

# ***Master ENERGIE***

## ***Procédés et Matériaux pour le Solaire***

### **Descriptif des enseignements**

## Master Energie : 1ère année : Formation initiale

Libellé long	ECUE (matière) Oblig=Rouge Option=Jaune	Si matière mutualisée, précisez avec quelle mention	CM	TD	TP	Stage et autre* (durée)	Total heures étudiant	Coef	ECTS
<b>Semestre 7</b>			<b>122</b>	<b>142</b>	<b>34</b>		<b>298</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>UE 1 : Energie</b>			33	39	9		81	9	9
Mécanique des fluides : écoulements et thermique			12	15			27	3	3
Thermodynamique avancée			12	15			27	3	3
Conversion thermique de l'énergie solaire			9	9	9		27	3	3
<b>UE 2 : Matériaux</b>			24	30			54	6	6
Matériaux : fondamentaux			12	15			27	3	3
Matériaux : relations structures / propriétés			12	15			27	3	3
<b>UE 3 : Physique</b>			33	30	15		78	8	8
Propriétés diélectriques et optiques			12	15			27	3	3
Plasmas et procédés de traitements de surface			12	15			27	3	3
Programmation			9		15		24	2	2
<b>UE 4 : Smart</b>			12	15			27	2	2
Transport et distribution de l'énergie électrique		EEA	12	15			27	2	2
<b>UE 5 : Monde professionnel</b>			20	28	10		58	5	5
Anglais scientifique 1				12			12	1,5	1,5
Création d'entreprise 1			8	4			12	1,5	1,5
Contexte énergétique et environnemental		EEA	12	12			24	2	2
Projet personnel professionnel 1					10		10	X	X

Libellé long	ECUE (matière) Oblig=Rouge Option=Jaune	Si matière mutualisée, précisez avec quelle mention	CM	TD	TP	Stage et autre* (durée)	Total heures étudiant	Coef	ECTS
<b>Semestre 8</b>			<b>109</b>	<b>110</b>	<b>55</b>		<b>274</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>UE 1 : Energie solaire</b>			33	30	15		78	8	8
Transferts thermiques			12	15			27	3	3
EDP pour le solaire			12	15			27	3	3
Analyse numérique			9		15		24	2	2
<b>UE 2 : Matériaux pour le solaire</b>			36	30	15		81	9	9
Matériaux pour la conversion photovoltaïque de l'énergie			12	15			27	3	3
Intéactions rayonnement - matière : analyses spectrométriques			12	15			27	3	3
Matériaux en couches minces : élaboration, caractérisation			12		15		27	3	3
<b>UE 3 : Physique pour le solaire</b>			24	30	0		54	4	4
Propriétés électroniques des solides (massifs)			12	15			27	2	2
Phénomènes de transport dans les solides			12	15			27	2	2
<b>UE 4 : Smart solaire</b>			12	0	15		27	3	3
Conversion électrique de l'énergie solaire, machines et stockage électriques			12		15		27	3	3
<b>UE 5 : Monde professionnel</b>			4	20	10		34	6	6
Anglais scientifique 2				12			12	1,5	1,5
Création d'entreprise 2			4	8			12	1,5	1,5
Projet personnel professionnel 2 : stage		2			10		10	3	3

## Master Energie : 1ère année : Formation en alternance

Libellé long	ECUE (matière) Oblig=Rouge Option=Jaune	Si matière mutualisée, précisez avec quelle mention	CM	TD	TP	Stage et autre* (durée)	Total heures étudiant	Coef	ECTS
<b>Semestre 7</b>			<b>122</b>	<b>142</b>	<b>34</b>		<b>298</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>UE 1 : Energie</b>			33	39	9		81	9	9
Mécanique des fluides : écoulements et thermique			12	15			27	3	3
Thermodynamique avancée			12	15			27	3	3
Conversion thermique de l'énergie solaire			9	9	9		27	3	3
<b>UE 2 : Matériaux</b>			24	30			54	6	6
Matériaux : fondamentaux			12	15			27	3	3
Matériaux : relations structures / propriétés			12	15			27	3	3
<b>UE 3 : Physique</b>			33	30	15		78	8	8
Propriétés diélectriques et optiques			12	15			27	3	3
Plasmas et procédés de traitements de surface			12	15			27	3	3
Programmation			9		15		24	2	2
<b>UE 4 : Smart</b>			12	15			27	2	2
Transport et distribution de l'énergie électrique		EEA	12	15			27	2	2
<b>UE 5 : Monde professionnel</b>			20	28	10		58	5	5
Anglais scientifique 1				12			12	1,5	1,5
Création d'entreprise 1			8	4			12	1,5	1,5
Contexte énergétique et environnemental		EEA	12	12			24	2	2
Projet personnel professionnel 1					10		10	X	X

Libellé long	ECUE (matière) Oblig=Rouge Option=Jaune	Si matière mutualisée, précisez avec quelle mention	CM	TD	TP	Stage et autre* (durée)	Total heures étudiant	Coef	ECTS
<b>Semestre 8</b>			<b>61</b>	<b>65</b>	<b>30</b>		<b>156</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>Energie solaire</b>			21	15	15		51	6,5	6,5
Transferts thermiques			12	15			27	3,5	3,5
Analyse numérique			9		15		24	3	3
<b>Matériaux pour le solaire</b>			24	15	15		54	7	7
Matériaux pour la conversion photovoltaïque de l'énergie			12	15			27	3,5	3,5
Matériaux en couches minces : élaboration, caractérisation			12		15		27	3,5	3,5
<b>Physique pour le solaire</b>			12	15	0		27	3,5	3,5
Propriétés électroniques des solides (massifs)			12	15			27	3,5	3,5
<b>Monde professionnel</b>			4	20	0		24	13	13
Anglais scientifique 2				12			12	1,5	1,5
Création d'entreprise 2			4	8			12	1,5	1,5
Projet personnel professionnel 1		3					0	10	10

**Master Energie : 2nde année : Formation initiale**

Libellé long	ECUE (matière) Oblig=Rouge Option=Jaune	Si matière mutualisée, précisez avec quelle mention	CM	TD	TP	Stage et autre* (durée)	Total heures étudiant	Coef	ECTS
<b>Semestre 9</b>			<b>91,5</b>	<b>115,5</b>	<b>72</b>		<b>279</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>UE 1 : Energie solaire</b>			22,5	40,5	0		63	7	7
Stockage thermique / Thermal Energy Storage		EUREC	7,5	13,5			21	2,5	2,5
Centrales electriques solaires / Solar power plants		EUREC	7,5	13,5			21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 3</i>			7,5	13,5			21	2	2
Transferts radiatifs avancés / Radiative heat transfer		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
Systèmes de concentration et récepteurs / Concentrating systems and receivers		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
Combustible solaire / Solar fuel		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
<b>UE 2 : Matériaux pour le solaire</b>			21	27	15		63	7	7
Théorie et technologies des capteurs solaires / Solar Collector theory and technologies		EUREC	7,5	13,5			21	2,5	2,5
Nanomatériaux : élaboration, caractérisation / Nanomaterials: elaboration, characterization			6		15		21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 3</i>			7,5	13,5			21	2	2
Matériaux pour le solaire thermique / Innovative materials for energy conversion		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
Filières photovoltaïques / Photovoltaic technologies			7,5	13,5			21	2	2
Outils logiciels et matériaux / Software tools and materials					21		21	2	2
<b>UE 3 : Physique pour le solaire</b>			15	27	0		42	4,5	4,5
Du massif au nano / Towards nano scale			7,5	13,5			21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 2</i>			7,5	13,5			21	2	2
Concepts innovants pour la conversion de l'énergie electromagnétique / Electromagnetic energy conversion			7,5	13,5			21	2	2
Simulations dynamiques et thermiques / Combined heat and mass transfer		EUREC	6		15		21	2	2
<b>UE 4 : Smart Solaire</b>			21	0	27		48	4,5	4,5
Smart buildings		EEA	9		12		21	2,5	2,5
Smart grid		EEA	12		15		27	2	2
<b>UE 5 : Monde professionnel</b>			12	21	30		63	7	7
Projets professionnels numériques / Digital professional projects			6		15		21	2,5	2,5
Management environnemental / Project, case study		EUREC		21			21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 2</i>			6		15		21	2	2
Thermo économie : du capteur à la centrale / Thermoeconomics		EUREC	6		15		21	2	2
Thermique du bâtiment / Thermal building			6		15		21	2	2
Conférences								X	X
<b>Semestre 10</b>					<b>0</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>UE 1</b>					0	20	0	30	30
Stage : tutorage pédagogique et suivi des anciens						20	0	30	30

**Master Energie : 2nde année : Formation en alternance**

Libellé long	ECUE (matière) Oblig=Rouge Option=Jaune	Si matière mutualisée, précisez avec quelle mention	CM	TD	TP	Stage et autre* (durée)	Total heures étudiant	Coef	ECTS
<b>Semestre 9</b>			<b>91,5</b>	<b>115,5</b>	<b>72</b>		<b>279</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>UE 1 : Energie solaire</b>			22,5	40,5	0		63	7	7
Stockage thermique / Thermal Energy Storage		EUREC	7,5	13,5			21	2,5	2,5
Centrales électriques solaires / Solar power plants		EUREC	7,5	13,5			21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 3</i>			7,5	13,5			21	2	2
Transferts radiatifs avancés / Radiative heat transfer		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
Systèmes de concentration et récepteurs / Concentrating systems and receivers		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
Combustible solaire / Solar fuel		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
<b>UE 2 : Matériaux pour le solaire</b>			21	27	15		63	7	7
Théorie et technologies des capteurs solaires / Solar Collector theory and technologies		EUREC	7,5	13,5			21	2,5	2,5
Nanomatériaux : élaboration, caractérisation / Nanomaterials: elaboration, characterization			6		15		21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 3</i>			7,5	13,5			21	2	2
Matériaux pour le solaire thermique / Innovative materials for energy conversion		EUREC	7,5	13,5			21	2	2
Filières photovoltaïques / Photovoltaic technologies			7,5	13,5			21	2	2
Outils logiciels et matériaux / Software tools and materials					21		21	2	2
<b>UE 3 : Physique pour le solaire</b>			15	27	0		42	4,5	4,5
Du massif au nano / Towards nano scale			7,5	13,5			21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 2</i>			7,5	13,5			21	2	2
Concepts innovants pour la conversion de l'énergie électromagnétique / Electromagnetic energy conversion			7,5	13,5			21	2	2
Simulations dynamiques et thermiques / Combined heat and mass transfer		EUREC	6		15		21	2	2
<b>UE 4 : Smart Solaire</b>			21	0	27		48	4,5	4,5
Smart buildings		EEA	9		12		21	2,5	2,5
Smart grid		EEA	12		15		27	2	2
<b>UE 5 : Monde professionnel</b>			12	21	30		63	7	7
Projets professionnels numériques / Digital professional projects			6		15		21	2,5	2,5
Management environnemental / Project, case study		EUREC		21			21	2,5	2,5
<i>1 matière au choix parmi 2</i>			6		15		21	2	2
Thermo économie : du capteur à la centrale / Thermoeconomics		EUREC	6		15		21	2	2
Thermique du bâtiment / Thermal building			6		15		21	2	2
Conférences								X	X

<b>Semestre 10</b>			<b>48</b>	<b>65</b>	<b>15</b>		<b>128</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>Energie solaire</b>			12	19	0		31	3	3
EDP pour le solaire			12	15			27	3	3
Projet tuteuré interdisciplinaire : Energie				4			4	X	X
<b>Matériaux pour le solaire</b>			12	19	0		31	3	3
Interactions rayonnement - matière : méthodes spectrométriques			12	15			27	3	3
Projet tuteuré interdisciplinaire : Matériaux				4			4	X	X
<b>Physique pour le solaire</b>			12	19	0		31	2	2
Phénomènes de transport dans les solides			12	15			27	2	2
Projet tuteuré interdisciplinaire : Physique				4			4	X	X
<b>Smart solaire</b>			12	4	15		31	2	2
Conversion électrique de l'énergie solaire, machines et stockage électriques			12		15		27	2	2
Projet tuteuré interdisciplinaire : Smart solaire				4			4	X	X
<b>Monde professionnel</b>			0	4	0		4	20	20
Projet personnel professionnel 2							0	17	17
Projet tuteuré interdisciplinaire				4			4	3	3

# **Master ENERGIE**

## **Procédés et Matériaux pour le Solaire**

### **SEMESTRE 1**

**Intitulé** : Mécanique des fluides : écoulements et thermique.

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignante responsable** : : F. Bataille (PR)

**Enseignant(s)** : F. Bataille (PR)

**Compétences** : Acquisition des outils nécessaires à la modélisation des échanges de masse, de quantité de mouvement et d'énergie entre différents milieux. Savoir appréhender les écoulements turbulents.

