

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

نموذج مطابقة و مواءمة

عرض تكوين ماستر أكاديمي
2026 – 2025

التخصص	الشعبة	ميدان
فيزياء الطاقوية و الطاقات المتجددة	الفيزياء	علوم المادة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Canevas de mise en conformité et
harmonisation
OFFRE DE FORMATION**

L.M.D. MASTER ACADEMIQUE

2025 – 2026

Domaine	Filière	Spécialité
SCIENCES DE LA MATIERE	PHYSIQUE	PHYSIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES

II – Fiche d'organisation semestrielle des enseignements
(S1 , S2 et S3)

Semestre 1 :

Unité d'Enseignement	Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres (travail personnel)	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
	Intitulé	15 semaines	C	TD	TP				Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 1 Crédits : 18 Coefficient : 9	Transfert de chaleur et de masse	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Physique des semi-conducteurs avancée	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Aérodynamique	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Energie de la biomasse et combustion	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM 1 Crédits : 9 Coefficient : 5	Intelligence artificielle et Machine Learning1	15h00			1h00	10h00	1	1	50%	50%
	Choisir deux matières parmi :									
	Echangeurs de Chaleur et de Masse	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	50%	50%
	Modélisation et Simulation Numérique		1h30		1h30					
	TP Aérodynamique	45h00			3h00	55h00	2	4	50%	50 %
Systèmes électriques pour les énergies renouvelables	1h30		1h30							
Choisir deux matières parmi :										
UE Découverte Code : UED 1 Crédits : 2 Coefficient : 2	Maîtrise de l'énergie et environnement	22h30 22h30	1h30			2h30	1	1		100%
	Nucléaire comme source d'énergie		1h30			2h30	1	1		100%
	Thermoélectricité									
UE Transversale Code : UET 1 Crédits : 1 Coefficient : 1	Programmes open sources pour l'énergétique	22h30			1h30	2h30	1	1		100%
Total Semestre 1		375h	13h30	4h30	7h00	7h00	17	30		

Semestre 2 :

Unité d'Enseignement	Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres (travail personnel)	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation		
	Intitulé	15 semaines	C	TD	TP				Continu	Examen	
UE Fondamentale Code : UEF 2 Crédits : 18 Coefficient : 9	Conversion Photovoltaïque	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%	
	Thermodynamique avancée	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%	
	Energie éolienne et hydraulique	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%	
	Nanotechnologie pour l'énergie	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%	
UE Méthodologie Code : UEM2 Crédits : 9 Coefficient : 5	Intelligence artificielle et Machine Learning 2	15h00			1h00	10h00	1	1	50%	50%	
	Turbomachines	45h00	1h30		1h30	55h00	2	4	50%	50%	
	Choisir une matière parmi :										
	TP Thermodynamique	45h00			3h00	55h00	2	4	50%	50%	
	TP Conversion d'Energie										
Propriétés diélectriques des matériaux		1h30	1h30								
UE Découverte Code : UED2 Crédits : 2 Coefficient : 2	Choisir deux matières parmi :										
	Energétique du bâtiment	22h30	1h30			2h30	1	1		100%	
	Transition de phases	22h30	1h30			2h30	1	1		100%	
UE Transversale Code : UET2 Crédits : 1 Coefficient : 1	Physique du solide avancée										
	Entrepreneuriat, Innovation et Startup	22h30	1h30			2h30	1	1		100%	
Total Semestre 2		375h	13h30	6h00	5h30	375h	17	30			

Semestre 3

Unité d'Enseignement	Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres (travail personnel)	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
	Intitulé	15 semaines	C	TD	TP				Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 3 Crédits : 18 Coefficient : 9	Hydrogène vert : Production et applications	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Matériaux fonctionnels pour l'énergie	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Bioénergétique	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Energie solaire thermique et géothermie	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM3 Crédits : 9 Coefficient : 5	Logiciels de dimensionnement & programmes open source	30h00			2h00	45h00	1	3	50%	50%
	Choisir deux matières parmi :									
	Caractérisation & simulation des Semiconducteurs	37h30			2h30	37h30	2	3	50%	50%
	TP Piles à combustible									
	Capteurs et instrumentation	37h30				37h30	2	3	50%	50%
Analyse et optimisation des systèmes énergétiques	1h30			1h00						
UE Découverte Code : UED3 Crédits : 2 Coefficient : 2	Choisir deux matières parmi :									
	Systèmes énergétiques intelligents	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
	Propriétés physiques des matériaux									100%
UE Transversale Code : UET3 Crédits : 1 Coefficient : 1	Milieux poreux	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
	Gestion de projet de fin d'étude	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
Total Semestre 3		375h	12h00	6h00	7h00	375h	17	30		

Programmes des Semestres

Adapter le programme des cours et travaux dirigés (TD) en fonction du volume horaire hebdomadaire présentiel (VHH présentiel) et du volume horaire hebdomadaire personnel (VHH personnel).

Semestre : 1

UE : Fondamentale

Matière : Transfert de chaleur et de masse

Objectifs de l'enseignement

- *Comprendre les mécanismes de transfert thermique en régime transitoire et les méthodes mathématiques associées.*
- *Maîtriser les lois fondamentales du rayonnement thermique et les bilans radiatifs entre surfaces.*
- *Étudier les phénomènes diffusifs et convectifs de transfert de masse, avec des applications concrètes.*

Connaissances préalables recommandées

Il est recommandé d'avoir bien maîtrisé les bases de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Une bonne compréhension des modes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement) est essentielle.

Contenu de la matière :

1 . Conduction en régime variable (5 semaines)

- Systèmes à température uniforme
- Validité de l'hypothèse du corps mince
- Solides semi-finis
- Solution générale pour le cas simplifié
- Méthode de séparation de variables

2 . Rayonnement (3 semaines)

- Rappels sur les notions et lois du rayonnement thermique
- Rappels sur les propriétés radiatives d'une surface
- Bilan radiatif entre surfaces séparées par un milieu transparent

3 . Transfert de masse (6 semaines)

- La définition du flux de matière
- Transport diffusif, Loi de Fick
- Description du transfert de la matière dans un milieu stationnaire
- Bilan de matière
- Transfert diffusif en régime permanent
- Conditions aux limites et diffusion de matière à une interface
- Evaporation et sublimation
- Solubilité des gaz dans les liquides et solides
- Réaction des surfaces catalytiques (ou la catalyse)
- Description de la catalyse
- Transfert diffusif en régime variable

Références

- [1] Fundamentals of heat and mass transfer, Incropera, Wiley, 6 eme edition, USA, 2006
- [2] Heat transfer, Cengel, 2 eme edition, USA, 2002
- [3] Conduction of heat in solids, H. S. CARSLAW et J. C. JAEGER, Oxford, 1959.
- [4] Initiation aux transferts thermiques, J. F. SACADURA, Paris, 1978.
- [5] Maillet D., André A., Batsale J.-C., Degiovanni A., Moyne C., « Thermal quadrupoles », John Wiley & Sons
- [6] Özisik M. N., « Heat conduction », John Wiley & Sons, Inc., 1993.

Semestre : 1

UE : Fondamentale

Matière : Physique des semi-conducteurs avancés

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à fournir une compréhension approfondie des fondements théoriques et des propriétés physiques des semi-conducteurs avancés, en couvrant les concepts quantiques, les modèles statistiques, les mécanismes de transport électrique, ainsi que les effets optiques. Il intègre également une exploration des matériaux désordonnés et des applications industrielles (photovoltaïque, électronique). L'objectif est de permettre aux étudiants d'analyser, modéliser et appliquer ces connaissances à la conception et à l'optimisation de dispositifs technologiques.

Connaissances préalables recommandées

Une solide base en physique quantique élémentaire et en structure du solide est nécessaire.

Il est conseillé d'avoir étudié les principes de base de l'électronique (jonction PN) et les statistiques quantiques

Contenu de la matière :

1. Fondamentaux des semi-conducteurs (3 semaines)

États quantiques du cristal

- Théorème de Bloch, structure de bandes, distinction métal/isolant/semi-conducteur.
- Simplification : Éviter les calculs détaillés des bandes (ex : méthode LCAO ou DFT).

Impuretés et trous

- Notion de trou, niveaux d'impuretés, semi-conducteurs dopés (n/p).
- Application : Exemples concrets (diodes, transistors).

2. Statistique et propriétés électroniques (3 semaines)

- Statistique des porteurs
- Distribution de Fermi-Dirac, potentiel chimique, semi-conducteurs purs vs dopés.
- Simplification : Se concentrer sur les ordres de grandeur (ex : concentration de porteurs à température ambiante).

3. Transport électrique (3 semaines)

- Transport classique et semi-classique
- Mobilité, effet du dopage, mécanismes de diffusion (phonons, défauts).
- Application : Loi d'Ohm locale, conductivité.

4. Effets optiques et lumière (2 semaines)

- Absorption de la lumière
- Transitions interbandes, photoconductivité, recombinaison (directe/indirecte).
- Application : Photovoltaïque (panneaux solaires), LED.

5. Matériaux désordonnés (2 semaines)

- Semi-conducteurs non cristallins
- Localisation d'Anderson, conduction par saut, silicium amorphe.
- Simplification : Se limiter aux concepts qualitatifs (ex : impact des défauts sur la mobilité).

6. Synthèse et approfondissements (2 semaines)

- Densité des états et applications
- Densité d'états dans les bandes, pseudo-gap, applications en électrochimie ou optique.
- Approfondissement : Relier aux propriétés des matériaux réels (ex : graphène, pérovskites).

Références

[1] B. Sapoval et C. Hermann, Physique des semiconducteurs, Ellipse, 1991.

[2] B. G. Streetman, Solid State Electronic devices, Prentice-Hall Inc 1990.

Semestre : 1

UE : Fondamentale

Matière : Aérodynamique

Objectifs de l'enseignement

L'objectif est de fournir aux étudiants les bases théoriques et pratiques nécessaires pour comprendre les phénomènes aérodynamiques et leur application dans la conception et l'analyse de systèmes aéronautiques ou éoliens.

Il s'agit également de développer des compétences en modélisation, en simulation numérique et en expérimentation aérodynamique.

Connaissances préalables recommandées

Une bonne maîtrise de la mécanique des fluides classique (Navier-Stokes, Bernoulli) est indispensable.

Des connaissances sur les nombres adimensionnels (Reynolds, Mach) et les phénomènes aérodynamiques sont requises.

Contenu de la matière :

1. Chapitre 1 : Introduction à l'aérodynamique (3 semaines)

- Définition et domaines d'application
- Échelle de Reynolds, types d'écoulements (laminaire, turbulent)
- Rappel sur la mécanique des fluides (équation de Bernoulli, continuité)

2. Chapitre 2 : Écoulements autour des corps (3 semaines)

- Écoulement autour d'un cylindre, d'une sphère
- Notion de couche limite (théorie de Prandtl)
- Séparation de l'écoulement et formation des tourbillons
- Influence de la forme sur la traînée

3. Chapitre 3 : Profils aérodynamiques (3 semaines)

- Géométrie des profils (cambrure, corde, incidence)
- Portance et traînée : origine physique
- Polaires aérodynamiques (Cl, Cd en fonction de l'angle d'attaque)
- Effet de sol et de bout d'aile

4. Chapitre 4 : Théorie de la portance (3 semaines)

- Théorie de Kutta-Joukowski
- Circulation et vortex
- Théorie des ailes (2D et 3D)
- Distribution de la portance

5. Chapitre 5 : Aérodynamique des bâtiments et structures (3 semaines)

- Écoulement autour des bâtiments
- Pressions aérodynamiques et confort thermique
- Stratégies de conception bioclimatique
- Impacts sur la ventilation naturelle

Références

- [1] André Boussinesq, Jean-Yves Sane, Michel J. L. Van Schie — *Aérodynamique*
- [2] H. Schlichting, K. Gersten — *Boundary-Layer Theory* (9e édition, Springer, 2017)
- [3] John D. Anderson Jr. — *Fundamentals of Aerodynamics* (7e éd., McGraw-Hill, 2017)
- [4] Joël Tricot — *Introduction à l'aérodynamique*

Semestre : 1

UE : Fondamentale

Matière : Energie de la biomasse et combustion

Objectifs de l'enseignement

- Comprendre les bases de l'aérodynamique et les équations fondamentales.
- Étudier les phénomènes de couche limite et leur impact sur les forces aérodynamiques.
- Maîtriser la géométrie des profils et les forces qu'ils génèrent.
- Approfondir les théories mathématiques expliquant la portance.
- Appliquer les concepts à l'ingénierie civile et environnementale.

Connaissances préalables recommandées

Il est recommandé de connaître les bases de la chimie organique et de la thermochimie.

Une compréhension des réactions de combustion et des enjeux environnementaux est importante.

Contenu de la matière :

1. Introduction générale (2 semaines)

- Définition de la biomasse
- Ressources de biomasse : lignocellulosique, résidus agricoles, forestiers, déchets organiques...
- Importance et place de la biomasse dans le mix énergétique
- Avantages et inconvénients de l'énergie de la biomasse

2. Caractérisation de la biomasse (4 semaines)

- Propriétés physiques : humidité, densité, granulométrie
- Analyse chimique
- Pouvoir calorifique : PCI et PCS
- Méthodes de caractérisation (thermogravimétrie, analyse élémentaire...)

3. Filières de conversion énergétique de la biomasse (2 semaines)

- Conversion thermochimique :
- Conversion biologique :

4. Combustion de la biomasse (3 semaines)

- Réactions chimiques fondamentales
- Conditions de la combustion complète/incomplète
- Diagramme de combustion
- Facteurs influençant la combustion : humidité, air comburant, température
- Rendement de combustion

5. Technologies de combustion (4 semaines)

- Foyers domestiques
- Chaudières à biomasse
- Turbines à vapeur avec biomasse
- Cogénération (CHP) à partir de la biomasse
- Émissions polluantes (CO, NOx, particules...) et traitement des fumées

Références

- [1] Demirbaş, A. Biomass and Bioenergy: Processing and Properties Springer, 2021.
- [2] Saidur, R., BoroumandJazi, G., et al. A review on biomass as a fuel for boilers Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(5), 2011, pp. 2262-2289.
- [3] Bridgwater, A.V. Biomass for Energy International Energy Agency (IEA) Bioenergy Report, 2018.
- [4] Martin, J. Énergie de la biomasse – Production, valorisation et applications énergétiques Editions Technip, 2009.
- [5] Lora, E.S., Andrade, R.V. Biomass for Energy: From Production to Application CRC Press, 2020.
- [6] Kondepudi, S.N. Introduction to Energy and Climate: Developing a Sustainable Environment Wiley, 2021

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : Intelligence Artificielle et Machine Learning 1

Objectifs de l'enseignement

Introduire les bases de l'IA et de l'apprentissage automatique (Machine Learning), en se concentrant sur leurs applications dans les sciences de la matière. Les étudiants comprendront les concepts fondamentaux de la modélisation basée sur les données et comment appliquer les techniques de l'apprentissage automatique pour résoudre des problèmes du monde réel.

