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - Intermédiaire

## Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Consommation et production responsables / Industrie, innovation et infrastructures

## Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Ce cours s'inscrit pleinement dans une démarche de sobriété numérique en abordant les technologies de communication embarquées et sans fil à faible consommation énergétique, adaptées aux objets connectés contraints. Il sensibilise les étudiants aux enjeux de réduction de l'empreinte énergétique, de pérennité des systèmes et de choix technologiques low-tech, en mettant en perspective les architectures IoT durables, économes en ressources et adaptées à des usages de long terme.

## 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	8 hrs	8 hrs	14 hrs	0 hrs	2 hrs

# INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

## Observation et diagnostic [ODAS]

*Responsable(s) du cours : Malek GHANES*

### Pré-requis

Systèmes linéaires. Commande. Si possible quelques notions en Observation.

### Objectifs

Pour des raisons technologiques (matériaux, faisabilité, etc.), de fiabilité (défaillance ou défauts des éléments de mesure) ou économiques (coût et maintenance des capteurs), la mesure de tous les états n'est pas possible dans de nombreuses applications. Par exemple, dans le contexte des véhicules électriques et hybrides, il n'y a pas de capteur de couple dans les voitures électriques et hybrides. Il est donc nécessaire, en utilisant les mesures disponibles de reconstruire les variables d'état non mesurées. C'est l'objectif principal d'un observateur. Dans le cas des véhicules électriques et hybrides, un observateur peut être conçu pour reconstruire le couple en utilisant les mesures des courants pour des raisons de sécurité. Par exemple, la traction des véhicules électriques de Renault est arrêtée si le couple dépasse ou n'atteint pas un seuil du couple désiré, demandé par le conducteur quand il appuie sur la pédale d'accélération. Ce problème d'observation ou d'estimation se retrouve dans les contextes de commande, de diagnostic et de détection de défauts, de sécurité, partout où la connaissance des variables d'état peut être requise. Les objectifs du cours sont ainsi focalisés sur le problème de conception de l'observateur/estimateur et de diagnostic pour les systèmes linéaires et non linéaires avec des exemples académiques et des applications dans la propulsion électrique.

### Plan de l'enseignement

- 1 OBSERVATION
  - 1.1 Introduction .
  - 1.2 Observabilité des systèmes linéaires
    - 1.2.1  $x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t f(y(t_0, t_1), u(t_0, t_1)) dt$ ,  $t \in [t_0, t_1]$ ,  $t_1 > t_0$
    - 1.2.2 Espace d'inobservabilité
    - 1.2.3 Grammien d'observabilité
    - 1.2.4 Condition du Rang
    - 1.2.5 Détectabilité
  - 1.3 Observateurs des systèmes linéaires
    - 1.3.1 Forme canonique d'observabilité
    - 1.3.2 Filtre ou observateur de Kalman : idée originale
      - 1.3.2.1 TD 1 : exemple illustratif
    - 1.3.3 Observateur de Luenberger : idée originale
  - 1.4 Observabilité des systèmes non linéaires
    - 1.4.1 Indiscernabilité (ou indistinguabilité)
    - 1.4.2 Observabilité
    - 1.4.3 Observabilité locale faible
    - 1.4.4 Espace d'observabilité
      - 1.4.4.1 Exemple
    - 1.4.5 Condition de rang
      - 1.4.5.1 Condition de rang forte
      - 1.4.5.2 TD 2 : exemple illustratif
      - 1.4.5.3 Condition de rang faible
      - 1.4.5.4 TD 2 : exemple illustratif
    - 1.4.6 Observabilité et problème des entrées
      - 1.4.6.1 TD 3 : exemple illustratif
      - 1.4.6.2 Entrée universelle
      - 1.4.6.3 Entrée singulière