**Prérequis** : Connaissance de base de mécanique des fluides

**Contenu :**

Le cours donne le formalisme d'une équation de bilan d'une grandeur extensive dans un système donné. Cette équation est appliquée à la masse, à la quantité de mouvement et à l'énergie.

Différentes manières de résoudre le modèle obtenu sont abordées :

- méthodes analytiques et pseudo analytiques par dégénérescence du modèle en fonction du cas d'application,
- méthodes intégrales et approche globale (Théorèmes de Bernoulli, Euler...),
- notions de méthodes numériques.

La suite du cours concerne les écoulements via les équations de Navier-Stokes. Après avoir traité les écoulements de Couette et de Poiseuille en laminaire, la notion de turbulence est introduite. L'objectif est de savoir appréhender la turbulence et de connaître les solutions qui existent pour traiter un écoulement turbulent. Des exemples d'écoulements turbulents sont étudiés.

**Programme :**

Equation de bilan d'une grandeur extensive

Le modèle de Navier et de Stokes

Dégénérescence des modèles, solutions asymptotiques

Théorèmes globaux :

Théorème d'Euler

Théorème de Bernoulli généralisé, dimensionnement d'installations, applications

Equations de NS

Hypothèses et équations de base - Ecoulement laminaire

Écoulements de Couette et de Poiseuille

Variables adimensionnelles

Introduction à la turbulence

Notion de turbulence

Equations moyennées et corrélations turbulentes

Fermeture de la turbulence - Notion de modélisation - Modèles en un point ( $k - \varepsilon$ , RNG, RSM)

Écoulement de Couette turbulent

**Mots clés** : Mécanique des fluides, Transferts convectifs

**Evaluation** : Examens écrits

**Support de cours** : support de cours sous forme numérique disponible sur Moodle.

**Bibliographie :**

Padet, « Fluides en écoulement », Masson

Chassaing, « Mécanique des fluides », Cépadues Editions, 1997

Lesieur, « Turbulence in Fluids », Kluwer Academic Publisher, 1997.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Thermodynamique avancée.

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : P. Neveu (PR)

**Enseignant(s)** : P. Neveu (PR)

**Compétences** : Ce cours s'attache à fournir aux étudiants un socle de connaissances solides dans le domaine de la thermodynamique appliquée à l'ingénierie.

Au terme de cet enseignement, l'étudiant sera donc capable :

- de comprendre les concepts élémentaires de la thermodynamique (système, cycle, enthalpie, entropie ; premier et deuxième principes, irréversibilité, exergie et rendements),
- d'appliquer ces concepts dans le cadre d'un bilan énergétique,
- de mettre en œuvre une méthode de résolution efficace en vue de quantifier les spécifications techniques des composants unitaires constituant un procédé énergétique,
- d'expliquer le fonctionnement et d'évaluer les performances d'installations thermiques motrices mettant en œuvre un gaz ou une vapeur,
- d'expliquer le fonctionnement et d'évaluer les performances d'installations frigorifiques ou de pompes à chaleur,
- d'être initié aux nouvelles méthodes d'optimisations thermodynamiques que constitue l'analyse exergétique et la méthode du pincement.

**Prérequis** : Notions de thermodynamique générale : 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principes, propriétés des fluides.

**Contenu** : L'extension des deux principes de la thermodynamique aux systèmes ouverts conduit aux bilans transitoires de masse, d'énergie et d'entropie, qui constituent les bases de l'étude et de l'optimisation des convertisseurs thermomécaniques : systèmes frigorifiques, pompes à chaleur, installations motrices à vapeur, turbines à gaz ou moteurs alternatifs. L'objectif est d'évaluer les spécifications techniques (puissances, débits, conditions d'entrée/sortie) de tous les composants constituant le procédé énergétique étudié. Les méthodes d'optimisation récemment développées et utilisées dans l'industrie sont alors introduites : l'analyse 2<sup>nd</sup> principe ou exergétique, et la méthode du pincement. Les TD s'appuient sur des exemples concrets issus de l'industrie, et sont réalisées, tout d'abord à l'aide de diagrammes, puis à l'aide de logiciel de calcul de propriétés thermodynamiques.

**Programme** :

- Bilans transitoires de masse d'énergie et d'entropie.
- Propriétés des fluides : les diagrammes thermodynamiques.
- Les cycles vapeurs pour la production de froid, de chaleur ou de puissance mécanique. Application aux systèmes frigorifiques, aux PAC et aux installation motrice à vapeur.
- Les cycles gaz (Brayton/Joule, Ericsson, Stirling, Otto, Diesel). Application aux turbines à gaz.
- Introduction à l'analyse exergétique et à la méthode du pincement. Application aux cycles combinés.

**Mots clés** : Analyse énergétique, diagramme et cycles thermodynamique.

**Evaluation** : Contrôles continus + Examen final

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** :

Francis Meunier, Aide-mémoire - Thermodynamique - 4e édition, Aide-mémoire, Dunod, février 2018  
Thermodynamique appliquée, Richard E. Sonntag, Gordon J. Van Wylen, Pierre Desrochers, ERPI – Le renouveau pédagogique éditions, 1992

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.



**Intitulé** : Conversion thermique de l'énergie solaire.

**Répartition** : CM : 9h, TD : 9h ; TP : 9h

**Enseignant responsable** : S. Mer (MCF)

**Enseignant(s)** : S. Mer (MCF)

**Compétences :**

- Connaître les différents types de capteurs solaires thermiques
- Maîtrise des processus élémentaires de transfert thermique mis en jeu dans chaque technologie
- Connaissances générales sur les applications du solaire thermique
- Évaluation des différentes techniques de production de froid solaire
- Expérimentation sur TP pilote en lien avec les technologies vues en cours

**Prérequis :**

- Ressource solaire et procédés énergétiques associés
- Transfert thermique : résistance thermique équivalente, conduction, convection, rayonnement

**Contenu :**

Dans le contexte de la transition énergétique et de la décarbonation du secteur de l'énergie, la part d'énergie renouvelable dans le mix énergétique tend à croître drastiquement dans les années à venir. Actuellement, les besoins en chaleur d'un ménage moyen français représente ~75 % de leur consommation énergétique. Cette chaleur est majoritairement produite via des ressources fossiles. Le solaire thermique, qui consiste à convertir le rayonnement solaire en chaleur, apparaît comme une alternative de premier choix pour la production de cette chaleur. Dans une partie introductive, nous détaillerons les chiffres clefs concernant la ressource solaire, les besoins énergétiques d'un ménage français et les émissions de CO<sub>2</sub> associées. Nous passerons ensuite en revue les différentes technologies de panneau solaire thermique, leurs applications ainsi que les processus élémentaires de transfert thermique associés. Dans la dernière partie du cours, nous aborderons les différentes stratégies envisageables pour produire du froid grâce à l'énergie solaire.

**Programme :**

- Introduction à la ressource solaire
- Les panneaux solaires thermiques et leurs applications
- Production de froid solaire

**Mots clés** : Ressource solaire, capteur moquette, capteur plan, capteur tube sous vide, CESI, temps de retour (énergétique/CO<sub>2</sub>), Machine à compression mécanique de vapeur, Machine à sorption, Dessicant cooling

**Evaluation** : Comptes rendus de TP [50%] & Rapport de projet [50%]

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

- S. Incropera et al, *Fundamentals of heat and mass transfer, 7<sup>th</sup> Edition*, Ed. Wiley & Son, 2011
- S. Kalogirou, *Solar energy engineering : processes and systems*, Ed. Elsevier science, 2009
- J.A. Duffie & W.A. Beckman, *Solar Engineering of thermal processes, 4<sup>th</sup> Edition*, Ed. Wiley & Son, 2013

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

- RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.
- RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.
- RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel.

**Intitulé** : Matériaux : fondamentaux.

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : S. Quoizola (MCF)

**Enseignant(s)** : S. Quoizola (MCF)

**Compétences** : Maîtriser les bases de la physique de l'état solide pour décrire l'origine de différentes propriétés des grandes classes de matériaux : propriétés thermiques, propriétés électriques, propriétés optiques.

**Prérequis** : notions de mécanique quantique.

**Contenu** : Partant de l'atome jusqu'à l'état solide, ce cours donne les bases de la physique de l'état solide permettant de comprendre i) les propriétés de réseau et ii) les structures électroniques des solides et leurs conséquences sur les propriétés des grandes classes de matériaux. L'origine de différentes propriétés des matériaux solides, propriétés thermiques, propriétés électriques, propriétés optiques, sera ainsi présentée.

**Programme** :

- Rappels sur le caractère quantique de la matière
- Structure du cristal parfait
  - Eléments de cristallographie
  - Espace et réseau réciproques
- Vibrations du réseau cristallin
  - Phonons
  - Propriétés thermiques des solides (Einstein, Debye)
- Propriétés électroniques
  - Modèle de Drude
  - Modèle de l'électron libre
  - Electrons dans un potentiel périodique, Structure de bandes

**Mots clés** : Physique du solide, Phonons, Propriétés thermiques du solide, Electrons libres, Propriétés électriques du solide.

**Evaluation** : Contrôle continu et examen terminal.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** :

C.KITTEL, Introduction à la physique du solide, Ed. Dunod.

N. W. ASCROFT & D. MERMIN, Physique des solides, Ed. EDP Sciences.

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Matériaux : relations structures / propriétés

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : L. Thomas (PR)

**Enseignant(s)** : L. Thomas (PR), S. Quoizola (MCF)

**Compétences**: Connaissance globale des grandes classes de matériaux et des relations entre leur structure/organisation, leurs défauts et les propriétés générales qui en découlent.

**Prérequis** : Notions sur les origines et la nature des liaisons dans le solide, notions d'organisation du solide (matériaux cristallins et non cristallins)

**Contenu** : le but de ce cours, orienté vers les matériaux, leurs propriétés élémentaires et leurs grandes applications, est de montrer les relations simples qu'il existe entre leur nature-structuration, les défauts qu'ils peuvent présenter, et les propriétés qui en résultent.