Connaissances préalables recommandées

Une bonne maîtrise des bases des mathématiques (algèbre linéaire, statistiques, probabilités, calcul différentiel) est indispensable. Des connaissances en programmation (notamment en Python), ainsi qu'une première expérience avec les algorithmes ou la science des données sont fortement recommandées

Contenu de la matière :

1. Introduction à l'IA et à l'apprentissage automatique (2 semaines)

- Aperçu de l'IA et de ses applications.
- Importance des données dans l'IA et l'apprentissage automatique.

2. Concepts de base de l'apprentissage automatique (3 semaines)

- Apprentissage supervisé ou non supervisé.
- Algorithmes clés de l'apprentissage automatique : régression, classification, regroupement.
- Mesures d'évaluation (MAE, R^2 , précision).

3. Collecte et traitement des données (3 semaines)

- Ingénierie des caractéristiques et techniques de prétraitement des données.
- Traitement de l'ajustement excessif et de l'ajustement insuffisant.
- Bases de données sur les matériaux : Materials Project, OQMD, AFLOW.

4. Apprentissage automatique (Machine Learning) pratique en sciences de la matière (4 semaines)

- Étude de cas : Prédiction des propriétés des matériaux (bande interdite, etc.).
- Utilisation de modèles d'apprentissage automatique pour des tâches simples de classification et de régression.

5. Fondements de l'apprentissage profond (3 semaines)

- Introduction aux réseaux neuronaux.
- Principaux cadres d'apprentissage profond : TensorFlow, Keras, PyTorch.
- Application : Prédiction de la structure cristalline à l'aide de réseaux neuronaux.

References :

[1] *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*; by Aurélien Géron (focuses on practical applications of machine learning)

[2] *Pattern Recognition and Machine Learning*; by Christopher M. Bishop (provides theoretical foundations of ML)

Outils et bibliothèques :

- Python, Jupyter Notebooks
- Scikit-learn, Pandas, Matplotlib
- Materials science tools: Matminer, Pymatgen

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : Echangeurs de Chaleur et de Masse

Objectifs de l'enseignement

À la fin du cours, l'étudiant doit être capable de :

- Maîtriser les principes fondamentaux des transferts de chaleur et de masse appliqués aux échangeurs.
- Comprendre et modéliser les phénomènes de changement de phase dans les échangeurs.
- Intégrer les développements technologiques innovants et les enjeux énergétiques dans le choix des échangeurs.

Connaissances préalables recommandées

Une solide formation en transferts thermiques et en thermodynamique industrielle est attendue.

Des notions sur les différents types d'échangeurs et leur dimensionnement sont nécessaires.

Contenu de la matière :

1. Mécanismes de convection (4 semaines)

- Convection naturelle et convection forcée : mécanismes physiques et équations fondamentales.
- Régimes d'écoulement laminaire et turbulent — critères de transition, relations empiriques classiques et modernes (ex : corrélations Dittus-Boelter, Gnielinski).
- Influence de la géométrie : canalisations cylindriques et non cylindriques, films liquides et écoulements autour d'obstacles (cylindres, sphères).
- Applications industrielles : faisceaux tubulaires, calandres d'échangeurs multitubulaires.
- Couplage conduction-convection et convection combinée.

2. Théorie et dimensionnement des échangeurs de chaleur (6 semaines)

- Configurations hydrauliques : co-courant, contre-courant, multipasses.
- Coefficient global d'échange thermique — calcul et interprétation.
- Méthodes d'analyse : différence de température moyenne logarithmique (DTML), efficacité énergétique (NTU method).
- Dimensionnement pratique des échangeurs multitubulaires.
- Technologies avancées : échangeurs à plaques, spirales, échangeurs compacts.
- Transfert avec changement de phase : condensation (film laminaire vs turbulence), évaporation, transferts diphasiques.
- Critères de sélection en fonction des performances thermiques et des contraintes industrielles.

3. Echangeurs de matière (5 semaines)

- Principes fondamentaux de la diffusion moléculaire et de la convection du transfert de masse.
- Lois de continuité et coefficients de diffusion dans les fluides.
- Transferts en phase unique et entre phases distinctes (extraction liquide-liquide, absorption gaz-liquide).
- Calcul des coefficients de transfert de masse, analogie chaleur-masse (Nusselt, Sherwood, Prandtl, Schmidt).
- Analyse des échangeurs de masse industriels et applications.
- Introduction aux phénomènes transitoires et aux transferts multicouches.
- Étude des systèmes couplés transfert thermique/masse.

Références :

- [1] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition, Wiley, 2017. (Référence incontournable et très complète sur les transferts de chaleur et de masse)
- [2] Kakac, S., Liu, H., Pramuanjaroenkij, A. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, 3rd Edition, CRC Press, 2012. (Spécialiste des échangeurs avec des méthodes avancées de dimensionnement)
- [3] Holman, J.P. *Heat Transfer*, 10th Edition, McGraw-Hill, 2010. (Texte classique avec de nombreuses applications et exemples)

[4] Cussler, E.L. *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems*, 3rd Edition, Cambridge University Press, 2009.

(Référence majeure pour la diffusion et transfert de masse)

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : Modélisation et Simulation Numérique

Objectifs de l'enseignement

- Maîtriser les outils mathématiques essentiels pour modéliser des systèmes thermiques, fluidiques et énergétiques.
- Comprendre et appliquer les méthodes de discrétisation pour résoudre des problèmes complexes
- Apprendre à optimiser des systèmes énergétiques via des méthodes classiques et numériques.
- Intégrer la variabilité des ressources énergétiques via des outils statistiques et simulations.

Connaissances préalables recommandées

Une bonne compréhension des méthodes numériques et de la programmation (Python, Matlab) est conseillée.

Des bases en discrétisation et en utilisation d'outils de simulation (OpenFOAM, COMSOL) sont utiles.

Contenu de la matière :

1. Fondamentaux mathématiques appliqués (3 semaines)

- Analyse vectorielle : gradient, divergence, rotationnel (important pour les champs de flux thermiques et fluides).
- Équations différentielles ordinaires (EDO) : dynamiques thermiques, stockage énergétique.
- Équations aux dérivées partielles (EDP) :
- Équation de la chaleur (conduction thermique).
- Équation de Navier-Stokes simplifiée (écoulements dans les systèmes hydrauliques ou éoliens).
- Équations de transport d'énergie (convection, rayonnement).

2. Méthodes numériques (3 semaines)

- Méthode des différences finies
- Méthode des éléments finis
- Méthodes des volumes finis

3. Optimisation énergétique (2 semaines)

- Optimisation de systèmes énergétiques : rendement thermique, positionnement optimal des panneaux solaires, etc.
- Introduction aux méthodes d'optimisation numérique (algorithmes classiques).

4. Initiation à la modélisation stochastique (3 semaines)

- Variabilité des ressources (ex: vent, irradiation solaire).
- Modèles statistiques et simulations Monte Carlo simples.

5. Applications pratiques en énergies renouvelables (4 semaines)

- Solaire : modélisation du rendement d'un panneau photovoltaïque selon l'irradiation.
- Éolien : modèle simplifié de production d'une éolienne (puissance en fonction de la vitesse du vent).
- Biomasse : modélisation de la cinétique de combustion.
- Systèmes hybrides : couplage éolien/solaire + stockage.

Travaux pratiques numériques (Python ou MATLAB/Octave) :

- 1-Simulation d'une cellule photovoltaïque.
- 2-Simulation thermique d'un bâtiment.
- 3-Résolution numérique de l'équation de la chaleur.
- 4-Projet de modélisation d'un micro-réseau énergétique.

Références

- [1] Bakhvalov N., Méthodes numériques, *Edition Mir*, 1976.
- [2] Baranger J., Introduction à l'analyse numérique ; *Hermann, Paris*, 1977.
- [3] Baranger J., Analyse numérique ; *Hermann, Paris*, 1991.
- [4] Steven C. Chapra et Raymond P. Canale; Numerical methods for engineers (*with personal computer applications*) ; *McGraw-Hill Book Company, U. S. A.*, 1985.
- [5] Vaissiere J. C. et Nougier J. P., Programmes et exercices sur les méthodes numériques ; *Masson, Paris*, 1990.

[6] Computational heat transfer, Y. JALURIA et K. E. TOTTANCE, Hemisphere publishing corporation, Springer-Verlag, 1986.

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : TP Aérodynamique

Objectifs de l'enseignement

- Comprendre les concepts fondamentaux de l'aérodynamique appliquée aux écoulements autour d'objets et dans des systèmes énergétiques.
- Maîtriser les techniques expérimentales de mesure des grandeurs aérodynamiques (vitesse, pression, forces).

Connaissances préalables recommandées

Une expérience pratique en laboratoire et une bonne compréhension de l'aérodynamique théorique sont requises.

Contenu de la matière :

Séance 1 : Introduction et sécurité en soufflerie

- Présentation des outils et du matériel : soufflerie, anémomètres, capteurs de pression, dynamomètres.
- Consignes de sécurité et gestion de l'appareil.
- Mise en route et réglages de base de la soufflerie.

Séance 2 : Mesure de profil de vitesses dans un écoulement laminaire

- Utilisation d'anémomètres (fil chaud, à volet) pour caractériser un écoulement laminaire.
- Cartographie des profils de vitesse au sein d'un conduit simple.
- Analyse des données et comparaison avec théorie.

Séance 3 : Étude de la traînée et portance sur un profil d'aile simple

- Mesure des forces aérodynamiques (portance, traînée) sur profils standards.
- Variation en fonction de l'angle d'attaque.
- Analyse des coefficients aérodynamiques.

Séance 4 : Effet des perturbations et rugosité

- Introduction aux perturbations d'écoulement et transition laminaire-turbulent.
- Influence de la rugosité sur le comportement aérodynamique, mesures expérimentales.

Séance 5 : Expérimentation sur pales d'éolienne ou section rotative

- Étude des performances aérodynamiques de pales type éolienne (portance, couple).
- Analyse comparative avec profils standards.
- Impact des conditions de vent (vitesse, turbulence).

Séance 6 : Mesure de pertes de charge dans des conduits et échangeurs

- Évaluation expérimentale des pertes de charge dans différents types de conduits.
- Application aux systèmes énergétiques (ventilation, refroidissement, etc.).

Séance 7 : Visualisation des écoulements et vortex

- Techniques de visualisation (fumée, colorants, particules).
- Observation des structures tourbillonnaires, séparation d'écoulement.

Séance 8 : Synthèse et projet expérimental

- Réalisation d'un mini-projet : choix de paramètre à étudier, prise de données, analyse critique.
- Présentation orale et rapport écrit.

Références

- [1] J. J. Bertin, M. Y. Cummings – Aerodynamics for Engineers, 6th Edition, Pearson, 2014.
- [2] Anderson, J. D. Jr. – Fundamentals of Aerodynamics, 6th Edition, McGraw-Hill, 2017.
- [3] C. Tropea, A. Yarin, J. F. Foss (Eds.) – Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Springer, 2007.

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : Systèmes électriques pour les énergies renouvelables

Objectifs de l'enseignement

- Comprendre les bases des systèmes électriques et leurs applications aux énergies renouvelables.
- Maîtriser les défis et méthodes d'intégration des énergies renouvelables au réseau électrique.
- Apprendre à contrôler et optimiser les systèmes électriques pour améliorer l'efficacité énergétique

Connaissances préalables recommandées

Une solide base en électrotechnique (conversion AC/DC, circuits électriques) est nécessaire.

Des connaissances sur les systèmes de stockage et l'intégration au réseau électrique sont recommandées.

Contenu de la matière :

1. Fondamentaux des systèmes électriques pour les énergies renouvelables (3 semaines)

- Introduction aux systèmes électriques : composants (générateurs, transformateurs, lignes, etc.).
- Caractéristiques des sources renouvelables (intermittence, variabilité).
- Principes de conversion d'énergie : électromécanique, électronique de puissance.
- Normes et réglementations pour l'intégration des EnR

2. Intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques (6 semaines)

A-Introduction à l'intégration au réseau électrique,

- Pourquoi le raccordement aux réseaux électrique ?
- Fonctionnalités attendues du raccordement d'une source sur le réseau.
- Critères d'insertion technique des ENR dans le système électrique,
- Système ER à injection dans le réseau,
- Système ER interchangeable de l'énergie avec le réseau,
- Choix du ou des convertisseurs d'interfaçage, dispositifs de protection, Gestion énergétique assurée par MPPT ... etc.

B-Intégration de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique :

- Système PV de faible puissance raccordé au réseau distribué
- Système PV intégré au bâtiment (BIPV : Building Integrated Photovoltaic),
- Centrale PV à injection dans le réseau,

C-Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique.

D-Intégration de piles à combustible au réseau électrique

- Constitution du stack,
- Dimensionnement de la source de puissance, choix du ou des convertisseurs d'interfaçage,
- Contrôle-commande du système Pile à Combustible.

3. Contrôle et optimisation des systèmes électriques (5 semaines)

- Contrôle-commande des systèmes électriques : automates, algorithmes de régulation.
- Électronique de puissance pour la conversion d'énergie (convertisseurs DC/AC, AC/DC).
- Optimisation énergétique : efficacité des systèmes, réduction des pertes.
- Simulation numérique multiphysique pour les systèmes électriques.

Références

- [1] Ackermann, T. (Ed.). (2012). *Wind Power in Power Systems*. Wiley. DOI: 10.1002/9781119941842.
- [2] Jones, L. E. (2017). *Renewable Energy Integration: Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids* (2nd ed.). Elsevier. ISBN: 978-0128095928.
- [3] Saadat, H. (2010). *Power Systems Analysis* (3rd ed.). PSA Publishing. ISBN: 978-0984543809.
- [4] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2014). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* (3rd ed.). Wiley. ISBN: 978-0471226932.

Semestre : 1

UE : Découverte

Matière : Maîtrise de l'énergie et environnement

Objectifs de l'enseignement

- *Comprendre les bases de l'énergie, ses impacts environnementaux et les enjeux globaux.*
- *Maîtriser les méthodes d'analyse statistique et temporelle pour évaluer la consommation énergétique.*
- *Apprendre à réaliser un audit énergétique et à proposer des mesures d'optimisation.*
- *Appliquer les principes de l'efficacité énergétique aux bâtiments via le solaire passif.*

Connaissances préalables recommandées

Une bonne compréhension des principes d'efficacité énergétique et de gestion énergétique est essentielle. Des notions sur les impacts environnementaux et les politiques énergétiques sont attendues.

Contenu de la matière :

1. Introduction : Energie et environnement (3 semaines)

- C'est quoi l'énergie ?
- Les principes de la thermodynamique
- Les problèmes environnementaux liés à l'énergie
- La consommation de l'énergie
- Les réserves énergétiques

2. Techniques d'analyse énergétiques (4 semaines)

- La consommation annuelle en énergie
- Les indicateurs de performance
- Analyse énergétique en fonction du temps
- Analyse de régression linéaire
- Variable indépendante unique
- Coefficient de corrélation
- Analyse multi- variable

3. Audit énergétique (4 semaines)

- Types d'audit énergétique
- Audit préliminaire
- Audit complet
- Rapport d'audit

4. Conception du bâtiment à basse consommation énergétique : Solaire passif (3 semaines)

- Chauffage solaire passif
- Refroidissement solaire passif

Références

- [1] La maîtrise de l'énergie ; Jean-Baptiste Lesourd, Jean-Yves Faberon
- [2] Energy management supply and conservation, Clive Beggs
- [3] Energy management handbook, Wayne C. Turner, Steve Doty

Semestre : 1

UE : Découverte

Matière : Nucléaire comme source d'énergie

Objectifs de l'enseignement

- Comprendre les principes fondamentaux de la physique nucléaire appliquée à la production d'énergie.
- Analyser les différents types de réacteurs nucléaires et leurs fonctionnements.
- Évaluer les aspects thermodynamiques, économiques et environnementaux de l'énergie nucléaire.
- Intégrer la place du nucléaire dans le mix énergétique actuel et futur, en comparaison avec les énergies renouvelables.
- Étudier les problématiques liées à la sûreté, la gestion des déchets et le cycle du combustible.

Connaissances préalables recommandées

Une initiation à la physique nucléaire (fission, réactions en chaîne) est indispensable.

Des connaissances de base sur le fonctionnement des réacteurs et la sûreté nucléaire sont nécessaires.

Contenu de la matière :

1. Principes fondamentaux de la physique nucléaire (3 semaines)

- Structure du noyau atomique, radioactivité, types de désintégrations.
- Fission nucléaire : mécanismes, énergie de liaison, neutrons et réactions en chaîne.
- Activation neutronique et réactions neutroniques (diffusion, absorption).
- Concepts de criticité et contrôle de la réaction.

2. Technologies des réacteurs nucléaires (2 semaines)

- Types de réacteurs : REP, RBMK, EPR, réacteurs rapides, réacteurs à sels fondus.
- Fonctionnement et composants principaux d'un réacteur.
- Transfert thermique, refroidissement, cycles thermodynamiques associés.
- Systèmes de contrôle et sécurité des réacteurs.

3. Cycle du combustible et gestion des déchets (2 semaines)

- Extraction, enrichissement, fabrication du combustible.
- Cycle combustible : fonctionnement, retraitement, recyclage.
- Gestion des déchets nucléaires : types, stockage, impact environnemental.

4. Aspects thermodynamiques et rendement énergétique (3 semaines)

- Bilan énergétique des centrales nucléaires.
- Comparaison avec autres sources d'énergie (fossile, renouvelables).
- Optimisation des cycles thermiques couplés aux réacteurs.

5. Sûreté nucléaire et risques associés (2 semaines)

- Analyse des risques : accidents, fuites, impacts sanitaires.
- Normes et réglementations internationales.
- Méthodes d'analyse probabiliste de sûreté.
- Gestion de crise et mesures de prévention.

6. Intégration du nucléaire dans le mix énergétique (2 semaines)

- Contribution de l'énergie nucléaire à la transition énergétique.
- Interactions avec les énergies renouvelables et stockage d'énergie.
- Perspectives technologiques : fusion, micro-réacteurs, réacteurs de 4ème génération.
- Enjeux économiques, politiques et sociaux.

Références

- [1] Glasstone, Samuel & Sesonske, Alexander — *Nuclear Reactor Engineering*, Springer, 2004.
- [2] IAEA — *Nuclear Energy Basic Principles*, International Atomic Energy Agency publications.
- [3] Lamarsh, John R. & Baratta, Anthony J. — *Introduction to Nuclear Engineering*, Pearson, 2001.
- [4] Till, C. E. & Chang, Y. I. — *Plentiful Energy: The Story of the Integral Fast Reactor*, 2011.

Semestre : 1

UE : Découverte

Matière : Thermoélectricité

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à fournir une compréhension approfondie des principes physiques, des applications pratiques et des avancées technologiques de la conversion d'énergie thermoélectrique. Il permettra aux apprenants :

- D'acquérir les bases théoriques (effets Seebeck, Peltier, Thomson) et les paramètres influençant le rendement (ZT).*
- D'explorer les applications actuelles (récupération de chaleur, refroidissement, électronique portable) et les défis industriels .*
- De maîtriser la conception de modules thermoélectriques et l'optimisation des matériaux classiques et innovants.*
- De s'initier aux voies de recherche émergentes (nanostructuration, matériaux biosourcés, apprentissage automatique).*

Connaissances préalables recommandées

Une bonne maîtrise des propriétés physiques des matériaux et des effets thermoélectriques est requise. Des notions sur le transport des charges et la conductivité thermique sont importantes.

Contenu de la matière :

1. Aspects historiques (1 semaine)

Découverte des effets Seebeck, Peltier et Thomson - Premières applications historiques (XIX^e siècle)

2. Applications potentielles (3 semaines)

Génération d'électricité à partir de chaleur résiduelle - Refroidissement sans compresseur (effet Peltier)

Applications spatiales (RTG - Radioisotope Thermoelectric Generators) -

Électronique portable et capteurs autonomes

3. Principes de base (3 semaines)

Effet Seebeck : génération de tension par gradient thermique

Effet Peltier : transfert de chaleur par courant électrique

Effet Thomson : rôle du gradient de température dans un conducteur

4. Principe de conversion d'énergie et rendement (2 semaines)

Cycle de conversion énergétique (chaleur → électricité) - Rendement (η) et figure de mérite (ZT) -

Paramètres clés : conductivité électrique, conductivité thermique, coefficient Seebeck

5. Modules thermoélectriques (2 semaines)

Architecture des modules (couples p-n, soudure, substrats)

Dimensionnement (puissance électrique, ΔT , efficacité)

6. Matériaux thermoélectriques (2 semaines)

Matériaux classiques (Bi_2Te_3 , PbTe, SiGe) - Alliages et composites- Optimisation : nanostructuration, dopage, multicouches

7. Voies de recherche (2 semaines)

Structures de basse dimensionnalité (nanofils, super-réseaux) - Nouveaux matériaux prometteurs (Zintl phases, half-Heusler, oxydes) - Méthodes d'optimisation (calcul ab initio, machine learning)

Références

- [1] Thermoelectricity: An Introduction to the Principles ; Auteur : D.K.C. MacDonald; Éditeur : Dover Publications ; (2006)
- [2] Thermoelectric Materials: Emerging Research and Opportunities; Auteur : Terry M. Tritt
- [3] Éditeur : Momentum Press (2008)
- [4] Introduction to Thermoelectricity; Auteur : Julian Goldsmid; Éditeur : Springer (2010)

Semestre : 1

UE : Transversale

Matière : Programmes open sources pour l'énergétique

Objectifs de l'enseignement

Ce cours a pour objectif de doter les étudiants de compétences numériques avancées à travers la maîtrise des outils libres et open source

Connaissances préalables recommandées

Une expérience pratique avec les outils de modélisation énergétique et de simulation numérique est recommandée. Une familiarité avec Python, OpenFOAM ou EnergyPlus est un atout important.

Contenu de la matière :

Le contenu de cette matière n'est pas exhaustif compte tenu du caractère évolutif des outils informatiques. Une flexibilité est nécessaire en ce qui concerne le choix des meilleurs outils de simulation adaptés aux enseignements de l'établissement

1 . Introduction générale (1 semaine)

Importance de la simulation en sciences énergétiques.

Panorama des logiciels utilisés (MATLAB/Simulink, TRNSYS, PVsyst, ANSYS Fluent, HOMER, COMSOL, etc.).

2 . Rappels de modélisation mathématique (1 semaine)

Systèmes d'équations : algébriques, différentielles et différentielles partielles.

Notions de linéarisation, discrétisation.

3 . Outils de Simulation Numérique (2 semaines)

Introduction à MATLAB/Simulink : environnement, structures de base.

Utilisation de Python (avec Numpy, Scipy) pour des simulations simples.

4 . Simulation Thermique (2 semaines)

Modélisation du transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.

Simulation d'un échangeur de chaleur.

Introduction à TRNSYS pour la simulation énergétique des bâtiments.

5 . Simulation des Systèmes Solaires (2 semaines)

Présentation de PVsyst : dimensionnement et performance des installations photovoltaïques.

Cas pratiques : calcul de production d'une centrale solaire.

6 . Simulation des Systèmes Éoliens (2 semaines)

Modélisation de la production éolienne.

Utilisation d'HOMER pour l'étude de systèmes hybrides (solaire + éolien + stockage).

7 . Simulation CFD (Fluides) pour l'Énergétique (2 semaines)

Introduction à la mécanique des fluides numérique (CFD).

Initiation à ANSYS Fluent : simulation de flux d'air sur une pale éolienne.

8 . Applications avancées (selon niveau) (2 semaines)

Optimisation énergétique multi-objectifs.

Introduction rapide à COMSOL Multiphysics (pour couplage thermique, électrique, mécanique).

Travaux Pratiques (TP) :

TP1 : Prise en main de MATLAB/Simulink : résolution d'équations différentielles simples.

TP2 : Simulation thermique d'un mur solaire sous COMSOL ou TRNSYS.

TP3 : Dimensionnement et simulation d'une centrale photovoltaïque avec PVsyst.

TP4 : Simulation d'un micro-réseau hybride sous HOMER.

TP5 : Initiation à la simulation CFD sous ANSYS Fluent (profil d'écoulement autour d'une éolienne).

References

[1] Etter, D. M., Kuncicky, D. C., & Manolakis, D. G. (2017). *Introduction to MATLAB for Engineers* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

[2] Alrashid, H. A. (2008). *Power Generation, Operation, and Control*. Wiley-Interscience.

[3] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Wiley. ISBN : 978-0-470-87366-3

[4] Anderson, J. D. (2002). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill Education.

Semestre : 2

UE : Fondamentale

Matière : Conversion Photovoltaïque

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à fournir une compréhension approfondie des fondamentaux scientifiques, des technologies et des applications pratiques de l'énergie solaire photovoltaïque. Il permettra aux apprenants :

- *D'acquérir les bases physiques de la conversion photovoltaïque (photonique, semi-conducteurs, courbes I-V).*
- *De maîtriser les technologies existantes et émergentes (silicium, pérovskites, cellules bifaciales).*
- *De caractériser et analyser les performances des modules en fonction des conditions climatiques.*
- *De concevoir et dimensionner des systèmes photovoltaïques (autonomes ou raccordés au réseau).*
- *De comprendre les enjeux de maintenance, de fiabilité et d'impact environnemental (recyclage, durabilité).*

Connaissances préalables recommandées

Une bonne compréhension des bases en physique des semi-conducteurs et en électromagnétisme est indispensable. Des notions sur les cellules solaires et les principes de conversion d'énergie sont également recommandées.

Contenu de la matière :

1. Introduction générale (1 semaine)

- Potentiel solaire mondial et régional
- Principes de base de l'énergie solaire photovoltaïque

2. Physique de la conversion photovoltaïque (2 semaines)

-Photon, semi-conducteurs et génération de porteurs -Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque -Courbe I-V d'une cellule solaire -Rendement et facteurs influençant la performance

3. Technologies photovoltaïques (3 semaines)

- Cellules à base de silicium cristallin (mono- et polycristallin)
- Technologies couches minces (CdTe, CIGS, amorphe)
- Cellules à haute efficacité (multi-jonctions, PERC, Bifaciales)
- Nouvelles technologies (pérovskites, organiques)

4. Caractérisation et performances des modules (3 semaines)

-Paramètres électriques : Voc, Isc, Pmax, FF, rendement -Effets des conditions climatiques (température, irradiance) -Dégradations et vieillissement des modules

5. Composants des systèmes photovoltaïques (2 semaines)

-Générateurs photovoltaïques -Onduleurs et micro-onduleurs -Régulateurs de charge -Batteries et systèmes de stockage -Structures de support et suivi solaire

6. Dimensionnement des systèmes photovoltaïques (2 semaines)

-Estimation des besoins énergétiques -Calcul de la production solaire -Choix et dimensionnement des composants -Études de cas : systèmes autonomes et raccordés au réseau

7. Maintenance, fiabilité et impact environnemental (2 semaines)

-Maintenance préventive et curative -Durée de vie des installations photovoltaïques -Impact écologique et recyclage des panneaux solaires

Références

- [1] Green, Martin A. *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, Prentice-Hall, 1982.
- [2] Luque, Antonio, & Hegedus, Steven. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Wiley, 2^e édition, 2011.
- [3] Nelson, Jenny. *The Physics of Solar Cells*, Imperial College Press, 2003.
- [4] Sorin Bensoussan. *L'énergie photovoltaïque : Conversion, technologie et dimensionnement*, Dunod, 2016.

Semestre : 2

UE : Fondamentale

Matière : Thermodynamique avancée

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à approfondir les concepts fondamentaux de la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques, en mettant l'accent sur la compréhension et l'analyse des cycles thermodynamiques utilisés dans les centrales électriques, les moteurs thermiques et les systèmes de propulsion.

Connaissances préalables recommandées

Il est nécessaire de maîtriser les concepts fondamentaux de la thermodynamique classique (premier et deuxième principes, enthalpie, entropie).

Une solide base en analyse mathématique et en cycles thermodynamiques est fortement recommandée.

Contenu de la matière :

1. Introduction et rappels (1 semaine)

- Objectifs de la thermodynamique appliquée à l'énergie.
- Rappels fondamentaux (premier et second principe, variables d'état, fonctions d'état, entropie).

2. Diagrammes thermodynamiques & gaz réels (2 semaines)

- Transformations élémentaires et diagrammes (T-s, h-s, P-v).
- Propriétés des gaz réels, équations d'état (Van der Waals, Redlich-Kwong, etc.).

3. Cycles idéaux à vapeur (2 semaines)

- Carnot, Rankine, rendements idéaux.
- Notions de surchauffe et de régénération.

4. Améliorations des cycles à vapeur (1 semaine)

- Cycle avec resurchauffe.
- Soutirage et réchauffeurs.

5. Centrales thermiques à vapeur (1 semaine)

- Exemple d'application à une centrale réelle (fluide moteur, rendement global).
- Comparaison avec le modèle idéal.

6. Cycles des moteurs à combustion interne (2 semaines)

- Otto, Diesel, cycle mixte.
- Comparaison avec le Carnot.
- Rendements et pertes.

7. Cycles réels des moteurs thermiques (1 semaine)

- Notion de pertes réelles (frottement, transferts thermiques irréversibles).
- Applications pratiques (automobile, groupes électrogènes).

8. Air humide et applications (1 semaine)

- Mélange gaz-vapeur.
- Humidité relative, diagrammes psychrométriques.
- Applications : climatisation, séchage.

9. Turbines à gaz & cycles avancés (2 semaines)

- Cycle de Brayton, cycles de Stirling, Ericsson.
- Régénération, détente/compression étagées.

10. Cycles de propulsion & conclusion (2 semaines)

- Cycle du turboréacteur, statoréacteur.
- Cycles inversés (réfrigération, pompe à chaleur).
- Conclusion : choix de cycle selon l'application.

Références

- [1] Thermodynamique et Energétique, Lucien BOREL
- [2] Systèmes Energétiques, Renaud GICQUEL
- [3] Thermodynamique appliquée à l'Energétique, Francis-Emile MEUNIER
- [4] Thermodynamique Appliquée, Van-Wylen
- [5] Meunier : Livre : Thermodynamique de l'ingénieur, Dunod éditeur

Semestre : 2

UE : Fondamentale

Matière : Energie éolienne et hydraulique

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à fournir une compréhension approfondie des principes scientifiques, technologies et enjeux pratiques des énergies éolienne et hydraulique. Il permettra aux apprenants :

- *De maîtriser les fondamentaux aérodynamiques et hydrauliques (théorie de Betz, équation de Bernoulli).*
- *De concevoir et dimensionner des installations éoliennes et hydrauliques (choix de sites, turbines, rendement).*

Connaissances préalables recommandées

Une bonne connaissance de la mécanique des fluides et des principes de l'aérodynamique/ hydrodynamique est essentielle. Des notions sur les systèmes de production d'énergie et les turbines sont également utiles.

Contenu de la matière :

1. Introduction à l'énergie éolienne (2 semaines)

- Histoire et évolution des technologies éoliennes - Ressource éolienne : caractéristiques du vent
- Mesure et évaluation du potentiel éolien (anémométrie, cartographie)

2. Théories et concepts fondamentaux (2 semaines)

- Théorie de Betz et limite de puissance -Profil aérodynamique et générateurs de portance
- Performances des éoliennes (Cp, TSR, courbes caractéristiques)

3. Technologies des éoliennes (2 semaines)

- Éoliennes à axe horizontal (HAWT) et vertical (VAWT) - Composants principaux : pales, rotor, multiplicateur, générateur - Systèmes de contrôle : pitch, yaw, freins

4. Dimensionnement et implantation (2 semaines)

- Choix de la taille et type de machine - Calcul de la puissance récupérable
- Facteurs de capacité et disponibilité -Critères de choix du site (topographie, turbulence, vent moyen annuel)

5. Impact environnemental et intégration au réseau (1 semaine)

- Bruits, ombrage, biodiversité -Stockage de l'énergie éolienne -Couplage réseau - gestion de la variabilité

6. Introduction à l'énergie hydraulique (1 semaine)

- Ressources hydrauliques disponibles (rivières, chutes, marées)-Types d'installations : centrales au fil de l'eau, réservoirs, pompage-turbinage

7. Principes physiques et modélisation (1 semaine)

- Énergie cinétique et potentielle de l'eau -Equation de Bernoulli appliquée aux installations hydrauliques
- Rendement global d'une centrale hydraulique

8. Turbines hydrauliques (2 semaines)

- Types de turbines : Pelton, Francis, Kaplan -Choix de la turbine selon la hauteur de chute et débit
- Caractéristiques techniques : diagrammes de fonctionnement

9. Dimensionnement d'une centrale hydraulique (1 semaine)

- Calcul de la hauteur nette et du débit disponible -Puissance installée et énergie annuelle produite
- Critères de site : régime d'écoulement, sédimentation, étiage

10. Défis et innovations (1 semaine)

- Microcentrales hydrauliques -Hydroélectricité marine (hydroliennes)
- Impacts environnementaux et sociétaux

Références

- [1] *Wind Energy Explained*, J.F. Manwell, J.G. McGowan
- [2] *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, Aldo V. da Rosa
- [3] *Hydropower Engineering Handbook*, John S. Gulliver
- [4] *RETScreen Expert User Manual* (outil libre pour projets énergétiques)

Semestre : 2

UE : Fondamentale

Intitulé de la matière : Nanotechnologie pour l'énergie

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à fournir une compréhension approfondie des principes fondamentaux, des méthodes de synthèse et de caractérisation, des propriétés uniques, et des applications des nanomatériaux, avec un focus sur leur rôle dans les technologies énergétiques

Connaissances préalables recommandées

Une initiation aux bases de la physique du solide et aux propriétés des matériaux nanostructurés est requise. Des connaissances élémentaires en nanosciences et en chimie des matériaux sont recommandées.

Contenu de la matière :

1. Introduction aux nanosciences et nanotechnologies (1 semaine)

- Origine et histoire des nanosciences - Pourquoi les nanomatériaux et les nanotechnologies ?
- Définitions : nanomatériaux, nanosystèmes - Échelles et dimensions caractéristiques

2. Impact sociétal des nanosciences (1 semaine)

- Enjeux sociétaux et économiques - Nanotechnologies dans les secteurs énergie, santé, environnement, etc. - Risques perçus, débats éthiques

3. Stratégies de synthèse des nanomatériaux (2 semaines)

- Approches top-down vs. bottom-up - Techniques de synthèse : mécaniques, chimiques, physiques
- Auto-assemblage moléculaire - Exemples de procédés adaptés à l'énergie (ex : nanocouches pour cellules solaires)

4. Caractérisation des nanomatériaux (1 semaine)

- Méthodes physiques et chimiques : MEB, MET, AFM, STM, XPS, etc.
- Limites de résolution et contrastes - Notion de résolution spatiale et énergétique

5. Propriétés spécifiques aux dimensions nanométriques (1 semaine)

- Surface spécifique, effet de taille - Modifications des propriétés thermiques, électriques et optiques
- Comparaison nano vs. bulk

6. Propriétés électroniques quantiques (2 semaines)

- Confinement quantique : boîtes, fils, puits quantiques - Blocage de Coulomb, transistor à un électron
- Effet Hall quantique - Exemples : nanotubes de carbone, nanofils

7. Propriétés optiques des nanostructures (1 semaine)

- Plasmons de surface, polaritons phonons - Effets de taille sur la réponse optique
- Interaction lumière-matière aux échelles nanométriques

8. Nanofabrication et procédés industriels (2 semaines)

- Lithographies (optique, électronique, nano-impression) - Auto-assemblage dirigé
- Fabrication de membranes, couches minces, films nanostructurés
- Cas d'études : électrodes nanostructurées pour batteries ou supercondensateurs

9. Applications des nanomatériaux à l'énergie (1 semaine)

- Nanomatériaux pour photovoltaïque, pile à combustible, stockage
- Rendement et durabilité - Exemple : points quantiques dans cellules solaires

10. Sécurité, toxicité et impact environnemental (1 semaine)

- Évaluation des risques : toxicologie des nanomatériaux - Comportement dans l'environnement (aérosols, sol, eau) - Réglementation et précautions

11. Conclusion et perspectives (1 semaine)

- Grands défis actuels - Vers les nanotechnologies durables
- Discussion sur l'intégration de ces matériaux dans les futures solutions énergétiques

References

- [1] Nanotechnology: Understanding Small Systems ; Auteur(s) : Rogers, E., Adams, J.A., Pennathur, S.
- [2] Éditeur : CRC Press (Taylor & Francis Group) : 2019
- [3] Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications; Auteur : H. S. Nalwa ; Éditeur : CRC Press : 2009

Semestre : 2

UE : Méthodologie

Matière : Intelligence artificielle et Machine Learning 2

Objectifs de l'enseignement

S'appuyer sur les techniques de base de l'apprentissage automatique (Machine Learning) pour introduire l'apprentissage profond, les réseaux neuronaux et les concepts avancés d'apprentissage automatique pour les applications en sciences de la matière.

Connaissances préalables recommandées

Il est nécessaire d'avoir suivi un premier cours de machine learning et d'avoir une solide maîtrise des outils numériques associés. Une bonne expérience en programmation (notamment Python), statistiques et algorithmique est attendue.

Contenu de la matière :

1. Fondements de l'apprentissage profond (4 semaines)

- Introduction aux réseaux neuronaux.
- Principaux cadres d'apprentissage profond : TensorFlow, Keras, PyTorch.
- Application : Prédiction de la structure cristalline à l'aide de réseaux neuronaux.

2 . Modèles basés sur les graphes dans les sciences de la matière (4 semaines)

- Les matériaux sont des graphes : atomes = nœuds, liaisons = arêtes.
- Réseaux convolutionnels de graphes de cristaux (CGCNN).
- Étude de cas : Préviation des énergies de formation.

3 . Modèles génératifs pour la conception de matériaux (4 semaines)

- Introduction aux réseaux adversariels génératifs (GAN) et aux auto-encodeurs variationnels (VAE).
- Application : Conception de nouveaux matériaux et molécules.

4 . Évaluation des modèles et interprétabilité (3 semaines)

- Techniques d'évaluation des modèles d'apprentissage profond : validation croisée, surajustement.
- Interprétation des modèles avec SHAP et LIME.

Références:

[1] Deep Learning by Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville (a comprehensive introduction to deep learning)

[2] Deep Learning with Python by François Chollet (applies Keras for hands-on deep learning projects)

Outils et bibliothèques :

- Python, Jupyter Notebooks
- TensorFlow, PyTorch
- Matminer, Pymatgen

Semestre : 2
UE : Méthodologie
Matière : Turbomachines

Objectifs de l'enseignement

Ce module a pour objectif de fournir aux étudiants les connaissances théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement, de la classification et de la performance des turbomachines utilisées dans divers domaines énergétiques et industriels (pompes, compresseurs, turbines hydrauliques, ventilateurs).

À travers des travaux pratiques, les étudiants acquièrent également une expérience concrète sur différents types de machines, leur comportement en régime réel, et les méthodes de mesure et d'optimisation des performances.

Connaissances préalables recommandées

Une bonne maîtrise de la mécanique des fluides et des principes de la thermodynamique appliquée est indispensable.

Des notions sur les machines tournantes (pompes, turbines, compresseurs) sont également recommandées

Contenu de la matière :

1. Introduction (1 semaines)

- Thermodynamique et mécanique des fluides de base

2. Chapitre 1 : Pompes (2 semaines)

- Introduction, historique, classification des pompes et domaines d'application

3. Chapitre 2 : Les pompes volumétriques (2 semaines)

- Classification, caractéristiques, bilan énergétique, puissances et rendements, facteurs affectant les performances.

4. Chapitre 3 : Les pompes centrifuges (3 semaines)

- Fonctionnement et classification, triangles des vitesses, lois de similitude, vitesse spécifique, courbes caractéristiques, caractéristique résistante, caractéristique débitante, point de fonctionnement, modification des performances, cavitation, condition d'aspiration NPSH, couplage des pompes, série et parallèle

5. Chapitre 4 : Compresseurs (4 semaines)

- Introduction, classification et domaines d'application, compresseurs volumétriques (rotatifs et alternatifs) : design & technologie, thermodynamique de la compression : cycle de compression, bilan énergétique : puissances et rendements, turbocompresseurs (centrifuge et axiaux) : design & technologie, processus de la compression et performances, vitesse spécifique, coefficient de débit, coefficient de pression, nombre de Mach, pompage, contrôle du pompage, performances, courbes de performances.

6. Chapitre 5 : Turbines hydrauliques (3 semaines)

- Introduction : Définition, classification, turbine Pelton, triangle des vitesses, pertes & performances, turbine à réaction (Francis), caractéristiques, pertes, turbine axiale (Kaplan), caractéristiques, cavitation

Travaux pratiques

TP1 : Essai sur une pompe alternative avec pompe à piston

TP2 : Essai d'une pompe centrifuge (série / parallèle)

TP3 : Essai sur ventilateur axial

TP4 : Essai sur une pompe à engrenages

TP5 : Essai sur un compresseur à doubles étages

Références

- [1] Michel Pluviose, Conversion d'énergie par turbo-machines, éoliennes, turbines, Ellipses, 2005.
- [2] Michel Pluviose, Ingénierie des turbomachines, Circuits, vibrations, effets
- [3] instationnaires et des exercices résolus, génie énergétique, Ellipses, 2003.
- [4] René Bidard, Georges Bonnin, Énergétique et turbo-machines, Direction des études et
- [5] recherches d'électricité de France, Eyrolles, 1999.
- [6] Baltaretu E., "Les pompes centrifuges", EYROLLES, 1975

Semestre : 2

UE : Méthodologique

Matière : TP thermodynamique

Remarques : Le contenu de cette matière n'est pas exhaustif compte tenu du matériel disponible

Objectifs de l'enseignement :

Permettre aux étudiants de mettre en œuvre les lois fondamentales de la thermodynamique à travers des expériences pratiques. Développer une compréhension approfondie des transformations thermiques, des mélanges gazeux et des cycles moteurs via des manipulations en laboratoire. Apprendre à concevoir un protocole expérimental, collecter des données fiables, effectuer une analyse critique et les comparer aux modèles théoriques.

Connaissances préalables recommandées :

- Notions de base en thermodynamique (premier et deuxième principes)
- Lois des gaz parfaits, enthalpie, entropie
- Transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement)
- Bases en instrumentation scientifique et traitement de données

Contenu de la matière :

- 1. Détermination de l'exposant adiabatique de l'air**
 - Manipulation avec détente rapide d'un gaz
 - Mesure des variations de pression et température
 - Calcul de $\gamma = C_p/C_v$ pour l'air
- 2. Vérification de la loi de Dalton sur le mélange des gaz**
 - Mélange de deux gaz dans un volume commun
 - Mesure des pressions partielles et totale
 - Analyse de la validité de la loi de Dalton
- 3. Détermination de la chaleur latente de vaporisation de l'eau**
 - Mesure de la quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation
 - Utilisation d'un calorimètre ou montage équivalent
 - Interprétation des pertes thermiques
- 4. Étude expérimentale d'une turbine à gaz**
 - Montage simplifié d'un mini-cycle Brayton
 - Mesures des températures, pressions et puissance
 - Calcul du rendement isentropique et du travail spécifique
- 5. Étude des diagrammes thermodynamiques**
 - Utilisation du diagramme de Mollier et des tables de vapeur
 - Représentation des transformations sur ces diagrammes
- 6. Étude du cycle frigorifique**
 - Mesure des paramètres d'un compresseur
 - Calcul de l'effet frigorifique et du COP (Coefficient of Performance)
- 7. Calorimétrie et bilan énergétique**
 - Bilans thermiques simples (échangeurs, réacteurs, etc.)
 - Utilisation de capteurs de température et débitmètre
 - Comparaison entre valeurs théoriques et mesures
- 8. Propriétés thermiques des matériaux**
 - Mesure de la conductivité thermique
 - Caractérisation expérimentale de la dilatation et de la capacité calorifique

Références :

- [1] Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., & Desrochers, P. (1992). *Thermodynamique appliquée*. Éditions du Renouveau pédagogique.
- [2] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.
- [3] Borel, L., & Favrat, D. (2005). *Thermodynamique et énergétique* (Vol. 1). PPUR presses polytechniques.
- [4] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Semestre : 2

UE : Méthodologie

Matière : TP conversion d'Énergie

Remarques : *Le contenu de cette matière n'est pas exhaustif compte tenu du matériel disponible*

Objectifs de l'enseignement :

Permettre aux étudiants de mettre en œuvre les principes fondamentaux de la conversion d'énergie à travers des travaux pratiques concrets. Cette matière vise à renforcer les compétences techniques dans les technologies de conversion solaire (photovoltaïque et thermique), de stockage énergétique et de production hybride. L'étudiant sera capable de mesurer, analyser et optimiser les performances énergétiques de systèmes courants tels que les panneaux solaires, les modules Peltier et les systèmes PV-T.

Connaissances préalables recommandées :

- *Notions de base en thermodynamique et en transfert d'énergie*
- *Compréhension des principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques et des capteurs thermiques*
- *Bases en électricité et électronique (circuit électrique, lois d'Ohm, puissance)*

Contenu de la matière

TP 1 : Caractérisation électrique d'un panneau photovoltaïque

Objectif : Mesurer les courbes I-V et P-V d'un panneau solaire sous différentes conditions d'éclairement et de température.

TP 2 : Rendement d'un panneau photovoltaïque en fonction de la température

Objectif : Quantifier la dépendance du rendement des cellules PV à leur température.

TP 3 : Suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Objectif : Implémenter et tester un algorithme MPPT (ex. Perturb and Observe) pour optimiser la puissance extraite d'un panneau PV.

TP 4 : Conversion thermique de l'énergie solaire

Objectif : Étudier un capteur solaire thermique (ex. collecteur plat) et mesurer son rendement.

TP 5 : Système hybride PV-T (Photovoltaïque-Thermique)

Objectif : Évaluer un panneau hybride combinant production électrique et récupération thermique.

TP 6 : Stockage d'énergie thermique

Objectif : Tester un matériau de stockage thermique (ex. sel fondu ou paraffine) et mesurer sa capacité calorifique.

TP 7 : Générateur thermoelectrique (effet Seebeck)

Objectif : Convertir un gradient thermique en électricité via un module Peltier.

TP 8 : Analyse comparative de technologies PV

Objectif : Comparer les performances de panneaux en silicium monocristallin, polycristallin et couche mince (CIGS ou CdTe).

TP 9 : Modélisation et simulation de systèmes PV

Objectif : Simuler un système photovoltaïque avec logiciel (ex. MATLAB/Simulink, PVsyst).

TP 10 : Bilan énergétique d'un système solaire

Objectif : Évaluer l'impact environnemental et énergétique d'un système PV ou PV-T.

Références :

- [1] Convertisseurs photovoltaïques : Guide technique et pratique de Gérard Betton (2015)
- [2] Convertisseurs statiques pour l'énergie photovoltaïque de Daniel Roye (2006)
- [3] Systèmes photovoltaïques : Conception et dimensionnement de Antoine Bégueret (2016)
- [4] Convertisseurs de puissance : Cours et exercices corrigés de Xavier Roboam and Guy Sallé (2012)

Semestre : 2

UE : Méthodologie

Matière : Propriétés diélectriques des matériaux

Objectifs de l'enseignement

Ce module a pour objectif de fournir aux étudiants les bases théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension des propriétés électriques des matériaux isolants (diélectriques), avec un accent particulier sur leur comportement en présence d'un champ électrique.

Il vise à permettre aux étudiants d'analyser, mesurer et interpréter les phénomènes de polarisation, de conduction, de dispersion, ainsi que les mécanismes de claquage dans divers types de matériaux.

Connaissances préalables recommandées

Il est recommandé d'avoir des bases solides en électromagnétisme, physique du solide et électronique analogique. Une familiarité avec les mesures électriques et les propriétés des matériaux est également utile.

Contenu de la matière :

1. Introduction aux matériaux diélectriques (1 semaine)

Définition, rôle des diélectriques dans les systèmes électriques et électroniques. Classification des matériaux : isolants, semi-conducteurs, conducteurs.

2. Bases d'électromagnétisme appliqué (1 semaine)

Rappels sur les champs électriques, polarisation, induction électrique, lois fondamentales (Maxwell, Gauss, Poisson).

3. Phénomènes de polarisation (2 semaines)

Polarisation électronique, ionique, orientation, interfaciale. Relation entre polarisation et champ électrique. Susceptibilité électrique.

4. Réponse fréquentielle des diélectriques (2 semaines)

Spectroscopie diélectrique, dispersion et absorption. Modèles de Debye, Cole-Cole, relaxation de Havriliak-Negami.

5. Constante diélectrique et permittivité (1 semaine)

Mesure et interprétation de la permittivité relative. Facteur de perte, angle de perte diélectrique.

6. Conduction dans les diélectriques (2 semaines)

Courant de fuite, conduction ohmique et non-ohmique, effets de température et d'humidité, modèles de Poole-Frenkel, Schottky, etc.

7. Rigidité diélectrique et claquage (1 semaine)

Classement des matériaux selon leur tenue au claquage. Mécanismes de rupture : avalanche, thermoélectrique, surface, arc électrique.

8. Effets de température et vieillissement des diélectriques (1 semaine)

Effet de la température sur les propriétés diélectriques. Vieillesse thermique, électrique, chimique. Endurance diélectrique.

9. Diélectriques dans les condensateurs (1 semaine)

Choix des matériaux pour applications condensateur. Capacité volumique, densité d'énergie, pertes, applications haute fréquence et haute tension.

10. Matériaux piézoélectriques et ferroélectriques (1 semaine)

Principes physiques et applications. Différences avec les diélectriques linéaires. Exemples : quartz, PZT, BaTiO₃.

11. Nanodiélectriques et matériaux composites (1 semaine)

Avancées récentes dans les matériaux nanostructurés. Effets d'interface, amélioration des propriétés. Applications dans l'électronique moderne.

12. TP et mesures expérimentales (2 semaines)

Techniques de mesure : pont de mesure, spectroscopie impédancemétrique, générateur de signaux, analyseurs LCR. Analyse des résultats.

Références

- [1] Scaife, B.K.P., Principles of Dielectrics , Oxford University Press, 1989.
- [2] Chen, G., Dielectrics in Electric Fields , 2nd Edition, CRC Press, 2020.
- [3] Ibach, H. & Lüth, H., Solid-State Physics: An Introduction to Principles of Materials Science , Springer, 2009.
- [4] Solymar, L., Walsh, D., & Syms, R.R.A., Electrical Properties of Materials , 9th Edition, Oxford University Press, 2014.

Semestre : 2

UE : Découverte

Intitulé de la matière : Energétique du bâtiment

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à donner aux étudiants les bases théoriques et pratiques nécessaires pour comprendre et analyser les flux énergétiques dans les bâtiments, optimiser leur performance thermique et intégrer des solutions efficaces en matière de chauffage, ventilation, climatisation et énergies renouvelables.

Connaissances préalables recommandées

Une bonne maîtrise des principes de base en transfert de chaleur, thermodynamique appliquée et physique du bâtiment est nécessaire..

Contenu de la matière :

1. Introduction à l'énergétique du bâtiment (2 semaines)

- Rôle du bâtiment dans la consommation énergétique globale.
- Enjeux environnementaux et réglementaires (RE2020, BEPOS, HQE).
- Notions de confort thermique et de qualité de l'air intérieur.

2. Transferts thermiques dans l'enveloppe (2 semaines)

- Isolation thermique : matériaux et caractéristiques (conductivité, résistance, etc.)
- Ponts thermiques et performance de l'enveloppe.
- Modélisation des transferts thermiques (stationnaires et dynamiques).

3. Bilan énergétique global (3 semaines)

- Apports internes et externes (solaires, métabolisme, équipements).
- Déperditions : transmission et ventilation.
- Calcul des besoins de chauffage et de refroidissement.
- Utilisation des degrés-jours et méthode bin annuelle.

4. Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) (3 semaines)

- Rendement et dimensionnement des systèmes CVC.
- Pompes à chaleur, chaudières, systèmes hybrides.
- Ventilation naturelle et mécanique (VMC simple/double flux).

5. Intégration des énergies renouvelables (3 semaines)

- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, SSC)
- Solaire photovoltaïque (autoconsommation, couplage réseau)
- Géothermie et aérothermie
- Stockage thermique

6. Simulation énergétique du bâtiment (2 semaines)

- Introduction aux outils de simulation : EnergyPlus, DesignBuilder, TRNSYS...
- Analyse des scénarios d'occupation, météorologie, inertie thermique.
- Étude de cas : modélisation et simulation d'un bâtiment existant ou neuf.

Références

- [1] ADEME. L'énergie dans le bâtiment – Guide pratique. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, France.
- [2] Jean-Pierre Douziech, Jean-Pierre Noyé. Thermique du bâtiment - Cours et exercices corrigés. Dunod, 2018.
- [3] Michel De Smedt. Énergétique du bâtiment : Bases de calcul et simulation. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.
- [4] Jean-François Métezeau. Le bâtiment à énergie positive. Le Moniteur, 2014.
- [5] Binggeli, Corky. Building Systems for Interior Designers. Wiley, 2016.
- [6] Santamouris, M. Energy Performance of Residential Buildings: A Practical Guide for Energy Rating and Efficiency. Routledge, 2010.

Semestre : 2

UE : Découverte

Matière : Transition de phases

Objectifs de l'enseignement

À la fin du cours, l'étudiant sera capable de :

- Comprendre les principes physiques fondamentaux des transitions de phases dans les matériaux énergétiques.
- Analyser les phénomènes thermodynamiques et cinétiques associés aux changements d'état.
- Appliquer ces connaissances aux systèmes liés aux énergies renouvelables (stockage thermique, matériaux à changement de phase, etc.).

Connaissances préalables recommandées

Une bonne maîtrise des bases de la thermodynamique, notamment les concepts de premier et second principes, entropie, enthalpie et équilibre des phases. Des notions en physique statistique et en chimie physique des matériaux sont également utiles pour aborder les mécanismes et modèles de transitions de phase.

Contenu de la matière :

1. Introduction aux transitions de phases (2 semaines)

- Définitions et classification des transitions de phases (premier ordre, second ordre).
- Concepts thermodynamiques fondamentaux : énergie libre de Gibbs, enthalpie, entropie.
- Diagrammes de phases : lecture et interprétation.
- Critères d'équilibre et conditions de coexistence des phases.

2. Thermodynamique des transitions de phases (3 semaines)

- Relations fondamentales et équations d'état.
- Potentiels thermodynamiques et variables d'état.
- Modèles de transition : coexistence, métastabilité, surchauffe et surfusion.
- Phénomènes associés : chaleur latente, hystérésis, nucléation et croissance.

3. Cinétique des transitions de phases (2 semaines)

- Mécanismes cinétiques : nucléation homogène et hétérogène.
- Théories de la cinétique de transformation (classique, approches modernes).
- Influence de la taille, de la surface, des défauts.
- Techniques expérimentales d'étude cinétique (DSC, calorimétrie, microscopie).

4. Matériaux à changement de phase (PCM) et applications énergétiques (3 semaines)

- Principe des matériaux à changement de phase pour le stockage d'énergie thermique.
- Classes de matériaux PCM : organiques, inorganiques, hybrides.
- Propriétés thermophysiques importantes (capacité, enthalpie, conductivité thermique).
- Méthodes d'intégration des PCM dans les systèmes solaires, climatisation, bâtiment, etc.
- Modélisation du stockage thermique à base de PCM.

5. Transitions de phase dans les matériaux énergétiques avancés (3 semaines)

- Transitions dans les matériaux pour batteries, supercondensateurs et piles à combustible.
- Transitions magnétiques et ferroélectriques pour le stockage d'énergie.
- Matériaux à changement d'état pour la conversion thermique (thermoélectriques...).

6. Modélisation numérique et simulations (2 semaines)

- Approches de modélisation thermodynamique et cinétique.
- Méthodes numériques : éléments finis, réseaux de neurones, simulations Monte-Carlo.
- Étude de cas : modélisation d'un système intégrant PCM.

Références

- [1] P. G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré; Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves, Springer, 2004.
- [2] M. D. Neto, A. Cunha, L. F. Cabeza; Phase Change Materials — Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Elsevier, 2015.
- [3] J. S. Langer; Lectures in the Theory of Pattern Formation and Phase Transitions, Elsevier, 1987.
- [4] D. R. Gaskell; Introduction to the Thermodynamics of Materials, 5th Edition, Taylor & Francis, 2003.

Semestre : 2

UE : Découverte

Matière : Physique du solide avancée

Objectifs de l'enseignement

Ce module vise à fournir une compréhension approfondie des propriétés électroniques des solides en combinant théorie quantique et applications pratiques

Connaissances préalables recommandées

Il est recommandé d'avoir une solide maîtrise de la physique quantique, de la cristallographie et des bases des bandes d'énergie pour aborder les concepts avancés de la physique du solide, notamment les propriétés électroniques, magnétiques et thermiques des matériaux.

Contenu de la matière :

- 1. Théorie de Sommerfeld et rappels (2 semaines)**
 - Modèle de Drude vs. modèle de Sommerfeld - Notions de fonction de Fermi, densité d'états
 - Limites du modèle de Sommerfeld
- 2. Électrons dans un potentiel périodique : Théorie de Bloch (2 semaines)**
 - Équation de Schrödinger dans un cristal périodique - Fonctions de Bloch, théorème de Bloch
 - Zones de Brillouin
- 3. Approximation des électrons libres (1 semaine)**
 - Gaz d'électrons libres dans un cristal - Notion de bande vide
 - Diagrammes $E(k)$ et interprétation physique
- 4. Approximation des électrons fortement liés (1 semaine)**
 - Modèle de tight-binding (liaisons fortes) - Superposition d'orbitales atomiques
 - Application aux bandes étroites (ex : matériaux isolants, semi-conducteurs)
- 5. Bandes d'énergie et structure de bande (1 semaine)**
 - Formation des bandes d'énergie - Interdits de bande et conductivité
 - Comparaison métaux – semi-conducteurs – isolants
- 6. Modèle semi-classique de la dynamique des électrons (2 semaines)**
 - Équations de mouvement dans un champ E et B - Masse effective et courbure de bande
 - Interprétation de la dynamique électronique
- 7. Théorie semi-classique de la conduction (2 semaines)**
 - Conductivité électrique et thermique - Effet Hall et Hall quantique (introduction)
 - Temps de relaxation, mobilité électronique
 - Loi de Wiedemann-Franz
- 8. Effets de surface dans les solides (2 semaines)**
 - Physique des surfaces : relaxation, reconstruction - États électroniques de surface (ex. états de Tamm et Shockley)
 - Techniques de sonde de surface (STM, LEED, etc.)
- 9. Applications modernes (2 semaines)**
 - Matériaux topologiques (introduction) - Interfaces métal-semi-conducteur, effets de taille
 - Nanosystèmes et dispositifs quantiques

Références

- [1] Physique des solides, N.W. Ashcroft, N.D Mermin, traduit par F. Biet, H. Kachkachi, EDP Sciences, 2002
- [2] Introduction to solid state physics, C. Kittel, 5th , Wiley .1983.
- [3] H.E Hall, Solid state physics, Wiley ELBS ed ,1979
- [4] Solid State Physics, Hilary D. Brewster, Oxford Book Company, 2009

Semestre : 2

UE : Transversale

Intitulé de la matière : Entrepreneuriat, Innovation et Startup

Objectifs de l'enseignement

- *Initier les étudiants aux fondamentaux de l'entrepreneuriat technologique.*
- *Permettre de passer de l'idée au projet concret via des outils modernes (BMC, MVP, Scrum...).*
- *Encourager la création de projets innovants issus de la recherche scientifique.*
- *Développer le travail collaboratif en équipe autour d'un projet commun.*

Contenu de la matière :

1 . Introduction à l'entrepreneuriat technologique (2 semaines)

- Types d'entrepreneuriat : classique, technologique, vert, social
- Rôle de la science dans la création de valeur
- Profil de l'entrepreneur et compétences clés

Atelier : identification d'idées issues de la physique/chimie

2 . De l'idée au projet innovant (2 semaines)

- Méthodes de génération d'idées et créativité
- Identification des opportunités
- Approche utilisateur : besoins réels vs solutions techniques
- Étude de marché rapide et segmentation clientèle

Atelier : mini-questionnaire et validation terrain

3 . Modélisation et prototypage de projet (3 semaines)

- Business Model Canvas (modèle économique visuel)
- Proposition de valeur et segments clientèle
- Minimum Viable Product (MVP) et prototypage rapide

Atelier : conception d'un prototype technique ou visuel

4 . Gestion de projet et méthodologies (3 semaines)

- Cycle de vie d'un projet technologique
- Contraintes : coût, délais, qualité
- Méthodes classiques (cascade) et agiles (Scrum, Kanban)
- Outils numériques : Trello, Padlet, Excel (Gantt)

Atelier : organisation du projet sous forme Kanban

5 . Financement, accompagnement et propriété intellectuelle (2 semaines)

- Sources de financement : ANSEJ, CNAC, ANVRE, concours
- Dossier de financement : structure et éléments essentiels
- Brevets, marques, licences : protection de l'innovation

Atelier : simulation d'un dossier de demande de financement

6 . Projet pratique et soutenance (2 semaines)

- Finalisation du projet (pitch + prototype)
- Préparation de la soutenance orale
- Retour d'expérience et perspectives post-master

Références:

[1] Steve Blank, The Startup Owner's Manual , K&S Ranch, 2012

[2] Alexander Osterwalder, Business Model Generation , Wiley, 2010

[3] Olivier Ezratty, Guide des startups , édition annuelle gratuite

[4] Jean-Michel Moutot & Jean-Noël Moutot, Management de projet : Principes et outils , Dunod, 2020

[5] PMI, PMBOK Guide 7th Edition , 2021

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : Hydrogène vert : Production et applications

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à former les apprenants aux fondamentaux de l'hydrogène énergétique, en couvrant ses propriétés physico-chimiques, ses méthodes de production (gris, bleu, vert), ses applications industrielles et énergétiques, ainsi que ses enjeux économiques et environnementaux. À travers une approche interdisciplinaire et des études de cas pratiques, il prépare à analyser, concevoir et optimiser des projets d'hydrogène dans le contexte de la transition énergétique et de la décarbonation

Connaissances préalables :

- Une bonne maîtrise des bases de la chimie générale et des principes de thermodynamique, ainsi que des notions élémentaires sur les énergies renouvelables et les procédés électrochimiques (comme les piles et l'électrolyse).

Contenu de la matière :

1. Introduction Générale (1 semaines)

- Définition de l'hydrogène
- Importance de l'hydrogène dans la transition énergétique

2. Propriétés de l'hydrogène (3 semaines)

- Caractéristiques chimique et physiques de l'hydrogène - Rôle de l'hydrogène comme vecteur énergétique
- Impact environnemental de l'hydrogène

3. Méthodes de production de l'hydrogène (4 semaines)

- Production de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures - Production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables - Technologies des électrolyseurs - Production d'hydrogène par la voie biologique
- Production massive et propre d'hydrogène

4. Application de l'hydrogène (4 semaines)

- Applications industrielles
- Industrie chimique
- Métallurgie
- Fabrication de méthanol
- Applications énergétiques
- Pile à combustible
- Production de chaleur
- Stockage d'énergie
- Applications dans le bâtiment
- Chauffage et cogénération à base d'hydrogène.
- Systèmes intégrés dans les smart grids pour l'autonomie énergétique des bâtiments.

5. Enjeux économiques et environnementaux (3 semaines)

- Analyse économique de la production d'hydrogène - Impacts environnementaux

Références :

- [1] P. Millet, Hydrogène : Production, stockage et conversion, Éditions Lavoisier, 2017.
- [2] D. Hissel, F. Barbir, J-M. Andrès, Technologies de l'hydrogène, Éditions Lavoisier, 2016.
- [3] ADEME, Hydrogène : État de l'art et perspectives, rapport technique, 2021.
- [4] S. A. Sherif, D. Yogi Goswami, E. K. Stefanakos, Hydrogen Energy Handbook, CRC Press, 2014.
- [5] K. Mazloomi, C. Gomes, "Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, 2012, pp. 3024–3033.

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : Matériaux fonctionnels pour l'énergie

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à former les apprenants aux matériaux fonctionnels pour l'énergie, en couvrant leurs propriétés physico-chimiques, leurs applications dans la conversion et le stockage d'énergie (photovoltaïque, thermoélectricité, batteries, hydrogène), ainsi que leur rôle dans l'efficacité énergétique (isolation, vitrage intelligent). Il intègre également les enjeux environnementaux (recyclage, durabilité) pour préparer à concevoir des solutions innovantes et durables dans le contexte de la transition énergétique.

Connaissances préalables recommandées :

Notions fondamentales en physique des matériaux (structure atomique, liaisons chimiques, états de la matière)

Bases en thermodynamique (premier et deuxième principes, enthalpie, entropie)

Contenu de la matière :

1. Introduction aux matériaux fonctionnels (2 semaines)

- Définitions et classification : conducteurs, semi-conducteurs, diélectriques, céramiques, polymères, composites
- Matériaux fonctionnels vs matériaux structurels - Propriétés clés : thermique, électrique, optique, mécanique

2. Matériaux pour la conversion d'énergie (4 semaines)

- Matériaux photovoltaïques : Silicium cristallin et amorphe - Couches minces : CdTe, CIGS, pérovskites
- Cellules organiques
- Matériaux thermoélectriques : Principe Seebeck / Peltier - Alliages de tellure de bismuth, skutterudites
- Matériaux piézoélectriques et électrostrictifs :
- Applications en récupération d'énergie vibratoire

3. Matériaux pour le stockage de l'énergie (4 semaines)

- Batteries : Électrodes : LiCoO₂, graphite, LFP - Électrolytes liquides, solides, polymères
- Supercondensateurs :
- Matériaux poreux : carbone activé, graphène - Matériaux pseudocapacitifs : oxydes métalliques
- Hydrogène et piles à combustible : Membranes échangeuses de protons (Nafion, etc.)
- Matériaux pour stockage solide (hydrures métalliques, MOF)
- Matériaux à changement de phase (PCM) : Stockage thermique - Paraffines, sels hydratés, composés eutectiques

4. Matériaux pour l'efficacité énergétique (3 semaines)

- Matériaux isolants (thermiques et acoustiques)
- Laines minérales, aérogels, isolants biosourcés
- Matériaux sélectifs pour le vitrage et l'enveloppe du bâtiment
- Vitrage à faible émissivité, matériaux à opacité variable
- Matériaux à mémoire de forme et intelligents
- Applications dans les systèmes adaptatifs

5. Défis environnementaux et durabilité (1 semaine)

- Impact environnemental des matériaux
- Recyclabilité et cycle de vie
- Substitution des matériaux critiques (terres rares, cobalt...)
- Mode d'évaluation : Control continu et Examen Final

Références :

- [1] D. S. Ginley & D. Cahen, Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability, Cambridge University Press, 2011.
- [2] Robert Huggins, Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications, Springer, 2016.
- [3] S.S. Kumar, Materials for Energy Conversion Devices, Woodhead Publishing, 2022.
- [4] L. F. Cabeza, Advances in Thermal Energy Storage Systems, Elsevier, 2020.

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : Bioénergétique

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre les principes fondamentaux et les mécanismes de la conversion et du transfert d'énergie dans les systèmes biologiques.
- Analyser les processus énergétiques au niveau cellulaire et organique.
- Étudier les technologies et méthodes pour exploiter l'énergie bioénergétique (biomasse, biocarburants, bioénergie).
- Maîtriser les modèles physiques et chimiques appliqués aux systèmes bioénergétiques.

Connaissances préalables recommandées :

- Bases en biologie cellulaire (structures cellulaires, métabolisme énergétique)
- Notions fondamentales en biochimie (réactions enzymatiques, oxydation-réduction)
- Connaissances en thermodynamique appliquée aux systèmes biologiques
- Compréhension des transferts d'énergie dans les systèmes complexes
- Familiarité avec les processus de conversion d'énergie (combustion, fermentation, respiration, photosynthèse)

Contenu de la matière :

1. Introduction à la bioénergétique (2 semaines)

- Définitions et portée de la bioénergétique.
- Flux d'énergie dans les systèmes vivants : notions de métabolisme énergétique.
- Principes thermodynamiques appliqués aux processus biologiques.
- Bases de la thermodynamique des systèmes ouverts et vivants.

2. Biophysique des réactions énergétiques cellulaires (3 semaines)

- Mécanismes de production d'ATP.
- Chaînes de transport d'électrons et phosphorylation oxydative.
- Glycolyse, cycle de Krebs, et autres voies métaboliques énergétiques.
- Thermodynamique et cinétique des réactions enzymatiques.
- Concepts d'efficacité énergétique biologique.

3. Bioénergie : sources et conversion (4 semaines)

- Biomasse : composition chimique, potentiel énergétique.
- Méthodes de conversion : fermentation, digestion anaérobie, gazéification, pyrolyse, combustion.
- Biocarburants solides, liquides (biodiesel, bioéthanol) et gazeux.
- Thermodynamique et rendement des procédés bioénergétiques.
- Impacts environnementaux et durabilité.

4. Modélisation et analyse des systèmes bioénergétiques (3 semaines)

- Modèles mathématiques des processus énergétiques biologiques.
- Bilan énergétique et gestion des flux dans les systèmes biologiques.
- Techniques d'analyse spectroscopique et calorimétrie.
- Approches multiphysiques : couplage thermique, chimique et biologique.

5. Applications et perspectives (2 semaines)

- Production d'énergie renouvelable à partir de ressources biologiques.
- Utilisation des microalgues et biomasse non alimentaire.
- Bioénergie et technologies innovantes (biopiles, biohydrogène).
- Intégration des systèmes bioénergétiques dans les réseaux énergétiques.
- Enjeux socio-économiques et énergétiques mondiaux.

Références :

- [1] Nicholas C. Price, Lewis Stevens — Fundamentals of Bioenergetics, 2000.
- [2] Donald G. Castellan — Physical Chemistry, 4th Edition, 2004 (chapitres thermodynamiques et cinétiques appliqués à la bioénergétique).
- [3] David G. Nicholls & Stuart J. Ferguson — Bioenergetics, 4th Edition, Academic Press, 2013.
- [4] Y.K. Rao et al. — Biomass Conversion Technology, CRC Press, 2018.

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : Energie solaire thermique et géothermie

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à former les apprenants aux technologies solaires thermiques (basse et haute température) et à la géothermie, en couvrant leurs principes physiques, leur modélisation, leur dimensionnement et leurs applications industrielles et énergétiques. Il intègre également les enjeux économiques et environnementaux pour préparer à concevoir, optimiser et intégrer ces solutions dans les réseaux énergétiques de demain

Connaissances préalables recommandées :

- Notions fondamentales en thermodynamique (premier et deuxième principe, enthalpie, entropie)
- Bases en transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement)

Contenu de la matière :

1. Énergie solaire thermique à basse température (2 semaines)

- Introduction générale
- Les différents capteurs solaires à basse température
 - Capteurs sans vitrage - Capteurs avec vitrage (capteurs sous vide)
- Applications du solaire thermique basse température
- Froid solaire - Chauffage solaire - Cuisson solaire - Séchage solaire

2. Modélisation et dimensionnement d'un capteur plan (3 semaines)

- Éléments fondamentaux d'un capteur solaire plan
- Bilan thermique et modélisation d'un capteur solaire
- Dimensionnement d'un capteur solaire plan

3. Énergie solaire thermique à concentration (haute température) (3 semaines)

- Introduction aux centrales CSP (Concentrated Solar Power)
- Principes et composants des centrales CSP
- Capteurs paraboliques cylindriques - Centrales à tour - Centrales à capteurs linéaires
- Différentes filières de production thermodynamique
- Applications à haute température : production d'électricité, dessalement de l'eau, applications industrielles à haute température.
- Comparaison des technologies de concentration solaire : avantages, inconvénients et performances

4. Énergie géothermique (3 semaines)

- Introduction à l'énergie géothermique
- Typologie des ressources géothermiques : Haute énergie - Moyenne énergie - Basse énergie
- Techniques d'exploitation : Forages géothermiques - Échangeurs thermiques - Pompes à chaleur géothermiques
- Applications : Production d'électricité - Chauffage urbain, serres agricoles -
- Aspects environnementaux et économiques

5. Systèmes Géothermiques et Applications Industrielles (3 semaines)

- Systèmes géothermiques à basse température : pompes à chaleur géothermiques, chauffage et climatisation.
- Systèmes géothermiques à haute température : production d'électricité, applications industrielles.
- Intégration de la géothermie dans des processus industriels.

Références :

- [1] Garg, H.P., & Prakash, J. Solar Energy: Fundamentals and Applications. Tata McGraw-Hill, 1985.
- [2] Tiwari, G.N. Solar Energy: Fundamentals, Design, Modeling and Applications. Narosa Publishing House, 2002.
- [3] Lovegrove, Keith, & Stein, Wes. Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications. Woodhead Publishing, 2012.
- [4] Larmine, J., & Dicks, A. Fuel Cell Systems Explained. Wiley, 2003. (plus pertinent si tu abordes brièvement le stockage hybride, sinon à retirer)
- [5] Rybach, Ladislaus, & Muffler, Patrick. Geothermal Systems: Principles and Case Histories. Wiley, 1981.

Semestre : 3

UE : Méthodologie

Matière : Logiciels de dimensionnement & programmes open source

Objectifs de l'enseignement :

- Ce module vise à former les étudiants à l'utilisation de logiciels de dimensionnement énergétique (PVsyst, Polysun, HOMER, SolidWorks) pour concevoir, simuler et optimiser des systèmes solaires (photovoltaïques, thermiques) et hybrides (solaire + stockage + appoint). À travers des études de cas pratiques, il prépare à intégrer les contraintes techniques, économiques et environnementales dans la conception de solutions énergétiques.

Connaissances préalables recommandées :

- Bases en énergies renouvelables , notamment solaire photovoltaïque et thermique
- Notions fondamentales en thermodynamique , transfert d'énergie et conversion d'énergie

Contenu de la matière :

1. Introduction au dimensionnement (2 semaines)

- Qu'est-ce que le dimensionnement ?
- Pourquoi dimensionner un système ?

2. Présentation des logiciels (2 semaines)

- Quels logiciels existent ?
- À quoi servent-ils ?
- Présentation rapide de : PVsyst, Polysun, HOMER.

3. Utilisation de PVsyst (3 semaines)

- Installation et interface du logiciel.
- Saisir les données météo (ensoleillement).
- Créer un petit système photovoltaïque (maison).
- Lire les résultats : énergie produite, pertes, rendement.

4. Utilisation de Polysun (ou TRNSYS) (3 semaines)

- Créer un système solaire thermique (chauffe-eau solaire).
- Ajouter un appoint électrique ou gaz.
- Voir la performance du système selon les saisons.

5. Utilisation de HOMER (2 semaines)

- Créer un système hybride : panneau solaire + batterie + groupe électrogène.
- Saisir les besoins en énergie (maison, école, etc.).
- Comparer plusieurs solutions pour choisir la meilleure.

6. Introduction à SolidWorks (2 semaines)

- Introduction à la modélisation (dessin 2D/3D d'un objet).
- Simuler un échangeur de chaleur (écoulement d'eau, température).
- Comprendre les résultats de base.

References:

- [1] Quaschnig, Volker, Understanding Renewable Energy Systems, Earthscan, 2016.
- [2] PVsyst SA, PVsyst Software Help Documentation (accessible via le logiciel ou le site officiel :)
- [3] Vela Solaris, Polysun Software User Manual (disponible via le site :)
- [4] TRNSYS 18 Documentation, Getting Started, Volume 1: Introductory Tutorial (disponible via :)
- [5] National Renewable Energy Laboratory (NREL), HOMER Software Documentation ()
- [6] SolidWorks Corporation, SOLIDWORKS Tutorials and Help Documentation (dans le logiciel ou via :)

Semestre : 3

UE : Méthodologie

Matière : Caractérisation et Simulation des Semiconducteurs

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre les propriétés physiques et électriques des semiconducteurs utilisées dans les technologies des énergies renouvelables (photovoltaïque, électronique de puissance, stockage).
- Maîtriser les techniques de caractérisation des matériaux semiconducteurs (ex. : silicium, CdTe, CIGS, pérovskites).
- Apprendre à modéliser et simuler le comportement des dispositifs à base de semiconducteurs à l'aide d'outils numériques.
- Appliquer ces connaissances à la conception et l'optimisation de systèmes pour les énergies renouvelables.

Connaissances préalables recommandées :

- Notions fondamentales en physique du solide (structure cristalline, bandes d'énergie, porteurs de charge)
- Bases en électromagnétisme et physique des semi-conducteurs (jonction PN, dopage, mobilité des porteurs)
- Connaissances en électronique de base (diodes, transistors, circuits élémentaires)
- Familiarité avec les principes de conversion photovoltaïque et les systèmes de stockage d'énergie
- Bonne maîtrise des outils de simulation scientifique (Python, MATLAB, SPICE, ou logiciels comme Sentaurus TCAD, Silvaco, etc.)

Contenu de la matière :

- Le module est divisé en quatre parties principales, combinant théorie, pratique et projets appliqués :

1. Fondements des semiconducteurs

- Structure des bandes d'énergie, dopage, et propriétés électroniques (ex. : mobilité, durée de vie des porteurs).
- Types de semiconducteurs pour les énergies renouvelables : silicium monocristallin/polycristallin, couches minces (CdTe, CIGS), matériaux émergents (pérovskites, GaAs).
- Applications spécifiques : cellules photovoltaïques, transistors MOSFET pour convertisseurs, diodes pour stockage d'énergie.

2. Techniques de caractérisation

- Méthodes expérimentales : spectroscopie (Raman, photoluminescence), mesure de la résistivité (4-pointes), analyse de défauts (DLTS).
- Caractérisation optique et électrique pour évaluer l'efficacité des cellules solaires (courbe I-V, rendement quantique).

3. Étude des propriétés thermiques et mécaniques des semiconducteurs dans des conditions d'opération réelles.

- Modélisation et simulation
- Introduction aux outils de simulation : COMSOL Multiphysics, Silvaco TCAD, MATLAB/Simulink.
- Modélisation des dispositifs : équations de transport (drift-diffusion), équation de Poisson, recombinaison (Shockley-Read-Hall).
- Simulation de cellules photovoltaïques : optimisation du rendement, analyse des pertes (optiques, électriques).
- Simulation de composants d'électronique de puissance pour l'intégration des énergies renouvelables (ex. : convertisseurs DC-DC pour parcs solaires).

4. Projets appliqués et travaux pratiques

- **TP 1** : Caractérisation d'une cellule photovoltaïque (mesure de la courbe I-V et analyse des performances).
- **TP 2** : Simulation d'un MOSFET pour un convertisseur utilisé dans un système solaire.
- **Projet de groupe** : Conception et simulation d'un dispositif à base de semiconducteurs pour une application énergétique (ex. : optimisation d'une cellule solaire ou d'un module de stockage).

Références :

- [1] Chassaing P., 2000 – *Mécanique des fluides, Élément d'un premier parcours*
- [2] Anderson, J. D., 2003 – *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*
- [3] Zucrow M. J., & Hoffman, J. D., 1976 – *Gas Dynamics*
- [4] Thompson, P. A., 1972 – *Compressible-Fluid Dynamics*

Semestre : 3

UE : Méthodologie

Matière : TP pile à combustible

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre le fonctionnement des piles à combustible : principes électrochimiques, réactions, conversion d'énergie.
- Maîtriser les techniques expérimentales liées à l'étude des performances des piles.
- Analyser et optimiser les paramètres influençant l'efficacité des piles à combustible.
- Développer une approche critique face aux technologies actuelles et aux défis.

Connaissances préalables recommandées :

Notions fondamentales en chimie générale et électrochimie (réactions redox, potentiels électrochimiques), bases en thermodynamique et transfert d'énergie, compréhension élémentaire des systèmes énergétiques, bonnes bases en instrumentation scientifique et mesure physique.

Contenu de la matière :

1. Introduction aux piles à combustible

- Types de piles à combustible (PEMFC, SOFC, AFC, etc.).
- Principes électrochimiques de conversion d'énergie.
- Avantages, limitations et perspectives.

2. Composants d'une pile à combustible

- Anode, cathode, électrolytes : matériaux et fonctions.
- Catalyseurs et mécanismes réactionnels.
- Management de l'eau et du gaz : humidification, diffusion.

3. Montage expérimental et sécurité

- Description du matériel : piles expérimentales, bancs d'essai, capteurs.
- Protocoles de sécurité liés à l'hydrogène et aux gaz combustibles.
- Mise en place du circuit électrique et des instruments de mesure.

4. Mesures et caractérisation

- Polarisation et courbes Voltampériques (I-V).
- Mesure du rendement énergétique et puissance.
- Évaluation des pertes (ohmiques, activation, concentration).
- Suivi des gaz : analyse compositionnelle, débitmètres.

5. Analyse expérimentale approfondie

- Impact des paramètres opératoires : température, pression, humidité.
- Effets du débit de combustible et comburant.
- Caractérisation des dégradations dans le temps.

6. Modélisation et interprétation des données

- Modèles physiques simples adaptés aux résultats expérimentaux.
- Corrélation entre aspects théoriques et mesures.
- Logiciels et outils d'analyse.

7. Étude de cas et optimisation

- Études comparatives entre différents types de piles.
- Stratégies d'amélioration des performances.
- Discussion sur la durabilité et recyclage.

Références :

- [1]. Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained* . Wiley.
- [2]. Khandelwal, M., & Mench, M. M. (2008). *Principles of Fuel Cells* – CRC Press.
- [3]. Qi, Z., & Kaufman, A. (2002). *Solid Oxide Fuel Cells: From Electrolytes to System Design* . Elsevier.
- [4]. Hamnett, A., & Brandon, N. P. (2007). *Fuel Cell Science and Engineering* , IET.

Semestre : 3

UE : Méthodologie

Matière : Capteurs et instrumentation

Objectifs de l'enseignement :

- Ce module vise à fournir aux étudiants les compétences pratiques nécessaires pour mesurer, surveiller et analyser les grandeurs physiques essentielles dans les systèmes énergétiques. Il prépare les étudiants à la mise en œuvre de solutions de mesure fiables pour l'optimisation, le diagnostic et la gestion de systèmes énergétiques.

Connaissances préalables recommandées :

- Notions de base en physique des phénomènes énergétiques (transfert de chaleur, mécanique des fluides)
- Connaissances en électricité et électronique (tension, courant, résistance, circuits élémentaires)

Contenu de la matière :

1. Notions fondamentales de l'instrumentation (3 semaines)

- Chaîne de mesure, capteurs et actionneurs
- Caractéristiques techniques (plage, précision, bruit, etc.)

2. Typologie des capteurs pour l'énergie (4 semaines)

- Température (thermocouple, RTD)
- Pression, débit, irradiance, courant et tension
- Capteurs connectés (I2C, SPI, analogique)

3. Acquisition et traitement (3 semaines)

- Microcontrôleurs (Arduino, ESP32)
- Affichage local et communication sans fil
- Logiciels d'exploitation des données (IDE, Excel, Python)

4. Applications pratiques (3 semaines)

- Suivi d'un système photovoltaïque
- Surveillance thermique d'un système énergétique
- Monitoring énergétique d'un bâtiment ou d'un appareil
- Mode d'évaluation : control continu et Examen final

Références :

- [1] L'énergie à découvert . Sous la direction de Rémy Mosseri et Catherine Jeandel. CNRS Éditions, 2013
- [2] Materials for Sustainable Energy Applications: Conversion, Storage, Transmission, and Consumption . David Munoz-Rojas, Xavier Moya. Jenny Stanford Publishing, 2016
- [3] Materials for Energy . Sam Zhang (éditeur). CRC Press, 2020
- [4] Introduction to Materials for Advanced Energy Systems . Colin Tong. Springer, 2018
- [5] Energy Materials: Fundamentals to Applications . Sanjay J. Dhoble, Amol Nande, N. Thejo Kalyani, Ashish Tiwari. Elsevier, 2021
- [6] Matériaux pour l'ingénieur , Michel Dupeux , Éditeur : Dunod, 2019 (3e édition)

Semestre : 3

UE : Méthodologie

Matière : Analyse et optimisation des systèmes énergétiques

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à former les étudiants à analyser, modéliser et optimiser les systèmes énergétiques (renouvelables, hybrides, thermiques) en intégrant les aspects techniques, économiques et environnementaux. À travers des outils logiciels (HOMER, MATLAB), des algorithmes d'optimisation (IA, programmation linéaire) et des études de cas, les apprenants seront capables de concevoir des solutions énergétiques durables et efficaces, en adéquation avec les enjeux de la transition énergétique

Connaissances préalables recommandées :

- Bases en énergies renouvelables (solaire, éolien, stockage)
- Notions fondamentales en thermodynamique et transfert d'énergie
- Familiarité avec les outils numériques scientifiques (MATLAB, Python, Excel avancé)

Contenu de la matière

1. Introduction à l'analyse des systèmes énergétiques (1 semaine)

- Définition d'un système énergétique (composants, flux énergétiques) - Objectifs de l'analyse : performance, efficacité, durabilité. - Indicateurs clés : rendement, TCO (Total Cost of Ownership), empreinte carbone.

2. Thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques (2 semaine)

- Premier et deuxième principes : bilan énergétique, entropie, exergie. - Analyse des cycles thermodynamiques (Rankine, Brayton, Otto). - Rendement et pertes dans les systèmes énergétiques (ex. centrales électriques).

3. Énergies renouvelables et systèmes hybrides (1 semaine)

- Technologies solaires (photovoltaïque, thermique), éoliennes, géothermie. - Systèmes hybrides : couplage solaire/éolien + stockage. - Étude de cas : intégration des renouvelables dans un réseau électrique.

4. Systèmes thermiques et transferts d'énergie (1 semaine)

- Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. - Optimisation des échangeurs de chaleur et des réseaux de distribution. - Application : cogénération (CHP), systèmes de chauffage urbain.

5. Technologies de stockage d'énergie (1 semaine)

- Types de stockage : batterie (Li-ion, Na-ion), pompage-turbinage, hydrogène. - Modélisation du cycle de charge/décharge et efficacité énergétique. - Étude de cas : intégration du stockage dans un microgrid.

6. Modélisation des systèmes énergétiques (2 semaine)

- Outils logiciels : MATLAB/Simulink, HOMER, TRNSYS. - Création de modèles dynamiques (production, consommation, stockage). - Simulation d'un système énergétique (résidentiel ou industriel).

7. Optimisation linéaire et non linéaire (2 semaine)

- Méthodes classiques : programmation linéaire (LP), programmation quadratique (QP). - Optimisation sous contraintes : gestion des pics de demande. - Exercice pratique : optimiser un mix énergétique avec Excel Solver.

8. Études de cas – Systèmes solaires et éoliens- Réseaux intelligents (Smart Grids) (2 semaines)

9. Analyse économique et environnementale (1 semaine)

- Analyse coût-bénéfice et seuil de rentabilité (LCOE, ROI). - Analyse du cycle de vie (ACV) et impact carbone. - Étude de cas : Comparaison économique des énergies fossiles vs. renouvelables.

10. Réglementation et politiques énergétiques (1 semaine)

- Cadres réglementaires (ex. RE2020, directives européennes). - Mécanismes de financement (subventions, certificats verts). - Impact des politiques sur la transition énergétique.

11. Innovations et tendances futures (1 semaine)

- Émergence de l'hydrogène vert, matériaux à changement de phase (PCM).
- IA et jumeaux numériques pour la gestion énergétique.
- Défis : intermittence, recyclage des batteries, sécurité énergétique.

Références :

- [1] Energy Systems Engineering; Auteur(s) : Vanek, F.M., Albright, L.D. ; McGraw-Hill Education 2021
- [2] Optimization of Energy Systems; Auteur(s) : Kanoglu, M., Dincer, I., Rosen, M.A. Éd : Wiley 2022

Semestre : 3

UE : Découverte

Matière : Systèmes énergétiques intelligents

Objectifs de l'enseignement :

Ce module vise à former les apprenants à la conception, la gestion et l'optimisation des réseaux électriques intelligents (Smart Grids) , en intégrant les énergies renouvelables décentralisées , les technologies de capteurs et de communication , les systèmes de gestion de l'énergie (EMS) , ainsi que les solutions de stockage et de mobilité électrique (V2G) . À travers des études de cas et projets pratiques, il prépare à répondre aux défis de la transition énergétique (fiabilité, cybersécurité, efficacité)

Connaissances préalables recommandées :

- Bases en électrotechnique et réseaux électriques
- Notions fondamentales en énergies renouvelables (solaire, éolien)

Contenu de la matière

1. Introduction aux Smart Grids (2 semaines)

- Définition, architecture et composantes.
- Différences entre réseaux classiques et réseaux intelligents.
- Objectifs : fiabilité, flexibilité, efficacité énergétique.

2. Énergies renouvelables et décentralisation (2 semaines)

- Problèmes d'intermittence et de stockage.
- Couplage avec les réseaux intelligents.
- Microgrids et nanogrids.

3. Capteurs intelligents et systèmes embarqués (3 semaines)

- Capteurs de mesure de courant, tension, température, etc.
- Protocoles de communication (ZigBee, LoRa, Modbus, MQTT...).
- Systèmes embarqués pour la collecte et le traitement des données.

4. Systèmes de gestion de l'énergie (EMS) (3 semaines)

- Supervision en temps réel.
- Algorithmes d'optimisation (ex : programmation linéaire, intelligence artificielle).
- Gestion de la charge, prévision de la demande, effacement.

5. Intégration des TIC (Technologies de l'information et de la communication) (3 semaines)

- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).
- IoT (Internet of Things) appliqué à l'énergie.
- Cybersécurité dans les réseaux intelligents.

6. Stockage et véhicules électriques (2 semaines)

- Impact des batteries sur le réseau.
- Smart charging (recharge intelligente).
- Vehicle to Grid (V2G).

Références :

- [1] Momoh, James A. Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis Wiley-IEEE Press, 2012.
- [2] Keyhani, Ali; Marwali, M. N.; Dai, Min Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems Wiley-IEEE Press, 2010.
- [3] Farhangi, H."The Path of the Smart Grid" IEEE Power and Energy Magazine, vol. 8, no. 1, 2010, pp. 18–28.
- [4] International Energy Agency (IEA) Smart Grids Technology Roadmap, IEA, 2011.
- [5] IEEE Smart Grid Resource Center

Semestre : 3

UE : Découverte

Matière : Propriétés physiques des matériaux

Objectifs de l'enseignement :

- Maîtriser les propriétés fondamentales des matériaux (mécaniques, thermiques, électriques, optiques, etc.) en lien avec les applications énergétiques.
- Comprendre les relations entre la structure des matériaux et leurs performances dans des systèmes comme les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible, ou les dispositifs de stockage d'énergie.
- Appliquer des techniques de caractérisation et de modélisation pour analyser et optimiser les matériaux.
- Évaluer l'impact des propriétés des matériaux sur l'efficacité énergétique et la durabilité des systèmes.

Connaissances préalables recommandées :

- *Notions fondamentales en physique du solide (structure cristalline, liaisons chimiques, bandes d'énergie)*
- *Bases en chimie des matériaux (composition, états allotropiques)*
- *Connaissances élémentaires sur les propriétés mécaniques et thermiques des solides*
- *Bonnes bases en mathématiques appliquées (calcul différentiel, intégration, analyse de données)*
- *Familiarité avec les outils de simulation scientifique (Python, MATLAB, Excel avancé)*

Contenu de la matière

1. Introduction aux matériaux pour l'énergie (1 semaine)

- Classification des matériaux : métaux, polymères, céramiques, composites, semi-conducteurs, matériaux nanostructurés.
- Importance des matériaux dans les technologies énergétiques (solaire, éolien, hydrogène, batteries, etc.).

2. Propriétés physico-chimiques des matériaux (4 semaines)

- Structure atomique et cristalline : influence sur les propriétés macroscopiques.
- Propriétés mécaniques : résistance, élasticité, fatigue, déformation sous contrainte.
- Propriétés thermiques : conductivité thermique, capacité calorifique, dilatation thermique.
- Propriétés électriques et magnétiques : conductivité, résistivité, propriétés diélectriques.
- Propriétés optiques : absorption, réflexion, transmission (essentiel pour le photovoltaïque).

3. Matériaux spécifiques pour les énergies renouvelables (5 semaines)

- Matériaux photovoltaïques : silicium, pérovskites, couches minces (CdTe, CIGS).
- Matériaux pour le stockage d'énergie : électrodes et électrolytes pour batteries Li-ion, supercondensateurs, stockage d'hydrogène.
- Matériaux pour la conversion thermique : fluides caloporteurs, matériaux à changement de phase.
- Matériaux pour l'énergie solaire thermique : absorbants sélectifs, revêtements.

4. Techniques de caractérisation (2 semaines)

- Méthodes expérimentales : spectroscopie (UV-Vis, FTIR), microscopie (SEM, TEM), diffraction des rayons X, analyse thermique (DSC, TGA).
- Analyse des propriétés en conditions réelles (ex. : résistance à la corrosion, vieillissement).

5. Défis de la modélisation des matériaux (2 semaines)

- Optimisation des matériaux pour panneaux solaires, éoliennes, ou systèmes de stockage.
- Aperçu sur les logiciels pour simuler les propriétés des matériaux (ex. : COMSOL, DFT, CASTEM, SCAPS, SILVACO).
- Approches multi-échelles pour relier les propriétés microscopiques aux performances macroscopiques.

Références :

- [1] Chassaing, P. (2000). *Mécanique des fluides, Éléments d'un premier parcours*. Cépaduès Éditions.
- [2] Anderson, J. D. (2003). *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [3] Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., & Desrochers, P. (1992). *Thermodynamique appliquée*. Éditions du Renouveau pédagogique.
- [4] Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1980). *Statistical Physics, Part I*. Pergamon.

Semestre : 3

UE : Découverte

Matière : Milieu Poreux

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre les structures et propriétés physiques des milieux poreux. Maîtriser les lois régissant les écoulements monophasiques et polyphasiques dans ces milieux. Apprendre à modéliser et analyser les phénomènes de transfert en contexte poreux, avec une approche appliquée aux domaines de l'énergie, de l'environnement et du stockage.

Connaissances préalables recommandées :

Notions de base en mécanique des fluides et en transfert de masse. Bonne maîtrise des principes de conservation (masse, quantité de mouvement). Familiarité avec les concepts élémentaires de porosité, perméabilité et capillarité.

Contenu de la matière

1. Structure et propriétés des matériaux poreux: (2 semaines)

- structure et classification, porosité, surface,
- spécifique, perméabilité, propriétés mécaniques des milieux poreux

2. Statique des fluides dans les milieux poreux (3 semaines)

- saturation, théorie de la capillarité, fluides en équilibre.

3. Écoulements monophasiques: (3 semaines)

- Lois de la filtration, Description macroscopique des phénomènes de transport en milieux poreux.

4. Écoulements laminaires: (3 semaines)

- mesure de la perméabilité, extensions de la loi de Darcy, Convection forcée externe et dans les conduites,
- convection naturelle, convection thermosolutale

5. Écoulements polyphasiques (3 semaines)

- Propriétés interfaciales, drainage et inhibition, concept de perméabilités relatives, équations fondamentales des écoulements polyphasiques, étude analytique d'écoulements unidirectionnels ; calcul et méthodes de mesures des perméabilités relatives.

Références :

- [1] KAVIANY, M , "Porous Media: Theory and Experiments".
- [2] MICHAEL W., "Porous Media: Theory, Experiments and Numerical Applications"
- [3] DINCER I., "Principles of Heat Transfer in Porous Media"
- [4] SUKHATME, S P , "Principles of Heat Transfer in Porous Media".

Semestre : 3

UE : Transversale

Matière : Gestion de projet de fin d'études

Objectifs de l'enseignement :

- Acquérir les méthodes et outils de gestion de projet appliqués au domaine des énergies renouvelables.
- Structurer et planifier un projet de recherche ou d'ingénierie en lien avec les énergies renouvelables.
- Maîtriser la communication scientifique (rapport, soutenance).
- Apprendre à valoriser les résultats (publication, brevet, transfert de technologie).

Connaissances préalables recommandées :

- *Notions de base en énergies renouvelables (solaire, éolien, stockage, etc.)*
- *Familiarité avec les méthodologies de projet (approche structurée, phases d'un projet)*
- *Bases en communication technique et rédaction scientifique*

Contenu de la matière

- Pourquoi un projet de fin d'étude PFE?
- Objectifs d'un PFE
- Ethique et intégrité scientifique
- Cycle de vie d'un PFE
- Tableaux de bord
- Gestion des imprévus
- Outils et méthodes pour un PFE
- Modélisation théorique
- Simulation numérique
- Expériences
- Sources d'informations scientifiques
- Les étapes d'un projet de fin d'étude
- Cerner le problème et formuler les objectifs;
- Planifier et modéliser son travail;
- Choisir ses outils et méthodes ;
- Documentation et analyse de l'information disponible ;
- Décomposition en tâches (WBS)
- Réalisation des tâches du travail;
- Analyser les résultats;
- Elaborer un rapport de recherche et diffuser ses résultats
- Les normes rédactionnelles du travail scientifique.
- Présentation orale efficace (diaporama, posture, gestion du temps)

Références :

- [1] PMI (Project Management Institute), PMBOK Guide
- [2] Michel Pochet, Conduite de projet – méthodes et outils
- [3] R. Kerzner, Project Management: A Systems Approach
- [4] Articles et projets en lien avec les ENR (via ScienceDirect, IEEE, HAL, etc.)

Avis et Visas des organes Administratifs

**Intitulé de la Formation : Master Académique « Physique Energétique
et Energies Renouvelables »**

Chef de Département + Responsable de domaine	
Date et visa :	Date et visa :
Doyen de la Faculté (ou Directeur d'institut)	
Date et visa :	
Chef d'établissement universitaire	
Date et visa :	