- 1.4.6.4 Entrées Régulièrement Persistantes
- 1.4.6.5 TD 4 : Application à la propulsion électrique
- 1.5 Observateurs des systèmes non linéaires
  - 1.5.1 Observateur linéaire local
  - 1.5.2 Forme canonique d'observabilité
    - 1.5.2.1 Exemple
  - 1.5.3 Observateur à grand gain
    - 1.5.3.1 TD 5 : exemple illustratif
  - 1.5.4 Observateur à modes glissants
    - 1.5.4.1 Observateur d'ordre 1
    - 1.5.4.2 TD 5 : exemple illustratif
    - 1.5.4.3 Observateur d'ordre supérieur (super twisting)
    - 1.5.4.4 TD 5 : exemple illustratif
    - 1.5.4.5 Observateur homogène
  - 1.5.5 TD 6 : application à la propulsion électrique

## 2 DIAGNOSTIC

- 2.1 Introduction
  - 2.1.1 Définition du diagnostic (Qu'est-ce que le diagnostic ?)
  - 2.1.2 Pourquoi le diagnostic ?
  - 2.1.3 Comment faire le diagnostic ?
- 2.2 Methodes et outils pour le diagnostic
  - 2.2.1 Introduction
  - 2.2.2 Génération de résidus
    - 2.2.2.1 Définition du résidu
    - 2.2.2.2 Différents résidus
    - 2.2.2.3 Espace de parité
    - 2.2.2.4 Observateurs à entrées inconnues
  - 2.2.3 TD 2 : application à la propulsion électrique .

## Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

---

### 1 OBSERVATION

- 1.1 Introduction .
- 1.2 Observability of linear systems
  - 1.2.1  $x_0 = x(t_0) = f(y(t_0, t_1), u(t_0, t_1)), t \in [t_0, t_1], t_1 > t_0$
  - 1.2.2 Unobservability space
  - 1.2.3 Observability Gramian
  - 1.2.4 Rank condition
  - 1.2.5 Unobservability
- 1.3 Observers of linear systems
  - 1.3.1 Canonical form of observability
  - 1.3.2 Kalman filter or observer: an original idea
    - 1.3.2.1 TD 1: illustrative example
  - 1.3.3 Luenberger observer: an original idea
- 1.4 Observability of nonlinear systems
  - 1.4.1 Indiscernibility (or indistinguishability)
  - 1.4.2 Observability
  - 1.4.3 Weak local observability
  - 1.4.4 Observability space
    - 1.4.4.1 An example
  - 1.4.5 Rank condition
    - 1.4.5.1 Strong rank condition
    - 1.4.5.2 TD 2: illustrative example
    - 1.4.5.3 Weak rank condition
    - 1.4.5.4 TD 2: illustrative example
  - 1.4.6 Observability and the input problem

- 1.4.6.1 TD 3: illustrative example
- 1.4.6.2 Universal input
- 1.4.6.3 Singular input
- 1.4.6.4 Regularly persistent inputs
- 1.4.6.5 TD 4: Application to electric propulsion
- 1.5 Observers of non-linear systems
  - 1.5.1 Local linear observer
  - 1.5.2 Canonical form of observability
    - 1.5.2.1 An example
  - 1.5.3 High-gain observer
    - 1.5.3.1 TD 5: illustrative example
  - 1.5.4 Sliding-mode observer
    - 1.5.4.1 1st-order observer
    - 1.5.4.2 TD 5: illustrative example
    - 1.5.4.3 Higher-order observer (super twisting)
    - 1.5.4.4 TD 5: illustrative example
    - 1.5.4.5 Homogeneous observer
  - 1.5.5 TD 6: application to electric propulsion

## 2 DIAGNOSTICS

- 2.1 Introduction to diagnostics
  - 2.1.1 Definition of diagnostics (What is diagnostics?)
  - 2.1.2 Why diagnosis?
  - 2.1.3 How to diagnose?
- 2.2 Diagnostic methods and tools
  - 2.2.1 Introduction
    - 2.2.2 Residue generation
      - 2.2.2.1 Residue definition
        - 2.2.2.2 Different residues
        - 2.2.2.3 Parity space
        - 2.2.2.4 Observers with unknown inputs
      - 2.2.3 TD 2: application to electric propulsion .