**Programme** :

- Introduction/rappels sur les matériaux
- Défauts dans les matériaux
- Propriétés mécaniques (tests classiques pour sollicitations mécanique, grandeurs caractéristiques, paramètres influençant les propriétés mécaniques)
- Propriétés électriques (paramètres matériaux conducteurs, semi-conducteurs, isolants)
- Propriétés thermiques (phonons/électrons, comparaison métaux/céramiques)

**Mots clés** : Liaisons interatomiques, Structures des matériaux, Défauts, Propriétés mécaniques, électriques, thermiques.

**Evaluation** : Contrôle continu et examen terminal.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** :

1. **Jean Paul Bailon, Jean Marie Dorlot**  
« Des Matériaux », Presses Internationales Polytechnique-Canada (ISBN 2-553-00770-1)
2. **Emanuel Mooser**  
« Introduction à la Physique des Solides », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes – Lausanne (ISBN 2-88074-241-2)
3. **Maurice Gerl, Jean Paul Issi**  
« Physique des Matériaux », de la série « Traité des Matériaux », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes – Lausanne (ISBN 2-88074-311-7)
4. **Charles Kittel**  
« Physique à l'état solide », Dunod (ISBN 978-2-10-049710-2)

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Propriétés diélectriques et optiques

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : H. Kachkachi (PR)

**Enseignant(s)** : P. M. Dejardin (MCF), H. Kachkachi (PR)

**Compétences** : A l'issue de cet enseignement, l'étudiant aura acquis une bonne connaissance des propriétés optiques des matériaux massifs, en couches minces ou nanostructurés. En particulier, il s'agit de comprendre les propriétés d'absorption d'un champ électromagnétique incident par ces matériaux, notamment dans domaine du visible. Pour cela, il sera nécessaire d'apprendre de manière explicite et à travers des exemples concrets, à calculer la longueur de pénétration d'un champ électrique dans les matériaux et de déduire leur pouvoir d'absorption. Il faudra donc se familiariser avec la résolution des équations de Maxwell avec conditions aux bords.

**Prérequis** : électromagnétisme de niveau L (en particulier électrostatique ; résolution d'équations différentielles aux dérivées partielles avec conditions aux bords ; analyse complexe, algèbre linéaire).

**Contenu** : Calcul du champ électromagnétique dans la matière à travers des exemples concrets de systèmes massifs, de couches minces et de nanoparticules. Dans ce cours, il s'agit d'apprendre à mener de bout en bout un calcul simple et concret de la longueur de pénétration et du coefficient d'absorption de ces systèmes et de comprendre ainsi comment la réduction de la dimension impacte les conditions d'application en termes du matériau à l'étude (épaisseur et géométrie en particulier).

**Programme :**

- Rappel : électromagnétisme et équations de Maxwell dans le vide.
- Equations de Maxwell dans la matière, conditions aux bords.
- Résolution de ces équations et calcul du champ électrique pour :
  - les massifs (3D)
  - les couches minces
  - les nanoparticules métalliques
- Analyses des propriétés d'absorption, de diffusion et de transmission.
- Calcul des coefficients d'absorption pour quelques matériaux
- Conclusion quant aux contraintes de fabrication en vue d'une absorption optimisée.

**Mots clés** : électromagnétisme, équations de Maxwell, calcul du champ électrique dans la matière, phénomènes d'absorption/transmission.

**Evaluation** : devoir sur table et/ou projet.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

- *Electromagnetic theory*, J. A. Stratton, Adams Press 1941.
- *Classical electrodynamics*, J. D. Jackson, John Wiley & Sons, 1962. (En français : *Electrodynamique Classique*, J.D. Jackson, Dunod, 2002).
- *Introduction to electrodynamics*, D. J. Griffiths, PHI Learning, 2013.
- *Plasmonics: Fundamentals And Applications*, A. Maier, Springer-Verlag 2007.
- *Optical properties of metal clusters*, U. Kreibig & M. Vollmer, Springer Series in Materials Science 25, Springer 1995.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**UE :** Physique

**Semestre 1**

**Intitulé :** Plasmas et procédés de traitements de surface.

**Répartition :** CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable :** L. Thomas (PR)

**Enseignant(s) :** L. Thomas (PR)

**Compétences :** Connaissance globale des grandes classes de procédés d'élaboration de couches minces, connaissances générales théoriques et pratiques sur les procédés plasma.

**Prérequis :** notions d'équilibre thermodynamique, de mécanique quantique, de réactions en phase homogène.

**Contenu :** ce cours introduit les notions de théorie cinétique des gaz, de plasma dans les gaz, de réactivité en phase gazeuse et surface. Il décrit les grands types de procédés de dépôt par voie sèche aussi bien du point théorique que technologique (techniques du vide, génération de décharges plasma, réacteurs de dépôt par voie chimique et physique, contrôle/diagnostics).

**Programme :**

- Introduction : illustration de la variété des procédés de dépôt par voie sèche pour l'industrie
- Eléments de théorie cinétique des gaz
- Technologies du vide
- Notions de plasma
- Exemples d'application des plasmas
- Réactivité des gaz et notions de CVD
- Notions de PVD
- Autres technologies

**Mots clés :** Gaz, Plasma, Procédés de dépôt.

**Evaluation :** Contrôle continu et examen terminal.

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :** /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

UE : Physique

Semestre 1

**Intitulé** : Programmation

**Répartition** : CM : 9h, TP : 15h

**Enseignant responsable** : Martin ROSALIE (MCF)

**Enseignant(s)** : Martin ROSALIE (MCF)

**Compétences** : Connaissance des stratégies de conception de programmes orientés objets. Maîtrise des outils d'implémentation de Programme Orienté Objet en langage Python. Maîtrise des bibliothèques de calcul scientifique (et des objets qui les compose).

**Prérequis** : : Algorithmique et Programmation Impérative

**Contenu** : En utilisant le langage de programmation Python et à travers de nombreux exemples et exercices en lien avec la thématique *Énergie* du master, les bases de la programmation seront passées en revue. La Programmation Orientée Objet sera ensuite étudiée pour pleinement tirer profit des bibliothèques de calcul scientifique de Python (Numpy, Scipy, Matplotlib) et préparer leur emploi en Analyse Numérique et EDP pour le Solaire.

**Programme** :

1. Rappels d'Algorithmique
2. Rappels de Programmation Impérative
3. Programmation Orientée Objet: théorie et applications
4. Utilisation des objets des bibliothèques de Calcul Scientifiques en Python

**Mots clés** : Programmation Orientée Objet, Classe, Langage Python, Numpy, Scipy, Matplotlib

**Evaluation** : Examen sur machine où les étudiants conçoivent et implémentent un programme.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** :

*A Beginners Guide to Python 3 Programming*, Springer International Publishing, John Hunt, *Advanced Guide to Python 3 Programming*, Springer International Publishing, John Hunt et *Python Programming And Numerical Methods: A Guide For Engineers And Scientists*, Elsevier, Qingkai Kong, Timmy Siau and Alexandre Bayen (<https://pythonnumericalmethods.berkeley.edu/notebooks/Index.html>)

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques

**Intitulé** : Transport et distribution de l'énergie électrique

**Mutualisation** : Master EEA

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : M. Caussanel (MCF)

**Enseignant(s)** : M. Caussanel (MCF)

**Compétences** :

- Connaissances techniques dans le domaine de l'électricité.
- Citer les caractéristiques essentielles du réseau de distribution électrique européen ; représenter le schéma simplifié de l'organisation du transport et la distribution de l'énergie électrique.
- Citer le rôle d'un transformateur de tension.
- Compétences dans la mise en œuvre de démarches de résolution de problèmes.
- Rigueur et précision dans les études réalisées.

**Prérequis** :

- Éléments généraux d'électrotechniques (systèmes triphasés, puissances, machine synchrone).
- Mesurer une intensité et une tension.
- Calcul d'une puissance.

**Contenu** :

- Présentation et organisation du secteur de l'énergie électrique (production, transport et distribution), architecture des réseaux de transport et distribution. Modélisation des éléments du réseau,
- Méthode de calcul des transits de puissance (Load-flow),
- Réglage de tension sur un réseau électrique,
- Réglage de fréquence sur un réseau AC,
- Réglage du réseau.

**Programme** :

1. Structure générale des réseaux électriques
2. Production de l'énergie électrique
3. Caractéristiques générales du transport et de la distribution
4. Principes fondateurs des réseaux électriques
5. Phénomènes liés au fonctionnement des réseaux électriques en AC
6. Stratégie de fonctionnement des réseaux
7. Outils de modélisation et d'étude des réseaux
8. Réseaux en haute tension continue – HVDC
9. Qualité de la puissance transmise
10. Étude des transferts de puissance
11. Étude des défauts
12. Smart grids

**Mots clés** : Électricité, transport, distribution, transformateur, conversion, stockage, réseau, optimisation, smart-grid, réseau intelligent.

**Evaluation** : 2 Contrôles Continus

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

- Énergie électrique, L. LASNE, 2018
- Génie électrotechnique, D.F. WARNE, 2015
- Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, L. FRERIS et al., 2019
- Électrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération, N. JENKINS, 2008

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.



**UE** : Monde professionnel

**Semestre 1**

**Intitulé** : Anglais scientifique 1

**Répartition** : TD : 12h

**Enseignant responsable** : I. Decamme

**Enseignant** : I. Decamme

**Compétences** : Entraînement aux 4 compétences avec l'accent sur la pratique de l'expression orale dans un contexte professionnel et scientifique ;  
Entraînement à la prise de parole en continu, au travail de groupe, partage et diffusion de connaissances.

**Prérequis** : niveau B2

**Contenu :**

Acquisition et utilisation du vocabulaire de l'énergie et des renouvelables,  
Contexte environnemental,  
Remédiation grammaticale personnalisée,  
Compétences transversales (recherche documentaires, lecture de publications scientifiques, vocabulaire de la recherche...).

**Programme :**

Small talk  
Energy vocabulary  
Environmental issues  
Numbers, measurements  
Graph reading  
Processes  
CVs and cover letters  
Scientific papers (Abstracts, etc.)  
...

**Mots clés** : Entraînement à l'oral - Contexte professionnel - Vocabulaire scientifique

**Evaluation** : Contrôle Continu Intégral

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** : /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP 34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances

**UE** : Monde professionnel

**Semestre 1**

**Intitulé** : Création d'entreprise 1

**Répartition** : CM : 8h, TD : 4h

**Enseignant responsable** : S. Falcou

**Enseignant(s)** : S. Falcou

**Compétences** : Connaissance des étapes menant du transfert de technologie à la création d'entreprise technologique sur la base de cours et travaux dirigés pluridisciplinaires.

**Prérequis** : /

**Contenu** :

Transfert de technologie,  
Création d'entreprise technologique innovante (incubateur, pépinière, CEEI),  
Droit de l'entreprise technologique innovante,  
Innovation et dynamique économique.

**Mots clés** : entrepreneuriat, droit.

**Evaluation** : examen écrit et projet.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** : /

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel

**Intitulé** : Contexte énergétique et environnemental

**Répartition** : CM : 12h, TD : 12h

**Enseignant responsable** : R. Olivès (PR)

**Enseignant(s)** : R. Olivès (PR)

**Compétences :**

- Comprendre le « système énergétique », depuis les besoins d'une société jusqu'aux produits livrés aux consommateurs,
- Connaître les grandes filières énergétiques et savoir analyser et décrire l'état des réserves fossiles et fissiles et les potentiels des EnR,
- Comprendre les facteurs agissant sur le contexte et la politique énergétique,
- Acquérir les notions de bases sur les aspects économiques et environnementaux de l'exploitation des ressources énergétiques,
- Acquérir des notions de développement durable et se familiariser avec une approche multidisciplinaire.

**Prérequis** : bases de la physique

**Contenu**

Il s'agit de présenter les enjeux actuels en matière d'énergie et d'environnement, montrer, à travers des exemples concrets, la logique, les moyens d'action et les technologies qui répondent de façon optimale à ces enjeux compte tenu des contraintes physiques, économiques et sociétales. L'enseignement est complété par l'analyse des différentes ressources et les modes de conversion associés. Ainsi, après une introduction à l'énergie, le contexte énergétique et environnemental est abordé par le volet consommation à différentes échelles, le particulier, l'entreprise, la région, la France, l'Europe, le monde. Ensuite, toutes les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), fissile (nucléaire) et renouvelables (solaire, éolien, hydraulique et marin, biomasse et déchets, géothermie) sont décrites sous différents points de vue techniques, économiques, géopolitiques, sociaux et environnementaux.

**Programme :**

- Présentation générale
- Besoins énergétiques des humains
- Contexte énergétique : consommation, politique énergétique, ressources, production...
- Contexte environnemental : réchauffement climatique, effet de serre, pollution
- Développement durable

**Mots clés** : énergies renouvelables, énergies fossiles, nucléaire, énergie primaire, énergie finale, économie, environnement, développement durable

**Evaluation** : rendu écrit (rapport, poster...)

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** : /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

- RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.
- RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances

**UE :** Monde professionnel

**Semestre 1**

**Intitulé :** Projet personnel professionnel 1

**Répartition :** TP : 10h

**Enseignant responsable :** F. Bataille (PR)

**Enseignant(s) :** F. Bataille (PR)

**Compétences :** Stage d'une durée minimale de 1 mois en entreprise

**Prérequis :** néant

**Contenu :**

- Présentation du stage
- Bilan personnel
- Encadrement de la recherche du stage

**Programme :**

Le stage, d'une durée minimale de 1 mois en entreprise, sera présenté et discuté dès le début de l'année universitaire. Sa recherche sera encadrée afin de maximiser les possibilités de déroulement et d'être en phase avec le projet personnel professionnel des étudiants. Le stage se déroulera à la fin de l'année universitaire.

**Mots clés :** Stage, Insertion professionnelle

**Evaluation :** L'évaluation a lieu au second semestre

**Support de cours :** /

**Bibliographie :** /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel.

# **Master ENERGIE**

## **Procédés et Matériaux pour le Solaire**

### **SEMESTRE 2**

**UE** : Energie solaire

**Semestre 2**

**Intitulé** : Transferts Thermiques.

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : A. Toutant (MCF)

**Enseignant(s)** : A. Toutant (MCF)

**Compétences** : Connaissance des différents types de transferts de chaleur et des expressions des flux de chaleur. Savoir faire un bilan thermique, établir l'équation aux dérivées partielles en découlant, maîtriser certaines méthodes de résolution.

**Prérequis** : Résolution d'équations différentielles, Intégration, Calcul tensoriel.

**Contenu :**

- Bilan d'énergie.
- Conduction : loi de Fourier, conductivité thermique des solides, liquides, gaz.
- Résolution des problèmes de conduction en régime permanent et non permanent.
- Convection : loi de Newton, convection, analyse dimensionnelle.
- Couplage avec la mécanique des fluides.
- Rayonnement : réception du rayonnement par un corps, lois du rayonnement du corps noir, émission des corps réels, échanges radiatifs entre surfaces.

**Programme :**

- 1) Transferts thermiques et thermodynamique
- 2) Conduction
- 3) Rayonnement
- 4) Convection

**Mots clés** : Conduction, Convection, Transfert radiatif, Bilan thermique.

**Evaluation** : Examen écrit (documents autorisés).

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

Transferts et échangeurs de chaleur, Yves JANNOT.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**UE :** Energie solaire

**Semestre 2**

**Intitulé :** EDP pour le solaire

**Répartition :** CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable :** S. Mer (MCF)

**Enseignant(s) :** S. Mer (MCF), G. Sahuquet

**Compétences :**

- Connaissances générales sur les méthodes numériques
- Fondement mathématique des différences finies
- Mise en place d'une démarche de résolution différences finies pour des problèmes de transferts 1D ou 2D stationnaire ou instationnaire
- Savoir discuter la pertinence d'un schéma numérique pour un problème donné
- Implémentation numérique d'un algorithme de résolution

**Prérequis :**

- Base d'analyse mathématique : série de Taylor, calcul différentiel
- Base de programmation informatique : écrire un programme simple en langage Python

**Contenu :**

La majorité des problèmes de thermique et de transfert de masse sont trop complexes pour être résolus analytiquement. En effet, la nature des équations, leurs non-linéarités et/ou la complexité de la géométrie rendent impossible l'obtention de solution analytique dans la plupart des problèmes d'ingénierie. Cependant des outils numériques permettent d'obtenir des solutions approchées de ces problèmes et sont aujourd'hui utilisés dans la plupart des logiciels commerciaux (Fluent, Comsol, ...). Après une courte introduction à la modélisation et aux différentes familles de méthode nous nous concentrerons sur la méthode des différences finies. Nous détaillerons ses fondements mathématiques et l'appliquerons à différents problèmes de thermique stationnaires et instationnaires. Les principaux schémas de discrétisation, spatiaux et temporels, seront détaillés. Ces derniers seront comparés sur la base de leurs propriétés (consistance, stabilité et convergence).

**Programme :**

- Introduction et généralité sur les méthodes numériques
- Différences finies et étapes de résolution
- Problème 1D et 2D stationnaire et transitoire
- Notion de stabilité, consistance et convergence d'un schéma

**Mots clés :** Différence finies, Équation aux Dérivées Partielles, Transferts thermiques, Stabilité, Consistance, Convergence

**Evaluation :** Rapport de projet numérique [50%] & Examen écrit [50%]

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

J. RAPPAZ AND M. PICASSO, *Introduction à l'analyse numérique*, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne EPFL, 2000.

J. FERZIGER AND M. PERIĆ, *Computational methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlin, 2002.

W. HERREMAN – Méthodes numériques – Université Paris Sud

M. BUFFAT – Méthodes numériques pour les EDP en mécanique – Université Lyon 1

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques.

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.

**UE :** Energie solaire

**Semestre 2**

**Intitulé :** Analyse numérique.

**Répartition :** CM : 9h, TP : 15h

**Enseignante responsable :** M. Rosalie (MCF)

**Enseignant(s) :** M. Rosalie (MCF)

**Compétences :** Connaître les principes de l'analyse numérique.

**Prérequis :** mathématiques de base.

**Contenu :** L'objectif de ce cours vise à apporter les outils de base en analyse numérique qui permettent de résoudre des problèmes relevant des sciences de l'ingénieur dont la solution analytique est difficile à obtenir. En fonction du problème posé, des méthodes numériques appropriées seront proposées et testées à l'aide de l'environnement de programmation Python. Parmi les questions classiques du Calcul Scientifique, seront essentiellement abordées : la recherche des zéros, la résolution de systèmes linéaires et la résolution approchée d'équations différentielles. Un premier chapitre qui décrit la manière dont les ordinateurs stockent et manipulent les nombres réels sera présenté en introduction.

**Programme :**

Les questions classiques d'analyse numérique seront abordées :

- Introduction à l'arithmétique des ordinateurs et l'analyse d'erreurs,
- Résolution des systèmes linéaires,
- Recherche des zéros d'une fonction,
- Résolution approchée d'équations différentielles.

**Mots clés :** /

**Evaluation :** Examen et projets

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

- Analyse numérique pour Ingénieurs, A. Fortin, 5<sup>ème</sup> édition, Presses Internationales Polytechnique
- Applied numerical methods for digital computation, James, Smith and Welford, Harper & Row, New-York
- Advanced engineering mathematics, Wylie and Barrett, Mac Graw Hill

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.



**UE :** Matériaux pour le solaire

**Semestre 2**

**Intitulé :** Matériaux pour la conversion photovoltaïque de l'énergie

**Répartition :** CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable :** S. Quoizola (MCF)

**Enseignant(s) :** S. Quoizola (MCF)

**Compétences :**

Maîtriser les mécanismes physiques permettant la production d'électricité à partir de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

**Prérequis :** UE Matériaux & Physique du semestre 1.

**Contenu :**

Après une rapide présentation des différentes filières photovoltaïques, ce cours décrit le principe de fonctionnement d'un convertisseur photovoltaïque idéal. Les caractéristiques physiques et les propriétés des matériaux semi-conducteurs sont ensuite présentées en détails, ainsi que les équations régissant le comportement des porteurs de charge au sein de ces matériaux. Le but est de comprendre le fonctionnement de la jonction PN puis de la cellule photovoltaïque silicium simple jonction.

La suite de ce cours porte sur les différents facteurs de pertes limitant le rendement de conversion photovoltaïque des cellules et les solutions technologiques permettant d'y remédier.

**Programme :**

- La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire : historique, aspects économiques et environnementaux
- Le convertisseur photovoltaïque idéal
- Eléments de physique des matériaux semi-conducteurs
- La jonction PN
- La cellule photovoltaïque silicium
- Aspects technologiques : facteurs de pertes, solutions, architectures des cellules.

**Mots clés :** Matériaux semi-conducteurs, Cellules photovoltaïques silicium.

**Evaluation :** Contrôle Continu & Contrôle Terminal

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

A. LUQUE, S. HEGEDUS, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Ed. J. Wiley.

S. M. SZE, Semiconductor devices : Physics and technology, Ed. J. Wiley.

H. MATHIEU, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Ed. Dunod.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Interactions rayonnement - matière : analyses spectrométriques

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : S. Quoizola (MCF)

**Enseignant(s)** : S. Grillo (MCF), S. Quoizola (MCF)

**Compétences** : Connaître et comprendre les lois régissant les mécanismes d'interaction élastique et inélastique entre un rayonnement électronique ou photonique et l'atome ou la molécule, ainsi que les mécanismes de désexcitation de l'atome suite à cette interaction.

**Prérequis** : Connaissances en mécanique quantique (dualité onde-corpuscule, représentation énergétique de l'atome dans le solide). UE Matériaux & Physique du semestre 1.

**Contenu** : Dans une première partie, après des rappels de mécanique quantique sur la nature du rayonnement électromagnétique, les niveaux d'énergie et le principe d'exclusion de Pauli, l'effet photo-électrique et les mécanismes de désexcitation radiative ou par émission Auger sont abordés pour une interaction photons/matière. Sont ensuite présentés les spectres des énergies cinétiques des électrons éjectés par les photons, en les comparant avec ceux issus d'une interaction électron/matière avant d'étudier les raies caractéristiques et le rayonnement de freinage. Pour une interaction électrons/matière les profondeurs de pénétration et d'échappement sont quantifiées, la loi équivalente d'absorption des photons X par une surface et les interactions élastiques (diffraction des rayons X) sont abordées.

Dans une seconde partie, les interactions des rayonnements proche UV, visible et infrarouge avec l'atome, la molécule et le solide sont précisées dans le but de présenter des procédés de caractérisation quantitative et/ou qualitative de la matière comme les spectroscopies visible et infra rouge.