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

---

- C1 : Concevoir et prototyper des dispositifs innovants et créateurs de valeur
  - C1C1 : Faire émerger
    - Intermédiaire
  - C1C2 : Oser
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

---

- C1 : Concevoir et prototyper des dispositifs innovants et créateurs de valeur
  - Intermédiaire

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

---

Consommation et production responsables / Énergie propre et d'un coût abordable

### Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

---

Ce cours contribue au développement durable et à la responsabilité sociétale en favorisant une approche efficace de l'observation et la surveillance des systèmes. Le recours aux capteurs logiciels permet de réduire le nombre de capteurs physiques, limitant ainsi la consommation de ressources matérielles, les coûts et l'impact environnemental des installations.

Les méthodes de surveillance et de diagnostic des défauts renforcent la fiabilité et la sécurité des systèmes en permettant une détection précoce des dysfonctionnements, évitant des dégradations majeures, des arrêts non maîtrisés et par conséquent des impacts environnementaux et humains. Enfin, la commande tolérante aux défauts prolonge la durée de vie des systèmes et assure leur fonctionnement malgré les anomalies, participant ainsi à une utilisation plus responsable et plus durable des technologies industrielles

## 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 ECONTROL

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

## Projet 1 [P1ECONTROL]

*Responsable(s) du cours : Mohamed Assaad HAMIDA*

### Objectifs

Initier les élèves ingénieurs aux outils du contrôle, la gestion de l'énergie et les systèmes temps réels à travers des projets proposés par les enseignants de l'option.

### Plan de l'enseignement

Selon les projets proposés

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C3 : Conduire des programmes complexes ou de changement de façon responsable
  - C3C1 : Concevoir un projet, un programme
    - Intermédiaire
  - C3C2 : Piloter, conduire
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

Aucune compétence observée

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Énergie propre et d'un coût abordable / Industrie, innovation et infrastructures

### Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Les projets proposés favorisent une approche responsable de la conception de systèmes performants, économes en énergie et adaptés aux enjeux industriels et sociétaux.

### 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 ECONTROL

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

## Gestion intelligente de l'énergie [GENER]

Responsable(s) du cours : Mickael HILAIRET

### Objectifs

Les objectifs de ce cours sont d'acquérir des connaissances et des compétences sur la commande des systèmes d'énergie renouvelables (EnR) (photovoltaïque, éolien) associées à des systèmes de sources/stockages (pile à combustible, électrolyser, batteries, supercondensateurs). Un miro-grid GENIUS intégrant des énergies renouvelables et du stockage à base d'hydrogène (en cours mise en place à l'école) sera étudié afin d'illustrer l'intérêt de la supervision (contrôle haut niveau, gestion optimisée et intelligente de l'énergie électrique) et celles du dimensionnement.

### Plan de l'enseignement

1. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC
2. Conception et développement de régulateurs pour la gestion de puissance entre une pile à combustible et des supercondensateurs
3. Dimensionnement d'un système PV/batterie

### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

F. K/bidi, C. Damour, D. Grondin, M. Hilairet, M. Benne, "Multistage power and energy management strategy for hybrid microgrid with photovoltaic production and hydrogen storage", Applied Energy, 2022, doi 10.1016/j.apenergy.2022.119549

T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, C. Marchand, É. Berthelot. An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Source. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (12), pp.4024-4031. 10.1109/tie.2010.2044123. hal-02054691

M. Hilairet, M Ghanes, O. Béthoux, V Tanasa, J-P Barbot, et al.. A passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system. Control Engineering Practice, 2013, 21 (8), pp.1097 - 1109. 10.1016/j.conengprac.2013.04.003. hal-00923716v2

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

Aucune compétence observée

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Consommation et production responsables / Énergie propre et d'un coût abordable / Lutte contre les changements climatiques

### Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

L'ensemble du module aborde le dimensionnement et le pilotage de sources d'énergies d'origine renouvelables.

## Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	10 hrs	6 hrs	16 hrs	0 hrs	0 hrs

## INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

### Model checking et IA [MCIA]

*Responsable(s) du cours : Olivier Henri ROUX*

#### Objectifs

Les systèmes critiques sont soumis à de nombreuses contraintes parce qu'ils sont en interaction étroite avec des procédés dangereux ou interviennent dans des processus de décisions impactant des vies humaines. Le développement de tels systèmes doit offrir des garanties de bon fonctionnement et de bon rétablissement en cas de défaillance d'une partie interne ou d'un environnement non prévu. Les modèles et méthodes formelles permettent de garantir des propriétés de sûreté de fonctionnement et ainsi d'augmenter le degré de confiance en ces systèmes,

Certains systèmes embarqués par exemple dans l'avionique, l'automobile ou les éoliennes sont particulièrement critiques et avec de fortes contraintes temps réel. D'autres sont soumis à des contraintes énergétiques car alimentés par des batteries ou des super-condensateurs rechargés de manière intermittente par des panneaux photovoltaïques.

Ce cours a pour but de présenter les modèles et méthodes de vérifications formelles allant de modèles discrets (graphes, automates finis) à des modèles permettant de prendre en compte le temps, des paramètres et des variables de coût permettant la modélisation de la consommation d'énergie.

Ces mêmes modèles permettent de traiter une partie du vaste sujet de l'intelligence artificielle. Parmi les nombreux concepts regroupés sous ce mot-clé générique, nous étudierons plus particulièrement :

- Le raisonnement stratégique, basé sur les graphes et la théorie des jeux
- exploration de graphes
- non-déterminisme
- observation partielle
- exploration d'arbres de jeu

#### Plan de l'enseignement

- Modèles discrets
- Modèles temporisés, paramétrés et à coût
- Vérification, Synthèse de paramètres, Synthèses de stratégies
- Introduction à l'apprentissage profond

#### Bibliographie sur laquelle s'appuie le cours

Bouyer, P., Fahrenberg, U., Larsen, K. G., Markey, N., Ouaknine, J., & Worrell, J. (2018). Model Checking Real-Time Systems. In Handbook of Model Checking (pp. 1001-1046). Springer Publishing Company. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10575-8\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10575-8_29)

## Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

## Compétences observées via cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - Intermédiaire

## Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Consommation et production responsables / Énergie propre et d'un coût abordable

## Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Les techniques de vérification formelle permettent de garantir le bon fonctionnement de systèmes utilisés dans des domaines sensibles tels que les énergies renouvelables (éoliennes), les transports ou l'avionique, où les défaillances peuvent avoir des conséquences humaines, environnementales et économiques majeures. L'intégration de modèles prenant en compte le temps, les coûts et la consommation énergétique permet également d'optimiser des systèmes embarqués contraints en énergie, alimentés par des batteries, des super-condensateurs ou des sources renouvelables intermittentes comme le photovoltaïque. En renforçant la sûreté, la robustesse et l'efficacité énergétique de ces systèmes, ce cours participe au développement de technologies durables, résilientes et respectueuses de l'environnement.

## 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 ECONTROL

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

## Projet 2 [P2ECONTROL]

*Responsable(s) du cours : Mohamed Assaad HAMIDA*

### Objectifs

Initier les élèves ingénieurs aux outils du contrôle, la gestion de l'énergie et les systèmes temps réels à travers des projets proposés par les enseignants de l'option.

### Plan de l'enseignement

Selon les projets proposés

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C3 : Conduire des programmes complexes ou de changement de façon responsable
  - C3C1 : Concevoir un projet, un programme
    - Intermédiaire
  - C3C2 : Piloter, conduire
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

Aucune compétence observée

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Énergie propre et d'un coût abordable / Industrie, innovation et infrastructures

### Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Les projets proposés favorisent une approche responsable de la conception de systèmes performants, économes en énergie et adaptés aux enjeux industriels et sociétaux.

### 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 ECONTROL

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

## Projet énergie [PENNER]

Responsable(s) du cours : Mickael HILAIRET

### Objectifs

Les objectifs sont l'acquisition de compétences scientifiques, techniques et technologiques dans le domaine de l'énergie électrique. Ceci allant de la commande et de l'observation des systèmes électriques à la mise en œuvre d'algorithmes en temps-réel sur des systèmes embarqués.