**Programme :**

I Introduction

II Interaction des photons avec la matière

1. Processus d'excitation,
2. Processus de désexcitation radiative et non-radiative, Probabilités de désexcitation
3. Spectre des énergies cinétiques

III Interaction des électrons avec la matière

1. Spectre des énergies cinétiques
2. Processus d'excitation, processus de désexcitation
3. Rayonnement électromagnétique de freinage et rayonnements caractéristiques
4. Profondeurs de pénétration, d'échappement et d'émergence.
5. Exemples d'applications : MEB, TEM, EDS

IV Absorption des photons X

1. Coefficient d'absorption, Filtration sélective

V Interaction élastique photons/matière : Diffraction des rayons X

VI Spectroscopies

1. Coefficients d'Einstein, population des niveaux, largeur et intensité des raies
2. Colorimétrie, spectroscopies atomiques d'absorption et d'émission optique
3. Spectroscopies moléculaires : vibration/rotation des molécules
4. Spectroscopie infra rouge

**Mots clés** : Ionisation, interaction élastique/inélastique, effet photo-électrique, spectroscopie Auger, spectre des énergies cinétiques, rayonnement électromagnétique de freinage, rayonnements caractéristiques, coefficient d'absorption massique, spectroscopies.

**Evaluation** : Contrôle Continu

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

Analyse structurale et chimique de matériaux- J.P. Eberhart; Dunod, 1989.  
Mécanique Quantique -C. Cohen-Tannoudji, EDP Sciences, 2018.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Propriétés électroniques des solides (massifs)

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : F. Vernay (PR)

**Enseignant(s)** : F. Vernay (PR)

**Compétences** : A l'issue de cet enseignement, l'étudiant sera capable de comprendre, dans les limites de la théorie des bandes, pourquoi un matériau est isolant, métallique ou semi-conducteur.

**Prérequis** : notions de cristallographie de base, notions d'analyse de Fourier, structure électronique des atomes, notions de thermodynamique

**Contenu :**

Nous aborderons ce cours en partant d'une propriété électronique (macroscopique) bien connue : la résistivité électrique. Nous verrons que cette propriété peut être interprétée grâce à un modèle de Drude, rudimentaire, considérant un « gaz d'électrons libres ». Puis, en prenant en compte la statistique de Fermi-Dirac, nous montrerons que le modèle de Sommerfeld ainsi obtenu permet de comprendre des notions telles que la densités d'états électroniques et d'obtenir des lois de comportement thermodynamique des métaux. Pour autant, ces modèles n'expliquant pas pourquoi les matériaux sont isolants, semi-conducteurs, ou métalliques, nous montrerons en quoi il est important de prendre en compte la structure du solide dans laquelle se trouvent les électrons. Nous décrirons la formation de bandes électroniques dans l'espace réciproque (zone de Brillouin) et discuterons en particulier les cas de gaps directs et indirects de semi-conducteurs.

**Programme** : 1) Modèle de Drude ; 2) Statistique de Fermi-Dirac et modèle de Sommerfeld ; 4) Les états électroniques d'une petite molécule ; 5) Le réseau réciproque, la zone de Brillouin ; 6) Théorie des bandes : métal, isolant et semi-conducteur

**Mots clés** : modèle de Drude, modèle de Sommerfeld, statistique de Fermi-Dirac, densité d'états, zone de Brillouin, théorie des bandes

**Evaluation** : devoir sur table

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

L. Couture et R. Zitoun, « *Physique Statistique* », Ellipses

C. Kittel, « *Physique de l'état solide* », Dunod

N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, « *Solid State Physics* », Saunders College ; « Physique des solides », traduit en Français par F. Biet et H. Kachachi, EDP Sciences (1 janvier 2002).

W. A. Harrison, « *Electronic Structure and the Properties of Solids* », Dover

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Phénomènes de transport dans les solides

**Répartition** : CM : 12h, TD : 15h

**Enseignant responsable** : H. Kachkachi (PR)

**Enseignant(s)** : R. Bastardis (MCF), H. Kachkachi (PR)

**Compétences** : A l'issue de ce cours, l'étudiant aura acquis une connaissance relativement précise des mécanismes de transport de charge et de chaleur dans les solides. Il se familiarisera avec les équations de transport telles que l'équation de Boltzmann ou l'équation de diffusion de la chaleur. A travers une application aux cellules solaires et des structures hybrides, il pourra acquérir une compréhension globale des différents mécanismes qui entrent en jeu dans l'absorption, la conversion et le transfert d'énergie par et à travers ce type de dispositifs.

**Prérequis** : Physique du solide, phénomènes de diffusion, notions de conductivité électrique/thermique, équations différentielles aux dérivées partielles, thermodynamique et physique statistique.

**Contenu** : L'objectif de ce cours est d'étudier le transport électrique et thermique dans les solides de la dimension 3 à 0. Il sera en particulier question des mécanismes et des équations de diffusion dans les solides massifs et de leur généralisation aux basses dimensions afin de comprendre comment la réduction de la taille affecte les phénomènes de transport et les propriétés de conduction.

**Programme :**

Partie I :

- Théorie cinétique des gaz (Maxwell, Boltzmann, Einstein).
- Théorie de Hook/Fourier et résolution de l'équation de diffusion de la chaleur.
- Conductivité thermique et mécanismes de transport de l'énergie.
- Conductivité électrique et loi de Wiedmann-Franz-Lorentz.

Partie II : Applications aux

- couches minces,
- nanostructures,
- structures hybrides et cellules solaires.

**Mots clés** : conductivité électrique et thermique, équations de diffusions, équation de Boltzmann, loi de Wiedmann-Franz-Lorentz.

**Evaluation** : devoir sur table et/ou projet.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

- *The statistical theory of transport processes IV. The equations of hydrodynamics*, J. H. Irving and J. G. Kirkwood, *TJ. Chem. Phys.* 18, 817 (1950).
- *Principles of the theory of solids*, J. M. Ziman, Cambridge Univ. Press 1972.
- *Theoretical solid state physics*, W. Jones & N. H. March, volume 2, Dover Pubs. 1973.
- *Quantum kinetics in transport and optics of semiconductors*, H. Haug & A.-P. Jauho ; Springer 1996.
- *Transport phenomena*, R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- *Solid State Physics*, N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, Saunders College ; « *Physique des solides* », traduit en Français par F. Biet et H. Kachkachi, EDP Sciences (1 janvier 2002).
- *Introduction to solid state physics*, Charles Kittel, John Wiley & Sons Corp. 2005. Edition française : *Physique de l'état solide - Cours et problèmes*, Charles Kittel, Dunod 2007.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**UE :** Monde professionnel

**Semestre 2**

**Intitulé :** Anglais scientifique 2

**Répartition :** TD : 12h

**Enseignant responsable :**

**Enseignant :** I. Decamme

**Compétences :** Entraînement aux 4 compétences avec l'accent sur la pratique de l'expression orale dans un contexte professionnel et scientifique ;  
Entraînement à la prise de parole en continu, au travail de groupe, partage et diffusion de connaissances.

**Prérequis :** niveau B2

**Contenu :**

Acquisition et utilisation du vocabulaire de l'énergie et des renouvelables,  
Contexte environnemental,  
Remédiation grammaticale personnalisée,  
Compétences transversales (recherche documentaires, lecture de publications scientifiques, vocabulaire de la recherche...).

**Programme :**

Small talk  
Energy vocabulary  
Environmental issues  
Numbers, measurements  
Graph reading  
Processes  
CVs and cover letters  
Scientific papers (Abstracts, etc.)  
...

**Mots clés :** Entraînement à l'oral - Contexte professionnel - Vocabulaire scientifique

**Evaluation :** Contrôle Continu Intégral

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :** /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP 34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.

**UE** : Monde professionnel

**Semestre 2**

**Intitulé** : Création d'entreprise 2

**Répartition** : CM : 4h, TD : 8h

**Enseignant responsable** : A. Lemaire (Elio's)

**Enseignant(s)** : A. Lemaire

**Compétences** : Connaissance des étapes menant du transfert de technologie à la création d'entreprise technologique sur la base de cours et travaux dirigés pluridisciplinaires.

**Prérequis** : /

**Contenu** :

Transfert de technologie  
Création d'entreprise technologique innovante (incubateur, pépinière, CEEI)  
Droit de l'entreprise technologique innovante  
Innovation et dynamique économique

**Mots clés** : entrepreneuriat, droit.

**Evaluation** : examen et projet.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** : /

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel.

**UE :** Monde professionnel

**Semestre 2**

**Intitulé :** Projet personnel professionnel 2 : stage

**Répartition :** TP : 10h

**Enseignant responsable :** F. Bataille (PR)

**Enseignant(s) :** F. Bataille (PR)

**Compétences :** Stage d'une durée minimale de 1 mois en entreprise

**Prérequis :** Projet personnel professionnel 1

**Contenu :**

- Encadrement de la recherche du stage
- Suivi du stage
- Bilan du stage et évaluation

**Programme :**

Le stage, d'une durée minimale de 1 mois en entreprise, sera présenté et discuté dès le début de l'année universitaire. Sa recherche sera encadrée afin de maximiser les possibilités de déroulement et d'être en phase avec le projet personnel professionnel des étudiants. Le stage se déroulera à la fin de l'année universitaire.

**Mots clés :** Stage, Insertion professionnelle

**Evaluation :** Rapport écrit et soutenance orale.

**Support de cours :** /

**Bibliographie :** /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel.

# **Master ENERGIE**

## **Procédés et Matériaux pour le Solaire**

### **SEMESTRE 3**



**Intitulé :** Stockage thermique / Thermal energy storage

**Répartition :** CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable :** S. Mer (MCF)

**Enseignants :** S. Mer (MCF), A. Perona (MCF)

**Compétences :**

- Connaissances générales sur le stockage de l'énergie
- Maîtrise des différents types de stockage thermique
- Connaître et modéliser les processus élémentaires de transfert thermique mis en jeu.
- Savoir synthétiser et présenter un article scientifique du domaine
- Maîtrise de l'anglais technique appliqué au domaine

**Prérequis :**

- Ressource solaire et procédés énergétiques associés
- Analyse mathématique : calcul différentiel, intégration
- Transfert thermique : résistance thermique équivalente, conduction, convection, rayonnement

**Contenu :**

Dans le contexte de la transition énergétique et de la décarbonation du secteur de l'énergie, la part d'énergie renouvelable dans le mix énergétique tend à croître drastiquement dans les années à venir. Du fait de l'intermittence des énergies renouvelables, la problématique du stockage de l'énergie est étroitement liée au développement des technologies EnR (éolien, solaire PV, solaire thermique, ...). Dans une partie introductive, nous détaillerons les différentes fonctions du stockage de l'énergie au sens large et nous passerons en revue les principales solutions techniques aujourd'hui disponibles. La suite du cours se focalise sur le stockage de l'énergie thermique. Ce secteur est directement relié au développement des EnR solaires (thermique et thermodynamique) mais également à l'optimisation des procédés industriels ou au confort dans l'habitat. Nous présenterons des procédés de stockage à base de chaleur sensible et/ou latente et discuterons leurs forces et leurs faiblesses respectives. Nous présenterons également les différentes voies d'amélioration de ces procédés actuellement à l'étude.

**Programme :**

- Introduction au stockage de l'énergie
- Stockage thermique par chaleur sensible
- Stockage thermique par chaleur latente

**Mots clés :** Stockage de l'énergie, Stockage deux cuves, Stockage thermocline, Pertes en lignes, Matériaux pour le stockage, Changement de phase.

**Evaluation :** Présentation d'articles scientifiques [50%] & Examen écrit [50%]

**Support de cours :** Support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle. L'intégralité des supports de cours est en anglais.

**Bibliographie :**

- L.F. CABEZA, *Advances in thermal energy storage system : methods and applications*, 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier Science, 2018
- A. Touzo, Q. Falcoz, *Chapitre: Stockage thermique* du livre *Le solaire à concentration, sciences, technologies et applications*, dirigé par G. Flamant, Ed. ISTE, *En cours d'édition*

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

- RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.
- RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.
- RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel.

**UE :** Energie Solaire

**Semestre 3**

**Intitulé :** Centrales électriques solaires / Solar power plants

**Répartition :** CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable :** Q. Falcoz (MCF)

**Enseignants :** Q. Falcoz (MCF)

**Compétences :** Transfert de chaleur par convection, conduction rayonnement, Bilans énergétiques.

**Prérequis :** Notions générales de base sur les capteurs solaires, la conversion, la thermodynamique des procédés et les transferts.

**Contenu :**

Les différents procédés de production d'électricité par voie solaire sont exposés et illustrés. Leurs limitations sont identifiées et les différentes solutions envisagées sont présentées sur la base des programmes de recherche actuellement développés.

Les cours théoriques sont appuyés par des visites techniques et scientifiques des installations solaires du four solaire d'Odeillo, notamment la mini-centrale cylindro-parabolique Microsol-R et la tour de Thémis

**Programme :**

- Rayonnement, ressource solaire et concentration
- Systèmes centralisés : centrales thermodynamiques de type héliostats/tour
- Centrales thermodynamiques à concentrateurs cylindro-paraboliques.
- Principes, composants, efficacité

**Mots clés :** Energie solaire à concentration, Conversion, Thermodynamique, Procédés

**Evaluation :** Examen écrit.

**Support de cours :** l'ensemble des supports numériques utilisés en cours et travaux dirigés est mis à disposition des étudiants.

**Bibliographie :**

Journal of Solar Energy Engineering, Proceedings of SolarPACES

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.

**Intitulé :** Transferts radiatifs avancés / Radiative heat transfer

**Répartition :** CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable :** A. Toutant (MCF)

**Enseignant(s) :** A. Toutant (MCF)

**Compétences :**

Comprendre les effets spectral et directionnel du rayonnement. Savoir estimer les flux radiatifs d'une installation industrielle (perte thermique d'un four de l'industrie métallique ou par l'ouverture de la cavité d'une centrale solaire à tour par exemple).

**Prérequis :** Transferts thermiques.

**Contenu :**

- Flux de chaleur par rayonnement (intensité énergétique, éclairement, radiosité, flux net),
- Rayonnement du corps noir,
- Émissions des surfaces réelles,
- Absorption, réflexion et transmission par des surfaces réelles (loi de Kirchhoff),
- Rayonnement solaire, rayonnement terrestre et atmosphère (effet de serre),
- Transferts radiatifs entre surfaces (facteur de forme, surfaces noires et grises, réflexion diffuse et spéculaire, méthode des images, milieu transparent et semi-transparent).

**Programme :**

1. Lois du rayonnement. Effets spectral et directionnel.
2. Rayonnement entre surfaces séparées par un milieu transparent.
3. Rayonnement entre surfaces séparées par un milieu semi-transparent.

**Mots clés :** Rayonnement, Radiosité, Réflexion diffuse, Réflexion spéculaire, Milieux semi-transparent, Evaluation des transferts radiatifs d'une installation industrielle.

**Evaluation :** Réalisation d'un projet (rapport) ou examen écrit (documents autorisés) au choix.

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

Fundamentals Of Heat And Mass Transfer, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. Dewitt.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés

**UE :** Energie Solaire

**Semestre 3**

**Intitulé :** Système de concentration et récepteur / Solar concentrating system and receiver.

**Répartition :** CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable :** Q. Falcoz (MCF)

**Enseignant(s) :** Q. Falcoz (MCF)

**Compétences :**

- Transfert de chaleur par convection, conduction, rayonnement
- Bilans énergétiques

**Prérequis :** Connaissances de base en transferts de chaleur, Optique géométrique, Thermodynamique, génie des procédés.

**Contenu :**

- Développer les connaissances des étudiants sur le potentiel des ressources solaires concentrées pour la production de vecteurs énergétiques durables,
- Comprendre la théorie de l'optique de concentration,
- Développer la compréhension des étudiants sur les différents systèmes de concentration solaire: concentration linéaire, concentration ponctuelle, systèmes à haute concentration.

**Programme :**

- La ressource solaire pour les système concentrateurs
- Introduction à l'optique de concentration
- Concentration linéaire : cylindro-paraboliques et linéaires de Fresnel
- Concentration ponctuelle : Paraboles et tours
- Récepteurs solaires (absorbeurs) pour concentration linéaires et ponctuelle

**Mots clés :** Optique géométrique, Energie solaire à concentration, Conversion, Thermodynamique, Procédés

**Evaluation :** Examen écrit.

**Support de cours :** l'ensemble des supports numériques utilisés en cours et travaux dirigés est mis à disposition des étudiants.

**Bibliographie :**

- Journal of Solar Energy Engineering
- Proceedings of SolarPACES

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

- RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.
- RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.

**Intitulé** : Combustible solaire / Solar fuel.

**Répartition** : CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable** : Sylvain RODAT (CR)

**Enseignant(s)** : Gilles FLAMANT, Malek MSHEIK, Sylvain RODAT (CR)

**Compétences** : L'enseignement permet d'introduire la notion de réacteur solaire et les principales réactions endothermiques associées (cycles thermochimiques, gazéification, reformage, pyrolyse). Les équilibres thermodynamiques et les cinétiques chimiques sont abordés ainsi que les aspects thermiques (transferts de chaleur). Les différentes technologies de réacteurs sont également détaillées afin de donner un aperçu de l'état de l'art.

**Prérequis** : Génie des réacteurs, thermodynamique, cinétique chimique.

**Contenu** : 82% de l'énergie mondiale est utilisée sous forme de carburant (carburant fossile (67%), biomasse (12%)), tandis que les 18% restant sont consommés sous forme d'électricité. A partir de ce constat, il apparaît que la production de carburants renouvelables est indispensable à la transition énergétique. L'énergie solaire est l'énergie renouvelable la plus abondante sur Terre. Sa concentration par des systèmes optiques spécifiques peut permettre de produire des carburants solaires via différents procédés à haute température, notamment de l'hydrogène issu pour tout ou partie du stockage de cette énergie solaire. Il s'agit en particulier des cycles thermochimiques de dissociation de l'eau ou des réactions de reformage, craquage ou gazéification de ressources fossiles ou encore de la carboréduction d'oxydes métalliques. Le cours aborde ces différentes technologies ainsi que les aspects thermodynamiques, cinétiques, et la modélisation associée. Les travaux dirigés permettent d'étudier des exemples concrets d'expérimentations solaires afin d'évaluer les performances des dispositifs et les voies d'amélioration. Cet enseignement est très en lien avec les recherches menées au four solaire d'Odeillo mais également dans le reste de la communauté scientifique internationale. Ainsi, il permet de présenter les défis scientifiques et techniques pour la production de carburants solaires et de se doter des connaissances pour mieux comprendre et investiguer ces systèmes.

**Mots clés** : Energie solaire concentrée, hydrogène, carburant solaire, reformage, craquage, gazéification, cycles thermochimiques.

**Support de cours** : support de cours sous forme numérique disponible sur Moodle.

**Evaluation** : Contrôle écrit (2h), seconde session contrôle écrit (1h)

**Bibliographie :**

- Chuayboon, S., & Abanades, S. (2020). An overview of solar decarbonization processes, reacting oxide materials, and thermochemical reactors for hydrogen and syngas production. International Journal of Hydrogen Energy.
- <https://www.youtube.com/watch?v=fwRdKCJ0W0A>
- <https://www.youtube.com/watch?v=YTQa9rX9WnY>

**Bloc(s) de compétences correspondant(s) :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Outils logiciels et matériaux / Software tools and materials

**Répartition** : TP : 21h

**Enseignant responsable** : S. Quoizola (MCF)

**Enseignant(s)** : Laurent Thomas (PR), S.Grillo (MCF), S. Quoizola (MCF)

**Compétences** : Maitriser différents logiciels utilisés en science des matériaux et des procédés associés à la fois dans la recherche et dans les entreprises. Connaître la méthode de sélection et d'éco-sélection des matériaux par l'évaluation des propriétés à maximiser (calcul des indices de performance) couplée avec l'utilisation du logiciel CES permettant la détermination des matériaux qui possèdent les propriétés recherchées.

**Prérequis** : UE Matériaux du semestre 1 et UE : Matériaux pour le Solaire du semestre 2, bases en mécanique du solide, analyse du cycle de vie.

**Contenu** : Le cours portera principalement sur l'utilisation de trois logiciels :  
- Cambridge Engineering Selector (CES) : Sélection des matériaux et procédés intégrés.  
- SRIM : Interactions ions/matériaux, analyses de données de procédés plasma.  
- PC1D : Simulation de cellules photovoltaïques

**Programme :**

Sélection des matériaux et procédés intégrés : la partie théorique porte sur la méthode de calcul des indices de performance qui permet de quantifier les propriétés à optimiser dans les problèmes de conception. Cette méthode est ensuite appliquée à l'éco-sélection, dans le but de minimiser les dépenses énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub>. Pour ce faire, une analyse du cycle de vie est effectuée préalablement, afin de déterminer l'étape ayant un impact prépondérant sur l'environnement. La partie pratique porte sur la prise en main du logiciel Cambridge Engineering Selector (CES), via une série d'exercices qui permettent d'en maîtriser, de façon évolutive, les différentes fonctionnalités. Par la suite on utilise CES pour la sélection et l'éco-sélection des matériaux dans une série d'exemples concrets proposés par l'enseignant, ainsi que dans un mini-projet de conception choisi par les étudiants.

Interaction ions/matériaux : le logiciel SRIM est mis en œuvre en compléments du cours portant sur les technologies des traitements de surface. Il met en exergue les interactions de particules énergétiques avec des matériaux telles que celles qui entrent en jeu lors de caractérisations de matériaux utilisant des particules énergétiques, les effets du bombardement ionique utilisé pour pulvériser une cible en PVD, ou lors de la croissance de films minces en PACVD.

Simulation de cellules photovoltaïques : après la prise en main du logiciel via l'analyse de différentes cellules, les étudiants étudieront les variations des rendements quantiques et de conversion photovoltaïque d'une cellule industrielle en fonction des caractéristiques (niveaux et profils de dopages, recombinaisons de volume et de surface, ...) des matériaux constitutifs de cette cellule photovoltaïque et de son architecture (BSF, FSF, CAR, ...).