### Plan de l'enseignement

- Établir le cahier des charges en fonction de des besoins
- Proposer des solutions à partir des méthodes vues en cours ou/et de la littérature
- Discuter des solutions par rapport au cahier des charges, éventuellement remettre en cause ce cahier des charges par rapport à sa faisabilité économique, technologique et sociétale
- Concevoir le système
- Tester au moins en simulation et en expérimentation lorsque c'est possible
- Exemple de projets : Commande vectorielle sans capteur de position et observation de la position d'une machine synchrone, commande d'un moteur pas-à-pas via un FPGA (VHDL, processeur ARM), mise en oeuvre d'une PWM pour la commande d'un pont complet sur un  $\mu$ C STM32, etc

### Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C1 : Concevoir et prototyper des dispositifs innovants et créateurs de valeur
  - C1C2 : Oser
    - Intermédiaire
- C3 : Conduire des programmes complexes ou de changement de façon responsable
  - C3C1 : Concevoir un projet, un programme
    - Intermédiaire

### Compétences observées via cet enseignement

- C3 : Conduire des programmes complexes ou de changement de façon responsable
  - Intermédiaire

### Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Énergie propre et d'un coût abordable / Industrie, innovation et infrastructures

### Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

L'ensemble du module traite de la mise en oeuvre matérielle et logicielle pour la commande de systèmes électriques telles que les sources d'énergie renouvelables.

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	0 hrs	6 hrs	26 hrs	0 hrs	0 hrs

## INGÉNIEUR - OD ECONTROL

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

# Rôle de l'électricité pour la transition énergétique [TENER]

Responsable(s) du cours : Benoit HILLOULIN

## Objectifs

Nous parlons souvent de la transition énergétique, dans la première partie de ce cours nous souhaitons aborder le rôle de l'électricité pour cette transition. La deuxième partie est destinée à la présentation de la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie et à celle des diverses considérations devant être prises en compte lors de la réalisation d'une telle étude, en particulier les matériaux nécessaires à l'électrification. Les outils les plus courants permettant de mettre en œuvre une Analyse de Cycle de Vie ainsi que les bases des données utilisées par les logiciels spécialisés dans le domaine sont également présentées. Après avoir suivi le cours, le candidat devrait acquérir les connaissances et compréhensions approfondies suivantes :

- Appréhender l'énergie électrique et son rôle dans la transition énergétique dans son environnement global (politique, climatique, économique, sociétal)
- Acquérir les connaissances de base sur les principes et le cadre méthodologique de la démarche d'ACV, notamment en ce qui concerne sa mise en œuvre, l'interprétation et l'analyse des résultats.

## Plan de l'enseignement

- Historique, Contexte réglementaire général, problématique du climat
- Géopolitique des énergies et objectifs de réduction des GES
- Les Énergies renouvelables
- Rôle de l'électricité pour la transition énergétique
- Les services d'efficacité énergétique (décarbonations dans l'industrie, audit énergétique réglementaire, norme ISO 50001, ...)
- Matériaux pour l'électrification (énergie et mobilité)
- Intérêt et méthodes d'ACV
- Manipulation d'outils dédiés à la réalisation d'ACV
- Mise en application des connaissances par le biais de travaux pratiques

## Compétences auxquelles forme cet enseignement

- C2 : Analyser un système complexe, dans toutes ses dimensions (scientifiques, économiques, humaines, sociale) et proposer une solution
  - C2C1 : Représenter et modéliser
    - Intermédiaire
  - C2C2 : Résoudre et arbitrer
    - Intermédiaire

## Compétences observées via cet enseignement

Aucune compétence observée

## Objectifs de Développement Durable (ODD) couverts par cet enseignement

Consommation et production responsables / Énergie propre et d'un coût abordable / Industrie, innovation et infrastructures / Lutte contre les changements climatiques

## Positionnement Développement Durable et Responsabilité Sociétale

Concepts en lien avec la raréfaction des ressources et l'analyse de cycle de vie pour les systèmes énergétiques.

## 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	10 hrs	12 hrs	8 hrs	0 hrs	2 hrs