**Support de cours** : support de cours, exercices et tutoriels des logiciels utilisés disponibles sur Moodle.

**Evaluation** : Projets

**Bibliographie :**

- *"Materials: engineering, science, processing and design"* 3<sup>rd</sup> ed., M.F. Ashby, H.R. Shercliff and D. Cebon, Butterworth Heinemann, Oxford, 2014.
- *"Materials Selection in Mechanical Design"* 4<sup>th</sup> ed., M.F. Ashby, Butterworth Heinemann, Oxford, 2011
- *"Made to Measure: New Materials for the 21st Century"*, par P. Ball, PUP, Princeton, 1999.
- CES EduPack Eco Audit Tool ([www.teachingresources.com](http://www.teachingresources.com))

**Bloc(s) de compétences correspondant(s) :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé :** Matériaux pour le solaire thermique / Innovative materials for energy conversion

**Répartition :** CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignante responsable :** Audrey Soum-Glaude (IR)

**Enseignant(s) :** Audrey Soum-Glaude (IR)

**Compétences :**

- Comprendre le défi que représente le solaire thermique (en particulier à concentration) en termes de sélection, design et optimisation des matériaux, et comment identifier des matériaux adéquats
- Apprécier l'influence des propriétés optiques de ces matériaux sur les performances des applications solaires, comment elles sont mesurées, simulées, calculées, et comment les améliorer
- Anticiper l'impact des conditions d'utilisation sur la durabilité de ces matériaux
- Assister et conseiller dans le choix et/ou le design de composants pour le solaire thermique

**Prérequis : /**

**Contenu :**

Matériaux à propriétés optiques pour le solaire thermique basse et haute température :

- sélection, fonctionnalisation de surface, fabrication
- design, simulation, optimisation et calcul des performances optiques
- caractérisation, vieillissement et durabilité

Composants associés :

- miroirs concentrateurs
- verres antireflets
- absorbeurs solaires thermiques

**Programme :**

- Cours magistraux
- Travaux dirigés sur ordinateur (logiciels Excel, Scilab) interactifs (activités Moodle : leçons individuelles, questionnaires)

**Mots-clés :** solaire thermique, propriétés thermo-optiques

**Évaluation :**

- Présence : 5%
- Leçons interactives sur Moodle : 15%
- Fichiers et questionnaires liés au travail en TD : 40%
- Questionnaire final sur Moodle : 40%

**Supports de cours :** tous les supports de cours et TD en format numérique (et en anglais) sont mis à disposition sur l'espace Moodle de la matière

**Bibliographie : /**

**Bloc(s) de compétences correspondant(s) :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé :** Filières photovoltaïques / Photovoltaic technologies

**Répartition :** CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable :** S. Quoizola (MCF)

**Enseignant(s) :** K. Djessas (PR), S. Quoizola (MCF)

**Compétences :** Connaître le contexte économique, les différents matériaux et les différentes filières technologiques mis en œuvre pour réaliser la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

**Prérequis :** Matériaux pour la conversion Photovoltaïque.

**Contenu :** La première partie de ce cours, après avoir dressé un état des lieux du photovoltaïque, s'intéresse aux différentes filières existantes ou à venir : silicium cristallin, cellules en couches minces, cellules sous concentration, cellules de 3<sup>e</sup> génération.

La seconde partie de ce cours consiste en la réalisation d'un projet portant sur le photovoltaïque, projet qui pourra être réalisé en partenariat avec des acteurs industriels ou locaux de la filière.

**Programme :**

- Contexte mondial : état des lieux du photovoltaïque, données économiques, tissu industriel, coûts.
- Filière silicium cristallin : du sable au wafer, du wafer à la cellule, les différentes architectures de cellules existantes, cellules à haut rendement.
- Filière semi-conducteurs III-V : multi-jonctions.
- Filière cellules photovoltaïques sous concentration : CPV.
- Filière silicium en couche mince : silicium amorphe.
- Filière cellules photovoltaïques en couches minces : CIGS, CdTe.
- Filière cellules photovoltaïques organiques.
- Projet

**Mots clés :** Photovoltaïque, Projet.

**Evaluation :** projet : rapport écrit + exposé oral par groupe.

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :** /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.



**UE :** Matériaux pour le Solaire

**Semestre 3**

**Intitulé :** Théorie et technologies des capteurs solaires / Solar Collector theory and technologies

**Répartition :** CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable :** A. Perona (MCF)

**Enseignant :** A. Perona (MCF)

**Compétences :**

De la connaissance de la ressource solaire aux systèmes absorbants pour produire de l'énergie thermique. Applications aux centrales et au bâtiment.

**Prérequis :** Transfert thermique, interaction rayonnement matière.

**Contenu :**

- Modélisation et dimensionnement d'une installation solaire thermique individuelle (capteur plan) ou industrielle (capteur cylindro-parabolique).
- Optimisation de la composition d'un matériau récepteur thermique.

**Programme :**

- La ressource solaire
- Capteurs solaires plans et cylindro-paraboliques
- Modélisation et dimensionnement d'une installation
- Etude d'empilements multi couches pour récepteurs

Une partie du travail sera réalisée avec un tableur.

**Mots clés :** Transfert thermique, bilan thermique, empilement, réponse optique.

**Evaluation :** Rapports

**Support de cours :** Prises de notes. Documents numériques.

**Bibliographie :** /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques.

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.

**Intitulé** : Concepts innovants pour la conversion de l'énergie électromagnétique

**Répartition** : CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable** : H. Kachkachi (PR)

**Enseignant(s)** : H. Kachkachi (PR), L. M. Lacroix (MCF)

**Compétences** : L'objectif de ce cours est d'apprendre, sur la base d'exemple concrets, les différentes possibilités qu'offrent les nanomatériaux pour l'amélioration de la conversion de l'énergie électromagnétique, en particulier, dans les domaines du visible, de l'UV et de l'IR. En particulier, nous serons amenés à étudier l'évolution de la technologie photovoltaïque à travers ses trois générations (PV1-Silicium, PV2-Film minces et PV-III Technologies PV émergentes).

**Prérequis** : Physique du solide, interaction lumière-matière, phénomènes de diffusion.

**Contenu** : le but ici est de passer en revue les aspects fondamentaux sous-jacents aux trois génération de conversion de l'énergie solaire, en soulignant à chaque fois les aspects pratiques et les contraintes de chacune des technologies. L'accent est mis sur la troisième génération de convertisseur de l'énergie électromagnétique à savoir les systèmes à base de structures nanométriques ou de matériaux innovants, comme les pérovskites.

**Programme :**

Partie I :

- Coefficient d'absorption, longueur de pénétration.
- Onde évanescente, décroissance du champ électrique.
- Gap direct, gap indirect (phonons).
- Classification des technologies en fonction de la longueur d'absorption, rapport coût-efficacité.
- Exigences optiques pour une bonne cellule solaire (revêtement).

Partie II :

- Aperçu des différents matériaux/structures à bases de nano-objets (nondots, nono-antidots, nanoclusters, nanopilliers, etc.) : effet de la taille et du confinement et de la forme sur le spectre d'absorption.
- Spectre d'excitations et effets de la distribution spatiale et de l'orientation des nano-objets.
- Minimisation des pertes : comparaison entre les massifs/couches et nanostructures.
- Nanostructures plasmoniques et couplage avec la couche active.
- Cellules PV organiques et pérovskites
- Méthodes de fabrication
- Perspective et verrous technologiques.

**Mots clés** : électromagnétisme, propriétés optiques (absorption/diffusion/transmission), effets de taille, de forme et de surface, fonctionnement d'une cellule solaire de base.

**Evaluation** : devoir sur table et/ou projet.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

- *Introduction to electrodynamics*, D. J. Griffiths, PHI Learning, 2013.
- *Optical properties of metal clusters*, U. Kreibig & M. Vollmer, Springer Series in Materials Science 25, Springer 1995.
- *Nanostructured materials for solar energy conversion*, Ed. Tetsuo Soga, Elsevier 2006.
- Plasmonics for improved photovoltaic devices, H. A. Atwater and A. Polman, *Nature Materials* vol. 9 (2010) 205.
- *Plasmonic materials for energy: From physics to applications*, S. V. Boriskina, H. Ghasemi. G. Chen, *Materialstoday* vol. 16 (2013) 375.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Du massif au nano / Towards nano scale

**Répartition** : CM : 7,5h, TD : 13,5h

**Enseignant responsable** : H. Kachkachi (PR)

**Enseignant(s)** : N. Barros (MCF), H. Kachkachi (PR)

**Compétences** : A l'issue de cet enseignement, l'étudiant aura acquis une bonne connaissance de l'intérêt de l'échelle nanométrique. Au niveau fondamental, cela permettra de bien comprendre comment les propriétés des matériaux et leurs transitions sont modifiées à cette échelle. D'un point de vue applications, il sera alors possible de mieux comprendre pourquoi les nanomatériaux sont dotés de propriétés extra-ordinaires très innovantes.

**Prérequis** : notions de cristallographie de base, structure électronique des atomes, notions de thermodynamique (limite thermodynamique), notions de transition de phase.

**Contenu** : Le but est de montrer, à travers quelques exemples concrets, comment les propriétés physiques des matériaux massifs et les transitions de phase magnétiques et/ou structurales, et de manière générale les comportements à l'équilibre et dynamique, sont modifiées lorsque la taille du système est réduite jusqu'à l'échelle nanométrique en passant par les couches minces.

**Programme** :

- Introduction : nanomètre, nanoseconde, ... nanosciences, quel intérêt ?
- Propriétés à l'équilibre :
  - Rappel sur les massifs (transitions de phase structurale, magnétique, etc.)
  - Les systèmes nanométriques ne sont pas massifs : effets de taille finie, effets de bords. Qu'en est-il des propriétés observées dans les massifs ? Expériences et observations...
- Propriétés dynamiques et applications
- Conclusion et perspectives
- Pourquoi le « nano » est si intéressant, et à quel prix ?
- Quel impact sur la vie quotidienne (conversion de l'énergie, phénomènes de transport, etc) ?

**Mots clés** : matériaux massifs, transitions de phase, nano-objets, phénomènes dynamiques.

**Evaluation** : devoir sur table et/ou projet.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** :

- *The new quantum universe*, Tony Hey et Patrick Walters, Cambridge Univ. Press 2003.
- *Nanomaterials, synthesis, properties and applications*, Ed. A. S. Edelstein et R. C. Cammarata, IOP 1996.
- *Solid State Properties: From Bulk to Nano*, Mildred Dresselhaus, Gene Dresselhaus, Stephen B. Cronin, Antonio Gomes Souza Filho, Springer 2018.

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Simulations dynamiques et thermiques / Combined heat and mass transfer

**Répartition** : CM : 6h, TP : 15h

**Enseignant responsable** : A. Toutant (MCF)

**Enseignant(s)** : A. Toutant (MCF)

**Compétences** : Savoir utiliser les logiciels de résolution d'EDP afin de répondre à une problématique de l'énergétique.

**Prérequis** : Transferts thermiques, Mécanique des fluides, Analyse numérique.

**Contenu :**

- Utilisation du logiciel commercial Comsol.
- Résolution de problèmes couplés transferts thermiques et mécanique des fluides.
- Résolution approchée des EDP.
- Schémas de discrétisation et résolution de système linéaire.
- Conditions aux limites.
- Maillages et domaines de calcul.
- Propriétés de conservation : bilan de masse, d'énergie et de quantité de mouvement.
- Validation des résultats (vérification des bilans, comparaison avec des corrélations, des résultats analytiques, expérimentaux et numériques).

**Programme :**

1. Généralité sur les logiciels de résolution d'EDP
2. Organigramme général de l'utilisation d'un logiciel de résolution d'EDP
3. Réalisation de 3 études de cas imposés : couche limite thermique, échangeur tubulaire co-axial et dépôt de couche mince pour le photovoltaïque
4. Réalisation d'une étude de cas au choix

**Mots clés** : Simulation numérique, transferts couplés.

**Evaluation** : Réalisation d'un projet (rapport) ou examen écrit (documents autorisés) au choix.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

Mécanique des fluides numérique, David Frederick FLETCHER, Catherine XUEREB, Technique de l'ingénieur 2004.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques.

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**UE** : Smart solaire

**Semestre 3**

**Intitulé** : Smart buildings

**Mutualisation** : Master EEA

**Répartition** : CM : 9h, TP : 12h

**Enseignant responsable** : A. Traoré (MCF)

**Enseignant(s)** : A. Traoré (MCF), A. Benzagmoud

**Prérequis** : Notions en énergétiques, Notions en automatique, Utilisation du logiciel Matlab/Simulink.

**Contenu** : L'objectif de ce cours est d'ouvrir le champ disciplinaire de l'étudiant aux problématiques de la gestion de l'énergie dans les bâtiments grâce aux nouvelles technologies et à la modélisation énergétique des bâtiments et du confort thermique des occupants. Les applications pourront se faire grâce à un logiciel de modélisation dédié et Matlab-Simulink.

**Programme** :

- Enjeux énergétiques du bâtiment.
- Intégration des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.
- Modélisation énergétique d'un bâtiment.
- Confort thermique des occupants.
- Gestion des ressources énergétiques.

**Mots clés** : Bâtiment, Gestion énergétique, Modélisation.

**Evaluation** : /

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie** : /

**Bloc(s) de compétences correspondants** :

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques.

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**UE :** Smart solaire

**Semestre 3**

**Intitulé :** Smart grids

**Mutualisation :** Master EEA

**Répartition :** CM : 12h, TP : 15h

**Enseignant responsable :** A. Traoré (MCF)

**Enseignant(s) :** A. Traoré (MCF), O. Laguili

**Compétences :** Développer et programmer une stratégie de gestion des ressources énergétiques et de pilotage des charges d'un réseau électrique intelligent avec Matlab-Simulink.

**Prérequis :** Transport et distribution de l'énergie électrique, Utilisation du logiciel Matlab/Simulink.

**Contenu :** Ce cours a pour objectif de présenter ce qu'est un réseau électrique intelligent, comment il se modélise et de quelle manière on peut le piloter de façon intelligente.

**Programme :**

- Du réseau électrique au smart grid.
- Gestion de la production décentralisée d'énergie renouvelable.
- Intégration des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.
- Modélisation d'un réseau électrique intelligent.
- Gestion des ressources et régulation de tension.

**Mots clés :** Réseaux électriques intelligents, Modélisation numérique.

**Evaluation :** /

**Support de cours :** support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :** /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques.

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

**Intitulé** : Projets professionnels numériques / Digital professional projects

**Répartition** : CM : 6h, TP : 15h

**Enseignant responsable** : F. Bataille (PR)

**Enseignant(s)** : F. Bataille (PR)

**Compétences** : Développer une démarche d'innovation technologique dans le domaine de l'énergie.

**Prérequis** : Connaissances basiques du numérique.

**Contenu :**

Au cours de ce module, les étudiants développeront un projet technologique sur un sujet innovant dans le domaine de l'énergie, en utilisant un aspect numérique (codes, programmation, excel...). Le choix du sujet est libre mais doit être validé par l'enseignant(e).

Le projet peut s'appuyer sur des domaines scientifiques spécifiques de l'énergie ou faire intervenir des aspects transversaux ou encore être le prolongement d'études débutées dans d'autres matières (ou durant une autre formation). Il peut également s'insérer dans le cadre d'un projet professionnel.

Sur la base d'une recherche documentaire initiale, les étudiants développeront leur projet en utilisant les différentes compétences acquises durant leur scolarité en Master.

Le travail réalisé sera finalisé par un rapport ainsi qu'une présentation orale devant l'ensemble de la promotion.

**Programme :**

- Choix du projet à développer
- Recherche d'études antérieures
- Réalisation du projet
- Rédaction d'un rapport et présentation orale

**Mots clés** : Gestion de projet, Numérique.

**Evaluation** : Rapport écrit et soutenance orale

**Support de cours** : /

**Bibliographie** : /

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques

**Intitulé** : Management environnemental / Project, case study

**Répartition** : TD : 21h

**Enseignant responsable** : R. Olives (PR)

**Enseignants** : R. Olives (PR)

**Compétences :**

- Acquérir les notions essentielles liées au développement durable et se familiariser avec une approche multidisciplinaire,
- Connaître les différents outils nécessaires au management environnemental,
- Savoir analyser le contexte environnemental,
- Comprendre les facteurs agissant sur le contexte et la politique environnementale et énergétique.

**Prérequis** : Bases de la physique et de l'énergétique.

**Contenu** : Il s'agit de présenter les enjeux actuels en matière environnementale et de développement durable, montrer, à travers des exemples concrets, la logique, les moyens d'action et les technologies qui répondent de façon optimale à ces enjeux compte tenu des contraintes physiques, économiques et sociétales. L'enseignement est complété par l'analyse de documents ciblés sur le management environnemental sous différents points de vue techniques, économiques, géopolitiques et sociaux.

**Programme :**

- Présentation générale
- Enjeux du développement durable
- Contexte environnemental : réchauffement climatique, effet de serre, pollution
- Transition écologique et énergétique
- Management et outils pour le développement durable

**Mots clés** : enjeux environnementaux et sociaux, développement durable, sobriété énergétique, viabilité économique, analyse de cycle de vie, bilan carbone, énergies renouvelable.

**Evaluation** : projet et restitution orale.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

- Analyse de cycle de vie – O. Jolliet, 2017
- Quelle empreinte environnementale pour notre avenir énergétique ? : L'ACV : une méthode d'évaluation systémique et multicritère, R. Besseau, 2021

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés  
RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel



**Intitulé :** Thermo économie : du capteur à la centrale / Thermoeconomics

**Répartition :** CM : 6h, TP : 15h

**Enseignant responsable :** P.Neveu (PR)

**Enseignant(s) :** P.Neveu (PR)

**Compétences :** Ce cours permet aux étudiants d'élaborer, en binôme, un rapport technico-économique permettant, par exemple, d'appuyer une demande de financement (aide R&D ou emprunt) auprès d'un financeur institutionnels ou privés.

Au terme de cet enseignement, l'étudiant sera donc capable :

- de dimensionner techniquement une centrale thermodynamique (choix du fluide et des conditions opératoires) en fonction de la ressource solaire disponible et de la nature du puits thermique),
- d'évaluer les performances de l'installation (analyse énergétique et exergetique),
- d'estimer les indicateurs économiques de l'installation,
- de proposer un dimensionnement optimal selon un objectif multi-critères : énergétique, environnemental, économique,
- de rédiger une annexe technico-économique d'une demande d'aide de financement,
- d'utiliser l'outil informatique à des fins de modélisation et d'optimisation.

**Prérequis :** Thermodynamique avancée, Conversion thermique de l'énergie solaire, Stockage thermique. Contexte économique et environnemental.

**Contenu :** Cet enseignement consiste à élaborer un dossier technico-économique pour un projet de développement de centrale. Au fil des séances, les principales étapes de la réalisation du dossier sont abordées, d'un point de vue théorique ou méthodologique, puis pratique, en s'appuyant sur un cas d'étude réel. L'étude technique est réalisée en utilisant l'outil informatique, d'une part pour évaluer les propriétés thermodynamiques des fluides, et d'autre part pour réaliser l'optimisation du système étudié. Le travail réalisé permet d'approfondir les connaissances acquises dans plusieurs cours (cf. prérequis). De nouveaux concepts sont également abordés : l'intégration optimale (thermodynamique en dimensions/temps fini(e)) visant à l'estimation rapide de conditions opératoires adaptées à l'environnement de la centrale (ressource solaire et nature de la source froide) et les critères macro-économiques habituellement demandées par les financeurs institutionnels ou privés (par exemple le LCOE : Levelized Cost of Energy/Electricity)).

**Programme :**

- Rappels : les convertisseurs thermomécanique et l'analyse exergetique.
- Utilisation de logiciels thermodynamiques pour le calcul des propriétés thermodynamiques.
- L'intégration optimale : thermodynamique en dimensions finies.
- Les indicateurs économiques propres au génie énergétique.
- Réalisation, sous forme de projet, d'un dossier technico-économique :
  - 1) Détermination des conditions opératoires optimales d'après les spécifications de l'environnement (ressources solaires et nature de la source froide)
  - 2) Sélection et évaluation du(des) cycle(s) thermodynamique(s) : fluide de travail, pression et température opératoires, puissances, rendements, etc.
  - 3) Evaluation des coûts et des critères économiques
  - 4) Optimisation multicritères : énergétique, environnemental et économique

**Mots clés :** Thermodynamique en dimensions/temps fini(e)s, analyse exergetique, LCOE, thermo-économie.

**Evaluation** : Rapport.

**Support de cours** : support(s) de cours sous forme numérique disponible(s) sur Moodle.

**Bibliographie :**

Finite physical dimensions optimal thermodynamics . 1, Fundamentals, Feidt, Michel, London : Iste Press Lt ; Oxford : Elsevier Ltd; 2017.

Finite Physical Dimensions Optimal Thermodynamics 2: Complex Systems, Feidt, Michel, San Diego: Elsevier; 2018.

Solar Energy Engineering, Processes and Systems, Soteris A. Kalogirou, Academic Press, 14th November 2013.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés

RNCP34438BC04 : Appui à la transformation en contexte professionnel

**Intitulé** : Thermique du bâtiment / Thermal building

**Répartition** : CM : 6h, TP : 15h

**Enseignant responsable** : A. Perona (MCF)

**Enseignant(s)** : A. Perona (MCF), D. Danjou

**Compétences** : Calcul d'apports solaires, Optimisation énergétique des bâtiments résidentiels ou tertiaires, Apports ENR dans le bâtiment, Réglementation énergétique.

**Prérequis** : Conversion de l'énergie solaire

**Contenu :**

Il s'agit de minimiser la consommation énergétique d'un bâtiment que ce soit en chauffage ou en climatisation notamment en favorisant les apports solaires (thermique et/ou photovoltaïque). Les solutions solaires passives et actives sont étudiées en liaison avec d'autres aspects architecturaux (isolations thermiques interne ou externe, volumes tampons, inertie thermique, compacité et orientations du bâtiment et des baies vitrées, ...) et en conformité avec la réglementation thermique RT qui vise à diminuer la consommation en énergie primaire du bâtiment tout en satisfaisant des critères de confort en toutes saisons.

La première partie de l'enseignement portera sur l'étude théorique de l'énergie solaire reçue sur terre avec application directe aux apports bénéfiques aux bâtiments.

Dans la seconde partie seront abordés le bilan énergétique du bâtiment, les obligations réglementaires et l'optimisation énergétique avec introduction des équipements ENR dans les bilans.

**Programme :**

- Loi de Planck et calculs d'irradiance.
- Équation de la course du soleil.
- Calcul de position et d'apports solaires directs et diffus par les baies vitrées. Influence des masques.
- Bilan énergétique du bâtiment et ENR.
- Réglementation énergétique.

**Mots clés** : course du soleil, énergie solaire, bâtiment, réglementation énergétique, ENR.

**Evaluation** : Rapports

**Support de cours** : Polycopiés prises de notes et présentations.

**Bibliographie :**

Énergie solaire : Calculs et optimisation, Jacques Bernard, Ellipses Édition Marketing.

**Bloc(s) de compétences correspondants :**

RNCP34438BC01 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques.

RNCP34438BC02 : Développement et intégration de savoirs hautement spécialisés.

RNCP34438BC03 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances.