

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

نموذج مطابقة و مواءمة

عرض تكوين ماستر أكاديمي
2026 – 2025

التخصص	الشعبة	ميدان
فيزياء المواد	الفيزياء	علوم المادة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

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

L.M.D. MASTER ACADEMIQUE

2025 – 2026

Domaine	Filière	Spécialité
SCIENCES DE LA MATIERE	PHYSIQUE	PHYSIQUE DES MATERIAUX

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

Semestre 1 :

Unité d'Enseignement	Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
	Intitulé	15 semaines	C	TD	TP				Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 1 Crédits : 18 Coefficient : 9	Physique du Solide approfondie	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Matériaux Diélectriques et magnétiques	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Physique des Semi-conducteurs	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Métallurgie physique	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM 1 Crédits : 9 Coefficient : 5	Interaction rayonnement-matière et applications	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	50%	50%
	Traitement du signal	37h30	1h00	1h30		37h30	2	3	50%	50%
	Exploration de logiciels libres et open source de la spécialité	22h30			1h30	27h30	1	2	50%	50%
UE Découverte Code : UED 1 Crédits : 2 Coefficient : 2	Choisir une matière parmi : 1/ Introduction aux ondes élastiques 2/ Production et stockage de l'hydrogène 3/ Autre matière du domaine des matériaux.	45h00	1h30	1h30		5h00	2	2	33%	67%
UE Transversale Code : UET 1 Crédits : 1 Coefficient : 1	Intelligence artificielle et Machine Learning 1	22h30			1h30	2h30	1	1		100%
Total Semestre 1		375h00	11h30	10h30	3h00	375h00	17	30		

Semestre 2 :

Unité d'Enseignement	Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
	Intitulé	15 semaines	C	TD	TP				Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 2 Crédits : 18 Coefficient : 9	Propriétés des matériaux	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Dispositifs à semi-conducteurs	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Matériaux Polymères et céramiques	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Métaux et alliages métalliques	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM 2 Crédits : 9 Coefficient : 5	Méthodes de caractérisation et d'analyse des matériaux (1)	37h30	1h00		1h30	37h30	2	3	50%	50%
	Intelligence artificielle et Machine Learning 2	22h30			1h30	27h30	1	2	50%	50%
	Capteurs et instrumentation	45h00	1h30		1h30	55h00	2	4	50%	50%
UE Découverte Code : UED 2 Crédits : 2 Coefficient : 2	Choisir une matière : 1/ Matériaux pour les énergies 2/ Physique des ultrasons 3/ Ingénierie inverse 4/ Autre matière du domaine des matériaux.	45h00	1h30	1h30		5h00	2	2	33%	67%
UE Transversale Code : UET 2 Crédits : 1 Coefficient : 1	Propriété intellectuelle et communication scientifique	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
Total Semestre 2		375h00	13h00	7h30	4h30	375h00	17	30		

Semestre 3 :

Unité d'Enseignement	Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
	Intitulé	15 semaines	C	TD	TP				Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 21 Crédits : 18 Coefficient : 9	Théories et Modélisation des matériaux	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Optoélectronique	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Matériaux innovants	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Matériaux photoniques	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM 21 Crédits : 9 Coefficient: 5	Techniques d'élaboration et/ou synthèses des matériaux	37h30	1h00		1h30	37h30	2	3	50%	50%
	Méthodes de caractérisation et d'analyse des matériaux (2)	45h00	1h30		1h30	55h00	2	4	50%	50%
	Advanced Topics in AI and Materials Science	22h30			1h30	27h50	1	2	50%	50%
UE Découverte Code : UED 21 Crédits : 2 Coefficient : 2	Choisir une matière : 1/ Nano matériaux 2/ Energies renouvelables 3/ Autre matière du domaine des matériaux.	45h00	1h30	1h30		5h00	2	2	33%	67%
UE Transversale Code : UET 21 Crédits : 1 Coefficient : 1	Entrepreneuriat, Innovation et Startup	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
Total Semestre 3		375h00	13h00	7h30	4h30	375h00	17	30		

Programme détaillé par matière

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Physique

Spécialité : Master Physique des Matériaux

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

Semestre 1

Unité Fondamentale

Matière : Physique du Solide approfondie

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de l'enseignement de physique du solide approfondie est de donner une compréhension solide des théories quantiques avancées des solides (bandes, phonons), permettant d'expliquer les propriétés des matériaux (Elastiques, électroniques, mécanique) via des outils théoriques. Il explore des phénomènes avancés (supraconductivité, nanostructures...) et vise à développer un esprit critique et une base pour la recherche.

Connaissances préalables recommandées :

Il est recommandé d'avoir de bonnes bases en :

- Physique générale (mécanique, électricité/magnétisme, thermodynamique, optique).
- Mécanique quantique (équation de Schrödinger, fonctions d'onde, opérateurs, systèmes à plusieurs particules).
- Physique statistique (ensembles statistiques, fonction de partition, statistiques de Fermi-Dirac et Bose-Einstein).
- Introduction à la physique du solide (structure cristalline, réseau réciproque, phonons, modèle des électrons libres).
- Mathématiques (calcul différentiel/intégral, algèbre linéaire, équations différentielles, analyse de Fourier).

Contenu de la matière :

Chapitre I : Symétrie cristalline

- Eléments de symétrie
- Théorie des groupes
- Réseaux de Bravais
- Etude de quelques structures simples et composées
- Tenseurs physiques.

Chapitre II : Vibrations du réseau

- Modes de vibrations dans les cristaux
- Phonons et chaleur spécifique
- Interaction électron-phonons.

Chapitre III : Structure et propriétés électroniques des solides

- Structure de bandes : Approximation de Hartree-Fock
- Calcul de bandes d'énergie

Chapitre IV : Propriétés mécaniques-élasticité des solides

- Définitions: déformation élastique sous l'effet d'une contrainte mécanique,
- la loi de Hooke:
 - ❖ -Tenseur de déformation
 - ❖ -Tenseur de contraintes
 - ❖ -Tenseur d'élasticité
- Cas d'un milieu isotrope et d'un milieu cristallin
- Propagations ondes élastiques de déformations dans les milieux denses.

Références :

1. Solid State Physics par Neil W. Ashcroft et N. David Mermin - 1976
2. Introduction to Solid State Physics par Charles Kittel - 1953 (la 8ème édition date de 2005, et la 9ème de 2018)
3. Advanced Solid State Physics par Philip Phillips - 2012 (2ème édition)
4. Solid State Theory par Walter A. Harrison - 1980
5. Quantum Theory of Solids par Charles Kittel - 1963 (la 2ème édition révisée date de 1991)
6. Many-Particle Physics par Gerald D. Mahan - La première édition date de 1990.
7. Principles of the Theory of Solids par J. M. Ziman - 1964 (la 2ème édition date de 1972)
8. Modern Condensed Matter Physics par Steven M. Girvin et Kun Yang (2019)

Semestre 1

Unité Fondamentale

Matière : Matériaux Diélectriques et magnétiques

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de ce cours est de donner aux étudiants des notions sur la réaction de la matière à une excitation électrique ou magnétique. Le contenu fondamental de ce cours tient au fait que cette réaction est complètement liée à la structure électronique de la matière. Les étudiants pourront ensuite relier ces fondements de la physique à quelques applications concrètes et intéressantes.

Connaissances préalables recommandées :

Enseignements de la licence: Outils mathématiques de base, notion d'électricité et de magnétisme, de thermodynamique, et de physique du solide

Contenu de la matière :

I/ Les matériaux diélectriques

- 1. Rappels et Définitions :** Equations de Maxwell dans un milieu matériel, Définitions et propriétés des matériaux diélectriques
- 2. Aspect macroscopique :** Potentiel et champ électrique, Polarisation et champ dépolarisant. Énergie électrostatique.
- 3. Aspect microscopique :** Champ électrique effectif local. Polarisabilité. Mécanismes de polarisation dans les diélectriques : Polarisabilité électronique. Polarisabilité ionique. Polarisabilité orientationnelle. Relation de Clausius Mossotti.
- 4. Théorie de Langevin :** Modèle statistique de la polarisation d'orientation. Fonction de Langevin et dépendance en température. Transition vers la théorie de Debye.
- 5. Diélectrique placé dans un champ électrique variable :** Phénomène des pertes diélectriques. Théorie de Debye : relaxation des dipôles. Cas d'une distribution des temps de relaxation. Modèles empiriques de la distribution des temps de relaxation (Cole-Cole, Davidson-Cole, Havriliak-Negami). Résonance diélectrique (modèle de Lorentz).
- 6. Quelques comportements particuliers des diélectriques et applications :** Ferroélectricité et pyroélectricité. Electrostriction et piézoélectricité. Applications technologiques.

II/ Matériaux magnétiques

- 1. Rappels et définitions**
- 2. Diamagnétisme**
- 3. Paramagnétisme**

- -Ions terres rares, règle de Hund, ions du groupe du fer, décomposition due au champ cristallin, blocage du moment cinétique orbital, Paramagnétisme nucléaire.
- -Susceptibilité paramagnétique des électrons de conduction
- -Refroidissement par désaimantation adiabatique d'un sel magnétique.

- 4. Ferromagnétisme**

Propriétés des matériaux ferromagnétiques élémentaires, origine du ferromagnétisme, dépendance en température de l'aimantation, relation entre énergie d'échange et température de Curie, cycle d'hystérésis et domaines ferromagnétiques, applications

- 5. Antiferromagnétisme et ferrimagnétisme**

Définition, Effet de la température sur la susceptibilité magnétique

- 6. Applications**

Diffraction de neutrons par les corps magnétiques, Conductivité dans un champ magnétique externe

Références :

1. C. KITTEL: physique de l'état solide. Dunod Université Bordas (1983).
2. M. BROUSSEAU : Physique du solide – Propriétés électroniques, Masson (1992).
3. WERT AND THOMSON: Physics of solids International student edition.
4. W. ASHCROFT AND N.D. MERMIN: Solid state physics, W.B. Saunders Company, Philadelphie, 1976.
5. S. WANG: Solid state Electronics, Mc Graw-Hill Book Company, 1966.
6. M. GAUDAIRE: Propriétés de la matière, Dunod (1968).

Semestre 1

Unité Fondamentale

Matière : Physique des Semi-conducteurs

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif principal est de donner aux étudiants une compréhension approfondie des semi-conducteurs et leurs propriétés fondamentales : Mécanismes physiques, structure de bandes, dopage et transport des charges.

Connaissances préalables recommandées :

- Physique générale (électricité/magnétisme, thermodynamique, ondes).
- Mécanique quantique (équation de Schrödinger, quantification, spin, structure atomique).
- Introduction à la physique du solide (structure cristalline, réseau réciproque, théorie des bandes, phonons).
- Physique statistique (distributions statistiques, statistique de Fermi-Dirac).
- Mathématiques (calcul différentiel/intégral, algèbre linéaire, équations différentielles, séries de Fourier).

Contenu de la matière :

Chapitre I : Structure de bandes

I.1 Structure électronique des éléments

I.2 Structure de bandes des matériaux solides :

Structure et liaison cristallines. Distinction entre métal-semiconducteur-isolant. Modèle de l'électron libre. Modèle de l'électron quasi-libre

I.3 Notion de densité d'états

I.4 Notion de trou et concept de masse effective

I.5 Structure de bandes des principaux semi-conducteurs

Chapitre II : Les semi-conducteurs à l'équilibre thermodynamique

II.1 Schéma de bandes simplifié et densité d'états d'énergie dans les bandes permises

II.2 Les semi-conducteurs intrinsèques :

Fonction de distribution des électrons sur les états permis. Densité des porteurs libres : loi d'action de masse

II.3 Calcul de la densité des porteurs libres et du niveau de Fermi dans les semi-conducteurs extrinsèques :

Description qualitative du dopant. Equation de neutralité. Comportement de la concentration des porteurs libres avec la température

Chapitre III : Propriétés de transport de charge dans un semi-conducteur

III.1 Rappels sur la conduction électrique dans un métal

III.2 Courant d'entraînement dans un semi-conducteur :

Introduction. Conductivité électrique des principaux semi-conducteurs. Comportement de la conductivité électrique d'un semi-conducteur avec la température. Comportement de la conductivité électrique d'un semi-conducteur avec le dopage.

III.3 Courant de diffusion dans un semi-conducteur

III.4 Relation d'Einstein

III.5 Effet Hall dans un semi-conducteur

Chapitre IV : Phénomènes de génération et de recombinaison

IV.1 Introduction

IV.2 Mécanismes de recombinaison : Recombinaison bande à bande (directe). Recombinaison indirecte (assistée).

IV.3 Les processus de recombinaison

IV.5 Modèle de Hall Shockley et Read

IV.6 Équation de continuité et durée de vie des porteurs de charge : Résolution dans le volume et dans l'espace : Régimes permanent et transitoire ; en présence et en l'absence de champ électrique appliqué.

IV.7 Recombinaison de surface

IV.8 Conclusions

Références :

1. Solid State Electronic Devices par Ben G. Streetman et Sanjay Banerjee - 1975 (de nombreuses éditions ont suivi, la 7^{ème} édition date de 2016).
2. Physics of Semiconductor Devices par S.M. Sze et Kwok K. Ng - 1969 (de nombreuses éditions ont suivi, la 4^{ème} édition date de 2021).
3. Semiconductor Physics and Devices par Donald A. Neamen - 1992 (de nombreuses éditions ont suivi, la 5^{ème} édition date de 2012).
4. Fundamentals of Semiconductor Devices par Betty Lise Anderson et Richard L. Anderson - 2005
5. Quantum Mechanics of Semiconductor Materials and Devices par Umesh K. Mishra et Jasprit Singh – 1995.
6. Semiconductor Optoelectronic Devices par Pallab Bhattacharya - 1994 (la 2^{ème} édition date de 1997).
7. High-Speed Semiconductor Devices par S.M. Sze, Yu-Chi Li et Kwok K. Ng – 2002.

Semestre 1

Unité Fondamentale

Matière : Métallurgie physique

Objectifs de l'enseignement :

Ce module a pour objectif de former des étudiants en Master aptes à mener un travail de recherche et de mise au point de matériaux métalliques innovants. Ceci se fera par la maîtrise des connaissances approfondies en métallurgie physique sous ses aspects fondamentaux et appliqués allant de l'élaboration, à la mise en forme, aux traitements thermomécaniques et au contrôle de leur stabilité et évolution.

Connaissances préalables recommandées :

Les connaissances requises se limitent à celles acquises lors du 1^{er} palier, à savoir la licence.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Connaissances de base en sciences des matériaux

- 1.1. Structure cristalline- Structure amorphe- Notions de cristallographie - Les systèmes cristallins - Les réseaux de Bravais.
- 1.2. -Défauts des réseaux cristallins : ponctuels- linéaires (dislocations) - surfaciques - volumiques.
 - Diffusion en volume, diffusion dans les joints de grains
 - Systèmes en équilibre, systèmes hors équilibre

Chapitre 2 : Structure cristalline des métaux et alliages

- 2.1. Métaux purs : Structures cubique centrée (cc), cubique à faces centrées (cfc) et hexagonale compacte (hc).
- 2.2. Alliages métalliques : Solutions solides (substitution, insertion), Composés intermétalliques, Influence des éléments d'alliage sur la structure et les propriétés.

Chapitre 3 : Diagrammes d'équilibre de phases

- 3.1. Introduction aux diagrammes de phases binaires.
- 3.2. Diagrammes avec miscibilité totale et partielle à l'état solide.
- 3.3. Points caractéristiques : eutectique, eutectoïde, péritectique, péritectoïde.
- 3.4. Règle des phases de Gibbs et calculs de proportions de phases.
- 3.5. Lecture et interprétation de diagrammes de phase binaires (Fe-C, Al-Cu...).

Chapitre 4 : Thermodynamique et cinétique des transformations

- 4.1. Notions de thermodynamique : énergie libre, enthalpie, entropie.
- 4.2. Cinétique des transformations de phases : nucléation, croissance, diffusion.
- 4.3. Diagrammes de phases non à l'équilibre et transformations diffusantes/non-diffusantes.

Chapitre 5 : Traitements thermiques et microstructures

- 5.1. Traitements thermiques des aciers: recuit, trempe, revenu.
- 5.2. Diagramme Fer-Carbone : interprétation et applications.
- 5.3. Influence des traitements sur la microstructure et les propriétés mécaniques.

Chapitre 6 : Relations Microstructure-propriétés mécaniques

- 6.1. Microstructure déformation.
- 6.2. Microstructure de transformations de phases.

Références :

1. C. KITTEL: « Physique de l'état solide », Dunod Université, Bordas (1983).
2. J. PHILIBERT, A. VIGNES, Y. BRECHET et P. COMBRADE, « Métallurgie, du minerai au matériau », Ed. Masson (1998).
3. J. Bénard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot : Métallurgie générale, Masson éd., Paris,
4. Dorlot J-M., Bailon J-P., Masounave J. , Des matériaux,
5. M.F. Ashby, D.R.H. Jones, Matériaux 2. Microstructure et mise en œuvre, Dunod Ed., 1991.
6. M.F. Ashby, D.R.H. Jones, Matériaux 1. Propriétés et applications, Paris : Dunod, 1998.
7. Quéré, Yves, Physique des matériaux: cours et problèmes, Paris : Ellipses, 1988,
8. Kurz Wilfried, Zambelli Gérald, Mercier Jean, Introduction à la science des matériaux, Lausanne : PPR., 1987.
9. Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright, The Science and Engineering of Materials, 6e édition, Cengage Learning, 2010.
10. William D. Callister Jr., David G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10^{ème} édition, Wiley, 2018.

Semestre 1

Unité Méthodologie

Matière : Interaction rayonnement-matière et applications

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre les mécanismes fondamentaux d'interaction entre les rayonnements (X, électrons, neutrons, ions) et la matière.
- Maîtriser les techniques expérimentales de caractérisation des matériaux basées sur ces interactions.
- Savoir analyser les effets des rayonnements sur les propriétés structurales, électroniques et mécaniques des matériaux

Connaissances préalables recommandées :

Pour suivre efficacement cette matière, une base solide en mécanique quantique (notamment la dualité onde-corpuscule et l'équation de Schrödinger), en électromagnétisme (équations de Maxwell) et en physique de la matière condensée (structure cristalline, défauts, bandes d'énergie) est recommandée. Des notions de physique nucléaire (interactions particules-matière, sections efficaces) et de mathématiques appliquées (analyse de Fourier pour la diffraction) sont également utiles. Bien que des rappels soient prévus, une familiarité avec ces concepts fondamentaux permettra une meilleure appréhension des techniques de caractérisation (diffraction X, microscopie électronique) et des effets des rayonnements sur les matériaux.

Contenu de la matière :

1. Introduction

- Importance des rayonnements en science des matériaux
- Types de rayonnements utilisés : X, électrons, neutrons, ions
- Notions de base : sections efficaces, atténuation, diffusion

2. Interactions des photons (rayons X & γ) avec la matière

- Effet photoélectrique (applications : XPS, EXAFS)
- Diffusion Compton (spectroscopie Compton pour les électrons de valence)
- Diffusion Rayleigh (élastique) → Diffraction des rayons X (XRD, DRX)
- Absorption des rayons X (spectroscopie XANES, EXAFS)
- **Applications :**
 - ❖ Caractérisation des structures cristallines (XRD)
 - ❖ Analyse chimique (fluorescence X, XPS)
 - ❖ Étude des défauts et contraintes

3. Interactions des électrons avec la matière

- Diffusion élastique (diffraction électronique) → MET (Microscopie Électronique en Transmission)
- Diffusion inélastique (spectroscopie EELS – pertes d'énergie)
- Émission secondaire d'électrons → MEB (Microscopie Électronique à Balayage)
- **Applications :**
 - ❖ Imagerie à haute résolution (MET, MEB)
 - ❖ Analyse chimique locale (EDS, WDS)
 - ❖ Étude des plasmons et états électroniques (EELS)

4. Interactions des neutrons avec la matière

- Diffusion élastique → Diffraction neutronique (étude des structures magnétiques)
- Diffusion inélastique → Spectroscopie pour les excitations vibrationnelles (phonons)
- **Applications :**
 - ❖ Étude des matériaux magnétiques
 - ❖ Cartographie des contraintes résiduelles
 - ❖ Analyse des polymères et matériaux légers (H, Li, etc.)

5. Interactions des ions avec la matière

- Rétrodiffusion Rutherford (RBS) → Profilage de composition
- Spectrométrie des masses d'ions secondaires (SIMS) → Analyse de traces
- Implantation ionique → Modification des propriétés des matériaux
- **Applications :**
 - ❖ Dopage des semi-conducteurs
 - ❖ Revêtements et traitements de surface

Références:

- 1- "Advanced Radiation-Matter Interactions: From Fundamentals to Applications" (Springer, 2023)
2. "Operando X-ray Techniques for Energy Materials" (Wiley, 2024)
3. Ultrafast Electron Microscopy: Imaging Matter in Motion" (Elsevier, 2023)
4. R. Ouahes et B. Devallez, chimie générale, OPU, Alger, 1988
5. Daniel Blanc, les rayonnements ionisants, Masson, Paris, 1990-1997
6. J. Michel Hollas, Spectroscopie, Dunod, Paris, 1998
7. SekkalZohir, atomes et liaisons chimiques, OPU, Alger, 1988
7. Kadi-Hanafi Mouhyddine, Electricité Rayonnement et Radioactivité, OPU, Alger, 1982
8. Alonso-Finn, Physique générale, Champs et Ondes, InterEdition, Paris, 1977
9. Pierre CHEVALIER, Interaction du rayonnement avec la matière, technique de l'ingénieur

Semestre 1

Unité Méthodologie

Matière : Traitement du signal

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de cet enseignement est de permettre à l'étudiant physicien d'acquérir les outils essentiels de traitement du signal. On donne, d'abord, un aperçu sur les méthodes de traitement des signaux analogiques, tels que délivrés par les systèmes de mesure physiques. La conversion de ces signaux en signaux numériques, permet, par la suite, de leur appliquer différentes techniques de traitement que l'on peut facilement implémenter sur micro-ordinateur.

Connaissances préalables recommandées :

Enseignements de la licence: Outils mathématiques de base, notion d'électricité et de magnétisme, de thermodynamique, et de physique du solide

Contenu de la matière :

A. Signaux analogiques

1. Représentation des signaux : Modélisation, Classification
2. Transformation de Fourier (TF): Signaux périodiques, Signaux apériodiques
3. Systèmes de transmission : Propriétés, Convolution, Corrélation
4. Filtrage : Transformée de Laplace, Filtrage temporel, Filtrage fréquentiel
5. Modulation : Modulation d'amplitude, de fréquence et de phase
6. Bruit : Sources, Types, Rapport signal sur bruit, Détection d'un signal noyé dans le bruit
7. Déconvolution

B. Signaux numériques

1. Numérisation des signaux : Echantillonnage, Quantification, Compression, Expansion, Restitution
2. Transformée de Fourier Discrète, Transformée de Fourier Rapide
3. Filtrage Numérique : Transformée en z, Synthèse de filtres numériques

Références :

1. J. Max: Méthodes et techniques du traitement du signal et applications aux mesures physiques. Masson, Paris, 1992.
2. M. Kunt: Traitement numérique des signaux. Traité d'électricité, Vol. XX, Presses Polytechniques Romandes, 1989.
3. B. Picinbono: Théories des signaux et des systèmes. Dunod, Paris, 1989.
4. F. Cottet: Traitement des signaux et acquisition des données. Dunod, Paris, 1997.
5. A. Ouahabi: Traitement du signal, Théorie du signal. O.P.U., Alger, 1987.
6. R. Bekka: Fondements du traitement du signal, Théorie du signal. O.P.U., Alger, 1998.
7. A. Guerchaoui: Traitement du signal: Théorie et Applications. O.P.U., Alger, 2008

Semestre 1

Intitulé de l'unité : Méthodologie

Intitulé de la matière : Exploration de logiciels libres et open source en Physique des matériaux

Objectifs de l'enseignement :

- Initier les étudiants à l'utilisation de logiciels libres et open source adaptés à la simulation, la modélisation et l'analyse des matériaux.
- Comprendre le rôle des outils numériques dans l'étude structurale, thermique, mécanique et spectroscopique des matériaux.
- Développer des compétences pratiques en visualisation, manipulation de structures, calculs ab initio et dynamique moléculaire.

Connaissances préalables recommandées :

Connaissances de base en structure de la matière, physique quantique et thermodynamique des matériaux

Familiarité souhaitée avec un environnement de type Linux ou Python

Programme pédagogique :

Chapitre I. Introduction aux logiciels open source en science des matériaux

- Philosophie open source, licences logicielles (GNU, MIT, BSD)
- Présentation générale des outils numériques libres en modélisation moléculaire et simulation de matériaux
- Environnement de travail recommandé : Ubuntu/Linux, gestion des packages

Chapitre II. Visualisation et manipulation de structures cristallines

- Introduction à VESTA, Avogadro, ASE (Atomic Simulation Environment)
- Construction de cellules cristallines, visualisation de défauts, supercellules
- Représentation de polymères et structures amorphes

Chapitre III. Méthodes de calcul ab initio (DFT)

- Principes de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)
- Introduction à Quantum ESPRESSO et ABINIT : fichiers d'entrée, paramètres, convergence
- Calculs SCF, relaxations, structure électronique

Chapitre IV. Dynamique moléculaire

- Présentation de LAMMPS
- Simulation de l'évolution thermique d'un cristal ou polymère
- Thermostats, barostats, champs de force : Lennard-Jones, EAM, OPLS

Chapitre V. Analyse de propriétés physiques des matériaux

- Calculs de propriétés mécaniques (module d'élasticité), thermiques (conductivité, Tg estimée)
- Corrélations structure-propriétés : visualisation des trajectoires (VMD, OVITO)

Chapitre VI. Spectroscopie numérique

- Introduction à ORCA pour la simulation de spectres IR, Raman, UV-Vis
- Simulation de petites molécules, clusters ou monomères
- Comparaison avec les spectres expérimentaux

Chapitre VII. Diffraction des rayons X et affinement cristallographique

- Logiciels : GSAS-II, FullProf

- Indexation des pics, affinement de paramètres de maille, taille des cristallites

Chapitre VIII. Analyse et traitement de données scientifiques

- Utilisation de Python (numpy, matplotlib, pandas) pour analyser des données de simulation
- Représentation de spectres, calculs de densité de probabilité, histogrammes
- Introduction au scripting pour automatiser les traitements

Chapitre IX. Mini-projet de simulation ou de traitement numérique

- Application individuelle ou en binôme sur un cas concret : structure, spectre ou propriété d'un matériau
- Rapport de synthèse et présentation des résultats

Références complémentaires recommandées :

Giannozzi P. et al., "Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO", J. Phys. Condens. Matter, 2017.

Frenkel D., Smit B., "Understanding Molecular Simulation", Academic Press, 2002.

Leach A.R., "Molecular Modelling: Principles and Applications", Pearson, 2001.

Documentation officielle : <https://www.quantum-espresso.org>, <https://www.lammps.org>,
<https://orcaforum.cec.mpg.de>

Materials Project : <https://materialsproject.org> – base de données et ressources éducatives

Semestre 1

Unité Découverte

Matière : 1/ Introduction aux ondes élastiques,
2/ Production et stockage de l'hydrogène
3/ Autre matière du domaine des matériaux

1/ Introduction aux ondes élastiques

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de ce cours est de permettre à l'étudiant d'analyser les différents modes de propagation des ondes élastiques dans les matériaux fluides et solides. L'établissement de l'équation de propagation et sa résolution se limite au cas des fluides parfaits (non dissipatifs). Par la suite, le cas de solides élastiques est considéré. Dans cette première partie, on se contente de l'étude de la propagation dans les milieux illimités. Celle des ondes guidées (dans les milieux limités) sera traitée dans la deuxième partie.

Connaissances préalables recommandées :

Enseignements de la licence: Notions de physique du solide (Cristallographie, Propriétés mécaniques, électriques, optiques de la matière), Notions de mathématiques (Tenseurs).

Contenu de la matière :

1) Rappel des équations générales de l'acoustique:

1. Propagation d'une onde mécanique : Onde longitudinale, Onde transversale
2. Equations de conservation (matière, quantité de mouvement et énergie)

2) Propagation des ondes acoustiques dans les fluides parfaits (non dissipatifs) (9h) :

1. Propagation des ondes planes
2. Propagation des ondes sphériques divergentes
3. Intégrale de rayonnement de Rayleigh

3) Propagation et génération d'ondes acoustiques dans un solide isotrope (10h30):

1. Fondamentaux de la mécanique des milieux continus et de la théorie de l'élasticité.
2. Problèmes dépendant du temps ou problèmes dynamiques
Exemples simples de problèmes dynamiques. Cas particulier du problème plan (Contraintes planes, déformations planes)

Références :

1. P. Filippi, D. Habault, J.P. Lefebvre and A. Bergassoli: Acoustics : Basic physics, Theory and Methods. Academic Press, London, 1999.
2. M. Bruneau : Manuel d'acoustique fondamentale. Hermes, Paris, 1998.
3. L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens and J.V. Sanders : Fundamentals of Acoustics. J. Wiley, New York, 2000.
4. D. Royer et E. Dieulesaint : Ondes élastiques dans les solides. Tomes 1 et 2. Masson, Paris 1996.

2/ Production et stockage de l'hydrogène

Objectifs de l'enseignement :

Initier les étudiants aux principes fondamentaux liés à la production et au stockage de l'hydrogène. Leur permettre de comprendre les enjeux techniques, environnementaux et économiques de cette filière émergente dans le contexte de la transition énergétique, sans entrer dans les détails complexes des procédés.

Connaissances préalables recommandées :

Notions générales de chimie, de physique, et sensibilisation aux problématiques énergétiques et environnementales.

Contenu de la matière :

- I. Introduction à l'hydrogène énergie
 - Qu'est-ce que l'hydrogène ?

- Intérêt comme vecteur énergétique
 - Enjeux liés au développement de l'hydrogène dans un mix bas carbone
- II. Principales voies de production de l'hydrogène
- Aperçu des méthodes : électrolyse de l'eau, vaporeformage du gaz naturel, biomasse
 - Différences entre hydrogène gris, bleu, vert
 - Premiers éléments de comparaison des impacts environnementaux
- III. Modes de stockage de l'hydrogène
- Stockage sous pression, liquide et matériaux solides
 - Contraintes associées (sécurité, volume, énergie)
 - Exemples d'applications concrètes
- IV. Usages et perspectives
- Exemples d'applications actuelles : transport, industrie, énergie
 - Place de l'hydrogène dans la transition énergétique
 - Défis à relever : infrastructure, coûts, acceptabilité

Références:

1. IEA, The Future of Hydrogen – Seizing today's opportunities, International Energy Agency, 2019.
2. ADEME, Hydrogène bas carbone et renouvelable – Enjeux et perspectives, 2021.
3. Staffell, I., et al., The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, Energy & Environmental Science, 2019.
4. Züttel, A., Hydrogen storage methods, Naturwissenschaften, 2004.
5. Bossel, U., Does a Hydrogen Economy Make Sense?, Proceedings of the IEEE, 2006.
6. Ministère de la Transition Écologique, Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné, 2020.

Semestre 1

Unité Découverte

Matière : Intelligence artificielle et Machine Learning 1

Objectifs du cours :

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

Contenu du cours :

- Chapitre 1 : Introduction à l'IA et à l'apprentissage automatique
 - Aperçu de l'IA et de ses applications.
 - Importance des données dans l'IA et l'apprentissage automatique.
- Chapitre 2 : Concepts de base de l'apprentissage automatique
 - Apprentissage supervisé ou non supervisé.
 - Algorithmes clés de l'apprentissage automatique : régression, classification, regroupement.
 - Mesures d'évaluation (MAE, R^2 , précision).
- Chapitre 3 : Collecte et traitement des données
 - Ingénierie des caractéristiques et techniques de prétraitement des données.
 - Traitement de l'ajustement excessif et de l'ajustement insuffisant.
 - Bases de données sur les matériaux : Materials Project, OQMD, AFLOW.
- Chapitre 4 : Apprentissage automatique (Machine Learning) pratique en sciences de la matière
 - Étude de cas : Prédiction des propriétés des matériaux (bande interdite, etc.).
 - Utilisation de modèles d'apprentissage automatique pour des tâches simples de classification et de régression.
- Chapitre 5 : Fondements de l'apprentissage profond
 - Introduction aux réseaux neuronaux.
 - Principaux cadres d'apprentissage profond : TensorFlow, Keras, PyTorch.
 - Application : Prédiction de la structure cristalline à l'aide de réseaux neuronaux.

Bibliographie :

- *"Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow"* by Aurélien Géron (focuses on practical applications of machine learning)
- *"Pattern Recognition and Machine Learning"* by Christopher M. Bishop (provides theoretical foundations of ML)

Outils et bibliothèques :

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

Semestre 2

Semestre 2

Unité Fondamentale

Matière : Propriétés des matériaux

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre l'origine des propriétés physiques des matériaux à partir de leur structure atomique et électronique.
- Établir le lien entre la microstructure et les propriétés macroscopiques des matériaux.
- Maîtriser les méthodes de caractérisation des différentes propriétés.
- Développer une capacité à sélectionner ou concevoir des matériaux en fonction d'un cahier des charges fonctionnel.

Connaissances préalables recommandées :

Il est utile d'avoir une compréhension des principes fondamentaux de la physique, ainsi qu'une première approche des concepts de la physique du solide, soutenue par des compétences mathématiques de base.

Contenu de la matière :

1. Classification et Structure des Matériaux

1.1 Classification (Métaux, céramiques, polymères, composites, matériaux fonctionnels)

1.2 Structure des Matériaux

- Rappels de cristallographie et microstructure
- Réseau cristallin
- Défauts
- Dislocations
- joints

2. Propriétés Mécaniques

2.1 Contraintes, déformations, loi de Hooke, module d'Young, comportement élastique vs plastique

2.2 Résistance, ténacité, dureté, Diagrammes contrainte-déformation, Déformation plastique, glissement durcissement

3. Propriétés électriques

3.1 Conducteurs, semi-conducteurs, isolants – Théorie de bandes

3.2 Résistivité, effets de la température, dopage

4. Propriétés magnétiques

4.1 Types de magnétisme

4.2 Matériaux ferromagnétiques,

4.3 Matériaux magnétiques mous et durs

5. Propriétés thermiques

5.1 Capacité calorifique, dilatation thermique, conductivité thermique

5.2 Transfert de chaleur entre les matériaux

6. Propriétés optiques

6.1 Réflexion, transmission, absorption, indice de réfraction

6.2 Matériaux optiquement actifs

Références:

1. Materials Science and Engineering: An Introduction par William D. Callister Jr. et David G. Rethwisch - 1985 (de nombreuses éditions ont suivi, la 10ème édition date de 2018)
2. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach par William D. Callister Jr. et David G. Rethwisch - 2001 (de nombreuses éditions ont suivi, la 6ème édition date de 2023) - Note : Bien que partageant un auteur, ce livre a une approche légèrement différente et est souvent utilisé comme une alternative.

3. Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design par Michael F. Ashby et David R. H. Jones - 1986 (de nombreuses éditions ont suivi, la 4ème édition date de 2012)
4. Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design par Michael F. Ashby et David R. H. Jones - 1991 (de nombreuses éditions ont suivi, la 4ème édition date de 2013) - Note : Ces deux volumes d'Ashby et Jones sont souvent utilisés ensemble pour une couverture complète.
5. The Science and Design of Engineering Materials par James F. Shackelford - 1985 (de nombreuses éditions ont suivi, la 7ème édition date de 2018)
6. Materials: Engineering, Science, Processing and Design par Michael F. Ashby, Hugh Shercliff et David Cebon - 2007 (de nombreuses éditions ont suivi, la 5ème édition date de 2021) - Note : Une version plus récente et étendue des travaux d'Ashby.
7. Properties of Engineering Materials par Raymond A. Higgins et Robert P. Pethrick - 1967 (de nombreuses éditions ont suivi, la 3ème édition date de 1998) - Note : Bien qu'un peu plus ancien, il reste une référence classique pour une approche axée sur les propriétés.

Semestre 2

Unité Fondamentale

Matière : Dispositifs à semi-conducteurs

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de l'enseignement des dispositifs à semi-conducteurs est de donner une compréhension approfondie du fonctionnement des composants électroniques basés sur les semi-conducteurs (diodes, transistors, etc.). Les étudiants apprendront leurs principes physiques, à analyser leur comportement, à concevoir des circuits simples et à comprendre leurs applications et limitations. Le but est de former des personnes capables de travailler avec ces composants essentiels de l'électronique moderne et de se préparer à des études plus avancées.

Connaissances préalables recommandées :

Pour étudier les dispositifs à semi-conducteurs, il est conseillé d'avoir des bases solides en :

- Électricité et magnétisme (circuits, lois de Kirchhoff, condensateurs, inducteurs, champs).
- Introduction à la physique du solide (structure cristalline, théorie des bandes, porteurs de charge, dopage).
- Introduction à la mécanique quantique (dualité onde-particule, fonction d'onde, niveaux d'énergie).
- Mathématiques (calcul différentiel/intégral, algèbre linéaire, équations différentielles).

Contenu de la matière :

Chapitre I : Rappels sur la physique des semi-conducteurs

I.1 Structure de bandes

I.2 Concentration des porteurs et propriétés de transports

Chapitre II : Diodes à jonction

II.1 La diode PN : Principe de fonctionnement et réalisation technologique d'une diode PN. Calcul du courant : caractéristique statique I-V. Capacité de transition et de diffusion. Phénomènes transitoires dans une diode PN : circuit équivalent.

II.2 La diode tunnel

II.3 La diode Schottky :

Calcul du courant et caractéristique I-V. Comparaison avec la diode PN. Contact ohmique

II.4 Hétérojonctions

Chapitre III : Structure MIS et capacité MOS

III.1 Structure métal/isolant/semi-conducteur idéale :

Description. Diagramme de bandes d'énergie et régimes de fonctionnement. Champ et potentiel électriques d'une structure MIS en régime de déplétion ou de faible inversion. Calcul du champ électrique, du potentiel de surface et de la charge de la structure MIS dans le cas général.

III.2 Structure métal/oxyde/semi-conducteur réelle :

Diagramme d'énergie. Tension de bandes plates. Tension de seuil.

III.3 Capacité MOS : Caractéristique C-V hautes et basses fréquences – cas idéal. Cas réel : effets des travaux de sortie et de la charge d'oxyde.

Chapitre IV : Transistors

IV.1 Effet transistor

IV.2 Transistors bipolaires

IV.3 Transistor à effet de champ à jonction : JFET et MESFET

IV.4 Le transistor à effet de champ à grille isolée : MOSFET

Chapitre V : Circuits Intégrés

V.1 Principes de réalisation des circuits intégrés

V.2 Métallisation

V.3 Procédés de masquage et de photogravure. Attaque chimique et gravure sèche

V.4 Procédés nMOS, CMOS

Références:

1. Solid State Electronic Devices par Ben G. Streetman et Sanjay Banerjee - 1975 (de nombreuses éditions ont suivi),

- la 7ème édition date de 2016).
2. Physics of Semiconductor Devices par S.M. Sze et Kwok K. Ng - 1969 (de nombreuses éditions ont suivi, la 4ème édition date de 2021).
 3. Semiconductor Physics and Devices par Donald A. Neamen - 1992 (de nombreuses éditions ont suivi, la 5ème édition date de 2012).
 4. Fundamentals of Semiconductor Devices par Betty Lise Anderson et Richard L. Anderson - 2005
 5. Quantum Mechanics of Semiconductor Materials and Devices par Umesh K. Mishra et Jasprit Singh – 1995.
 6. Semiconductor Optoelectronic Devices par Pallab Bhattacharya - 1994 (la 2ème édition date de 1997).
 7. High-Speed Semiconductor Devices par S.M. Sze, Yu-Chi Li et Kwok K. Ng – 2002.
 8. The PN Junction Diode par Gerold W. Neudeck et Robert F. Pierret - 1983 (Part of the Modular Series on Solid State Devices) - Note : Bien que se concentrant sur un dispositif spécifique, il offre une analyse approfondie et est souvent utilisé comme référence.

Semestre 2

Unité Fondamentale

Matière : : Matériaux Polymères et céramiques

Objectifs de l'enseignement :

Cet enseignement vise à fournir aux étudiants une compréhension approfondie des matériaux polymères et céramiques, en mettant l'accent sur la relation entre leur structure, leurs propriétés et leurs applications.. L'objectif est de développer la capacité des étudiants à sélectionner et à utiliser ces matériaux de manière optimale dans divers.

Connaissances préalables recommandées :

Les étudiants doivent posséder des connaissances de base en chimie générale et minérale, en physique des matériaux, ainsi qu'une compréhension des structures cristallines.

Contenu de la matière :

A- Partie I : Matériaux polymères

- 1- Généralités et définitions : Définitions, Classification des polymères, Intérêt des polymères dans les matériaux modernes. Applications industrielles et recyclage
- 2- Structure des polymères : chimique et enchaînements : Structure des chaînes polymères, Tacticité, isomérisation (configurations syndiotactique, isotactique, atactique), Conformations des chaînes. Structure physique des polymères : amorphe, cristallin, modèles liés à la cristallinité des polymères..)
- 3- Transitions de phases dans les polymères
- 4- Mélanges de polymères (miscibilité et compatibilité), Modèle de Flory-Huggins
- 5- Corrélation structure- propriétés des polymères
- 6- Méthodes d'analyse et de caractérisation des polymères
- 7- Applications avancées des polymères : Polymères conducteurs et semi-conducteurs, Polymères biodégradables et biosourcés, recyclage et de la durabilité

B- Partie II : Matériaux céramiques

- 1- Généralités et structure cristalline : Définitions et classification Structures cristallines types (pérovskites, spinelles...) Défauts cristallins et microstructure (grains, porosité) et corrélation défauts-propriétés et microstructure -propriétés
- 2- Transitions de phase dans les céramiques Transitions solide–solide (structurales), Transitions martensitiques, Transitions ferroélectriques Transitions liées au frittage
- 3- Caractérisation et applications : Techniques d'analyse et de caractérisation des céramiques. Propriétés mécaniques, thermiques et électriques des céramiques. Application des céramiques (biomédical, Energie, optique..).

Références :

- 1- Chimie et Physico-Chimie des Polymères, , M. Fontanille et Y. Gnanou, Ed. Dunod ,2002.
- 2- 2-Polymérisation :Principes et applications ,G.Odian, 4ème édition, ,Polytechnica,2004
- 3- De la macromolécule au matériau polymère, Jean Louis Halary et François Lauprêtre, Belin,2006 5- Introduction à la physique des polymères,Serge Etienne, Laurent David,2^{ème} Edition, Dunod,2012

Semestre 2

Unité Fondamentale

Matière : Métaux et alliages métalliques.

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre la relation entre la microstructure, les traitements thermomécaniques et les propriétés des alliages métalliques.
- Maîtriser les traitements thermiques et mécaniques classiques et récents.
- Explorer les alliages innovants (alliages à haute entropie, alliages légers, superalliages, etc.).
- S'initier aux techniques modernes de caractérisation et de mise en forme.
- Développer l'esprit critique vis-à-vis des performances des matériaux en conditions réelles.

Connaissances préalables recommandées :

Maîtrise des principales notions de la Métallurgie Physique.

Contenu de la matière :

1 Introduction générale

- Classification des alliages, principes de solidification, diagrammes de phase, énergies d'interaction.
- Lecture et interprétation de diagrammes de phase binaires (Fe-C, Al-Cu...).

2 Alliages ferreux – aciers et fontes

- Aciers (inoxidables, faiblement alliés, HSS), fontes (graphite, ductile, nodulaire).
- Étude de cas d'aciers traités (ex : aciers pour l'automobile ou la mécanique).

3 Alliages légers (Al, Ti, Mg)

- Propriétés, domaines d'application, difficultés de mise en forme.
- Étude comparative Al-Cu, Ti-6Al-4V, et Mg-Al-Zn.

4 Alliages à haute entropie (HEAs)

- Concepts, propriétés uniques, mécanismes de durcissement, stabilité thermodynamique.
- Interprétation de diagrammes de phases multi-composants, simulations thermodynamiques (ThermoCalc).

5 Traitements mécaniques et thermomécaniques

- Laminage, forgeage, écrouissage, recristallisation.
- Analyse de cas : texturation et contrôle de grains.

6 Traitements de surface (avancés)

- Cémentation, nitruration, projection thermique, laser cladding.
- Analyse microstructurale post-traitement (études de micrographies).

7 Durabilité, fatigue et tenue à haute température

- Mécanismes d'endommagement, fluage, fatigue thermique.
- Lecture de courbes Wöhler, étude d'un composant soumis à haute température.

Références :

1. C. KITTEL: « Physique de l'état solide », Dunod Université, Bordas (1983)
2. J. PHILIBERT, A. VIGNES, Y. BRECHET et P. COMBRADE, « Métallurgie, du minerai au matériau », Ed. Masson (1998).
3. J. Bénard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot : Métallurgie générale, Masson éd., Paris,
4. Dorlot J-M., Bailon J-P., Masounave J. , Des matériaux,
5. M.F. Ashby, D.R.H. Jones, Matériaux 2. Microstructure et mise en œuvre, Dunod Ed., 1991.
6. M.F. Ashby, D.R.H. Jones, Matériaux 1. Propriétés et applications, Paris : Dunod, 1998.
7. Quéré, Yves, Physique des matériaux: cours et problèmes, Paris : Ellipses, 1988,
8. Kurz Wilfried, Zambelli Gérald, Mercier Jean, Introduction à la science des matériaux, Lausanne : PPR., 1987.
9. Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright, The Science and Engineering of Materials, 6e édition, Cengage Learning, 2010.
10. William D. Callister Jr., David G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10^{ème} édition, Wiley, 2018.

Semestre 2

Unité Méthodologie

Matière : Méthodes de caractérisation et d'analyse des matériaux (1)

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de ce cours est de permettre aux étudiants d'acquérir les connaissances de base nécessaires à l'application des techniques de caractérisation microscopiques et thermiques.

Connaissances préalables recommandées :

Notions générales sur les matériaux et les transitions de phase dans les polymères.

Contenu de la matière :

A- Méthodes spectroscopiques

1. Spectroscopie d'absorption UV-Visible

- 1.1 Introduction
- 1.2 Loi de Beer-Lambert
- 1.3 Spectrophotomètre UV-visible : principe de fonctionnement
- 1.4 Analyse qualitative et quantitative des spectres d'absorption

2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

- 2.1 Introduction
- 2.2 Spectrométrie infrarouge (IR)
- 2.3 Interféromètre de Michelson
- 2.4 Spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)
- 2.5 Spectromètre à réflectance totale atténuée (ATR)
- 2.6 Analyse des spectres infrarouge

3. Spectroscopie Raman

- 3.1 Introduction
- 3.2 Théorie classique de la diffusion Raman
- 3.3 Théorie quantique de la spectroscopie Raman
- 3.4 Spectrophotomètre Raman
- 3.5 Spectre Raman
- 3.6 Applications

B- Méthodes thermiques

1. Analyses enthalpique et thermique différentielles

- 1.1 Principe
- 1.2 Dispositifs expérimentaux
- 1.3 Différence entre la DSC et l'ATD
- 1.4 Exploitation de thermogramme de DSC/ ATD

2. Analyse thermogravimétrique

- 2.1 Principe
- 2.2 Dispositif expérimental
- 2.3 Exploitation d'un thermogramme d'ATG.

Travaux pratiques:

TP1 : Analyse de quelques matériaux de natures différentes par Spectrophotométrie UV-visible

TP2 : Analyse infrarouge de quelques molécules organiques et identification des bandes de vibration.

TP3 : Identification de phases ou de composés chimiques par spectroscopie Raman

TP4 : Etude des phases cristalline et amorphe d'un polymère par DSC

TP5 : Etude de la cinétique de cristallisation d'un matériau par DSC

TP6 : Etude de la miscibilité d'un mélange de polymères par DSC

TP7 : Etude de la dégradation d'un mélange de polymères (bi-phasique) par ATG

Références :

1. Principles of Instrumental Analysis par Douglas A. Skoog, F. James Holler et Stanley R. Crouch - 1971 (la 7ème édition date de 2017) - Fournit une base solide et étendue sur diverses techniques spectroscopiques, y compris les aspects théoriques et instrumentaux.
2. Modern Spectroscopy par J. Michael Hollas - 1982 (la 5ème édition date de 2010) - Un traitement plus approfondi des principes de la spectroscopie moléculaire, essentiel pour comprendre l'interaction lumière-matière et l'interprétation des spectres.
3. Solid State Spectroscopy par Hans Kuzmany - 1998 (la 6ème édition date de 2009) - Spécifiquement axé sur l'application des techniques spectroscopiques à l'étude des matériaux solides, incluant la spectroscopie Raman, infrarouge, optique et de photoémission.
4. X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials par Harold P. Klug et Leroy E. Alexander - 1954 (la 2ème édition date de 1974) - Bien qu'un peu ancien, il reste une référence classique pour une compréhension détaillée de la diffraction des rayons X appliquée aux matériaux.
5. Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science par Bernhard Wunderlich - 1990 - Bien que se concentrant sur les polymères, les principes fondamentaux de l'analyse thermique y sont traités en profondeur et sont applicables à d'autres types de matériaux.
6. Principles of Thermal Analysis and Calorimetry par P.J. Haines - 1995 (la 2ème édition date de 2002) - Offre une couverture détaillée des aspects théoriques et pratiques des différentes techniques d'analyse thermique et de calorimétrie.
7. Characterization of Materials par Elton N. Kaufmann - 2003 - Fournit une perspective plus avancée sur diverses techniques de caractérisation, y compris les méthodes spectroscopiques et thermiques, en mettant l'accent sur les principes physiques sous-jacents.
8. Surface Analysis: The Principal Techniques par John C. Vickerman et Ian S. Gilmore - 1997 (la 2ème édition date de 2009) - Bien que se concentrant sur l'analyse de surface, il aborde des techniques spectroscopiques importantes comme XPS et AES, cruciales pour la caractérisation des matériaux à un niveau avancé.

Semestre 2

Unité Méthodologie

Matière : Intelligence artificielle et Machine Learning 2

Course Objectives:

Build on basic ML techniques to introduce deep learning, neural networks, and advanced ML concepts for materials science applications.

Course Content:

1. Objectifs du cours :

S'appuyer sur les techniques de base de l'apprentissage automatique (Machine Learning) pour introduire l'apprentissage profond, les réseaux neuronaux et les concepts avancés d'apprentissage automatique pour les applications en sciences de la matière. Les étudiants approfondiront leur compréhension de la découverte et de la conception de matériaux basées sur l'IA.

Contenu du cours :

- Chapitre 1 : Modèles basés sur les graphes dans les sciences de la matière
 - Les matériaux sont des graphes : atomes = nœuds, liaisons = arêtes.
 - Réseaux convolutionnels de graphes de cristaux (CGCNN).
 - Étude de cas : Prédiction des énergies de formation.
- Chapitre 2 : Modèles génératifs pour la conception de matériaux
 - Introduction aux réseaux adversariels génératifs (GAN) et aux auto-encodeurs variationnels (VAE).
 - Application : Conception de nouveaux matériaux et molécules.
- Chapitre 3 : Évaluation des modèles et interprétabilité
 - Techniques d'évaluation des modèles d'apprentissage profond : validation croisée, surajustement.
 - Interprétation des modèles avec SHAP et LIME.
- Chapitre 4 : Techniques avancées de ML
 - Modèles d'ensemble (Random Forests, XGBoost, LightGBM).
 - Modèles avancés de régression et de classification.
 - Réduction de la dimensionnalité : ACP, t-SNE, UMAP.
- Chapitre 5 : Applications avancées en sciences de la matière
 - Conception inverse pour la découverte de matériaux à l'aide de l'IA.
 - Prédiction des propriétés des matériaux (modules élastiques, supraconductivité, etc.).
 - Modélisation multi-échelle : combinaison de l'IA avec la dynamique moléculaire ou la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT).
- Chapitre 6 : Mini-Projet de spécialisation (Capstone Project)

Les étudiants réaliseront un projet dans lequel ils appliqueront l'IA/ML pour résoudre un problème en sciences de la matière, en utilisant les compétences acquises tout au long du semestre.

Outils et bibliothèques :

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

Bibliographie :

- *"Deep Learning" by Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville (a comprehensive introduction to deep learning)*
- *"Deep Learning with Python" by François Chollet (applies Keras for hands-on deep learning projects)*
- *"Machine Learning for Materials Science" by Jha et al. (directly relates to AI in materials science)*
- *"Data Science for Materials Discovery" by K. A. Persson, et al. (focused on machine learning applications in materials science)*
- *"Materials Informatics: Methods, Tools, and Applications" by Rajiv S. Mishra (further extends ML into material discovery)*

Semestre 2

Unité Méthodologie

Matière : Capteurs et instrumentation

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif est la connaissance des principes de base des capteurs. On montrera dans cette partie que les principales propriétés physiques des matériaux peuvent être mises à profit dans des applications très concrètes. Il s'ensuit une étude sur l'acquisition et l'exploitation de l'information à mesurer par certains capteurs (étude des différentes étapes du traitement de la grandeur physique à mesurer : son conditionnement, son amplification, sa comparaison ainsi que l'adaptation et la distribution de l'énergie. Ce cours est illustré par des travaux pratiques sur les caractérisations expérimentales de quelques capteurs.

Connaissances préalables recommandées :

Notions de Physique du solide, Electronique (Fonctions de transfert, Adaptation, amplification...), Théorie du solide, Propriétés des Matériaux Semi-conducteurs, Quelques notions d'électronique analogique et numérique, Notions élémentaires de chimie.

Contenu de la matière :

Partie A :

I. Propriétés : Générales des Capteurs

- Généralités sur les capteurs :
- Principes physiques mis en jeu dans les capteurs passifs et dans les capteurs actifs.
- Classification des capteurs :
- Performances d'un capteur : définitions métrologiques d'un capteur

II. Instrumentation : Mesure de la grandeur de sortie

- Conditionnement,
- Amplification,
- Comparaison
- Adaptation

Partie B

1. Capteurs à effets thermiques
2. Capteurs de déformation
3. Capteurs de position et de déplacement
4. Capteurs optiques
5. Capteurs magnétiques
6. Capteurs piézorésistifs et piézoélectriques
7. Capteurs physico-chimiques
8. Capteurs électrochimiques
9. Les biocapteurs
10. Les capteurs de gaz

Partie C Travaux Pratiques réalisés :

TP1 : Etude en régime statique et pulsé d'un photocapteur infrarouge BPW4X.

TP2 : Etude d'un capteur de température à coefficient négatif CTN (étalonnage, modélisation)

TP3 : Etude en régime statique d'une photorésistance.

TP4 : Etude en régime dynamique d'une photorésistance.

TP5 : Etude d'un capteur de température, le circuit LM35

Références :

1- Les capteurs en instrumentation industrielle" de Georges Asch aux éditions DUNOD, 4^{ème} édition 1991.

2-Technique et ingénierie-EEA, G. Asch Ed. Dunod l'Usine nouvelle, 6^{ème} édition 2010.

3- Designer's handbook of instrumentation and control circuits, Joseph J. Carr, Ed. Academic press (San Diego) 1991.

4- Guide pratique des capteurs / Ichinose Noboru, Tetsuji Kobayashi, Ed. Masson (Paris), 1990.5- Instrumentation et capteurs, polycopié de cours. D. Lafore, 2007

Semestre 2

Unité Découverte

Matière :

- 1/ Matériaux pour les énergies,
- 2/ Physique des ultrasons,
- 3/ Ingénierie inverse
- 4/ Autre matière du domaine des matériaux

1/ Matériaux pour les énergies

Objectifs de l'enseignement :

Mettre en lumière le lien étroit entre les matériaux et les énergies renouvelables sous toutes leurs formes.

Connaissances préalables recommandées :

Il est conseillé d'avoir des bases solides en :

- Physique générale (mécanique, thermodynamique, électricité/magnétisme, optique).
- Introduction à la physique du solide (types de matériaux, structure, théorie des bandes, propriétés de base).
- Mathématiques (algèbre, calcul différentiel/intégral, équations différentielles).

Contenu de la matière :

Introduction

Chapitre 1 : Sources d'énergie (solaire, thermique, éoliennes...)

Chapitre 2 : Matériaux pour l'énergie photovoltaïque (polymères, semi-conducteurs)

Chapitre 3 : Matériaux pour le stockage de l'énergie

Chapitre 4 : Matériaux pour les piles à combustible (Matériaux composites)

Chapitre 5 : Nouveaux matériaux pour les énergies renouvelables

Références :

1. Energy Science: Principles, Technologies, and Impacts par John Andrews et Nick Jelley - **2007** (la 3ème édition date de 2017).
2. Materials for Sustainable Energy: A Global Perspective par Richard A. Vaia, Robert W. Carpick, et al. – 2015.
3. Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications par Allen J. Bard et Larry R. Faulkner - 1980 (la 3ème édition date de 2001).
4. Solar Cell Device Physics par Stephen Fonash - 1981 (la 2ème édition date de 2010).
5. Hydrogen Storage Materials par Robert W. Jones - 2000.

2/ Physique des ultrasons

Objectifs de l'enseignement :

Ce cours vise à initier les étudiants aux techniques de contrôle non destructif et à la caractérisation des matériaux par ultrasons. Les étudiants développeront des compétences tant académiques que professionnelles, applicables dans divers secteurs tels que l'industrie métallurgique, mécanique, nucléaire, aéronautique et électronique.

Connaissances préalables recommandées :

Enseignements du M1 : Ondes élastiques, Traitement du signal et acquisition de données

Contenu de la matière :

1. Principes fondamentaux des ultrasons:

- Nature et caractéristiques des ondes ultrasonores : fréquence, amplitude, longueur d'onde, vitesse de propagation, et impédance acoustique.
- Types d'ondes : longitudinales, transversales, de surface (Rayleigh), et de plaque (Lamb).
- Comportement des ondes : réflexion, réfraction, incidence normale et angulaire.
- Transfert d'énergie et atténuation dans différents milieux.

2. Méthodes de contrôle par ultrasons :

- Types de transducteurs : incidence normale, angulaire, et spéciaux.
- Méthodes de contrôle : transmission, mode écho, résonance, automatiques et semi-automatiques.
- Techniques de contrôle : tandem, transducteurs focalisés, à double cristal, et par immersion.

3. Équipements et étalonnage :

- Composition et fonctionnement des appareils ultrasonores : équipements portables et de laboratoire.
- Caractéristiques des systèmes de contrôle : résolution, pouvoir de transmission et linéarité.

- Visualisation des signaux : A scan, B scan, C scan, et enregistrement des données.
4. **Applications des contrôles par ultrasons :**
- Méthodes de contrôle pour divers matériaux : pièces usinées, soudées, et matériaux non métalliques.
 - Mesures d'épaisseur, de vitesse, d'atténuation et de corrosion.
5. **Limites d'utilisation du contrôle par ultrasons :**
- Matériaux de faible épaisseur et limitations liées à l'atténuation.
 - Problèmes de réflexion sur des formes complexes et dépendance des résultats à la formation des opérateurs.

Références :

1. Contrôle non destructif par ultrasons, Tomes I et II, Niveau III, Ingénieurs. Centre d'Actualisation Scientifique et Technique CAST, INSA, Lyon, France.
2. B. Truell, C. Elbaum, B.B. Chick, Ultrasonic Methods in Solid State Physics, Academic Press, London, 1969.
3. J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, Springer Verlag, Berlin, 1983.

3/ Ingénierie inverse

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre les principes fondamentaux du reverse engineering appliqués aux matériaux.
- Acquérir des compétences pratiques dans l'analyse et la rétroconception de matériaux.
- Évaluer l'impact du reverse engineering sur l'innovation et le développement de nouveaux matériaux.
- Sensibiliser aux enjeux juridiques et éthiques liés à l'ingénierie inverse.

Connaissances préalables recommandées :

- Bases en physique des matériaux.
- Introduction à la chimie et à la mécanique des matériaux.
- Notions de programmation et d'analyse de données

Contenu de la matière :

I. Introduction au Reverse Engineering :

- Définition et historique du reverse engineering.
- Différences entre reverse et forward engineering.
- Applications industrielles dans le secteur des matériaux.

II. Techniques de Caractérisation des Matériaux :

- Méthodes d'analyse : chromatographie, spectroscopie IR, et techniques de déformulation.
- Utilisation de scanners 3D et logiciels de CAO pour la rétroconception.
- Étude des propriétés fonctionnelles et mécaniques des matériaux.

III. Échelle TRL et Développement Technologique :

- Présentation des niveaux de maturité technologique (TRL).
- Évaluation des matériaux en fonction de leur potentiel d'innovation.
- Cas pratiques de développement de nouveaux matériaux basés sur le reverse engineering.

IV. Cadre Juridique et Éthique :

- Propriété intellectuelle et réglementations liées à l'ingénierie inverse.
- Gestion des risques juridiques dans les projets de reverse engineering.
- Études de cas sur l'application des lois dans différents pays.

Références :

1. "Reverse Engineering: Mechanisms, Structures, and Applications" – [Auteur, Éditeur].
2. "Materials Science and Engineering: An Introduction" – William D. Callister.
3. Articles et études de cas récents sur le reverse engineering dans des revues scientifiques.

Semestre 2
Unité Transversale
Matière : Propriété intellectuelle et communication scientifique

Objectifs de l'enseignement :

Permettre aux étudiants de comprendre les principes fondamentaux de la propriété intellectuelle dans le cadre universitaire et professionnel, tout en développant des compétences solides en rédaction scientifique et technique. L'objectif est d'ancrer une pratique éthique de la recherche et de la publication.

Connaissances préalables recommandées :

Aucune exigence technique, mais un bon niveau en langue (française ou anglaise) est nécessaire. Une familiarité avec les travaux académiques ou la recherche documentaire est un atout.

Contenu de la matière :

Chapitre I : Principes de propriété intellectuelle

- Définitions : droit d'auteur, brevets, marques, licences
- Protection des œuvres, enjeux juridiques et scientifiques

Chapitre II : Intégrité et éthique de la recherche

- Le plagiat et ses conséquences
- Normes de citation, droits de reproduction et Open Access

Chapitre III : Techniques de rédaction académique

- Structurer un mémoire, un rapport ou un article scientifique
- Structure IMRAD : Introduction, Méthodes, Résultats, Analyse et Discussions

Chapitre IV : Outils de rédaction et bibliographie

- Zotero, LaTeX, BibTeX, Word – méthodologies d'intégration des sources
- Rédaction collaborative et gestion des versions

Chapitre V : Présentation orale

- Préparation de la présentation, Situation (attitude) de l'orateur, Contenu et forme, Structure, Supports visuels

Références :

1. Umberto Eco, Comment rédiger un mémoire, Flammarion, 1993. ISBN : 978-2080811552
2. Claude Bélisle, Lire et rédiger des textes scientifiques, Éditions De Boeck Supérieur, 2004. ISBN : 9782804147035
3. Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI), Guide de la propriété intellectuelle pour les inventeurs et les petites et moyennes entreprises, WIPO Publication No. 895(F), 2017. Disponible sur : https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/fr/wipo_pub_895_2017.pdf
4. OWL Purdue Writing Lab, Online Writing Resources, Purdue University. Accès en ligne : <https://owl.purdue.edu/>
5. Guide pratique des références bibliographiques, Édition numérique, 2020. Disponible sur : <https://www.auf.org>

Semestre 3

Semestre 3

Unité Fondamentale

Matière : Théories et Modélisation des matériaux

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre les différents concepts théoriques de base et différentes approches pour la description et modélisation des matériaux à différentes échelles (atomique, mésoscopique, macroscopique).
- Initier à l'utilisation des méthodes de modélisation atomistique et mésoscopique
- Utiliser des logiciels de modélisation atomistique et ab initio.
- Comprendre les liens entre structure, propriétés et performances des matériaux

Connaissances préalables recommandées :

Une base solide est nécessaire en :

1. **Physique Fondamentale**
 - Physique du solide
 - Mécanique quantique (bases)
 - Physique statistique
 - Thermodynamique (transitions de phase)
2. **Simulation Numérique**
 - Logiciels
 - Programmation (Python/Fortran)

Contenu de la matière :

Chapitre 1: Introduction générale à la modélisation des matériaux

- Objectifs de la modélisation en science des matériaux
- Classification des principales méthodes de modélisation: DFT, MC, MD

Chapitre 2: Bases de mécanique quantique appliquée aux matériaux

- Rappels sur la mécanique quantique
- Approximation de Born-Oppenheimer
- Fonction d'onde électronique, orbitale atomique

Chapitre 3: Modélisation quantique des matériaux

- Introduction à la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)
- Théorèmes de Hohenberg-Kohn, équations de Kohn-Sham.
- Approximations usuelles : LDA, GGA, +U.
- Notion de pseudo-potentiels, base onde plane.
- Logiciels de simulation : VASP, Quantum ESPRESSO, ABINIT
- Étude de cas : calcul des propriétés structurales (paramètres de maille, module de compressibilités, énergie de cohésion)

Chapitre 4 : Dynamique moléculaire

- Potentiels interatomiques : Lennard-Jones, EAM, MEAM
- Intégration des équations du mouvement (algorithme de Verlet)
- Simulation de l'évolution thermique et structurale des matériaux

Chapitre 5 : Méthodes statistiques et Monte Carlo

- Ensembles statistiques (microcanonique, canonique, grand canonique)
- Algorithmes de Monte Carlo (Metropolis, échange de particules)
- Application à l'ordre/désordre, transitions de phase

Chapitre 6 : Liens entre structure et propriétés

- Calculs de propriétés mécaniques (constantes élastiques, modules)
- Propriétés électroniques (structure de bande, densité d'états)
- Propriétés magnétiques et thermodynamiques
- Application à des matériaux réels : métaux, alliages, oxydes

Outils recommandés :

- Codes libres : LAMMPS, Quantum ESPRESSO, VESTA, Xcrysden
- Langages : Bash, Python (post-traitement), gnuplot
- Plateforme : Linux / Windows avec WSL ou machines virtuelles

Références :

1. Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications par Daan Frenkel et Berend Smit - 1996 (la 2ème édition date de 2002) : Un classique qui couvre les fondements théoriques et les algorithmes des simulations de dynamique moléculaire et de Monte Carlo, avec des exemples d'applications.
2. Understanding Molecular Simulation, by D. Frenkel & B. Smit (2023).
3. Electronic Structure: Basic Theory and Practical Methods, by R. M. Martin (2020).
4. P. Giannozzi et al., "Quantum ESPRESSO toward the exascale", The Journal of Chemical Physics (2020).
5. A. P. Thompson et al., "LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales", Computer Physics Communications (2022).
6. Documentation officielle de Quantum ESPRESSO, LAMMPS.

Semestre 3

Unité Fondamentale

Matière : Optoélectronique

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de l'enseignement de l'optoélectronique est de donner une compréhension approfondie des dispositifs qui lient lumière et électricité (sources, détecteurs, modulateurs). Les étudiants apprendront les principes physiques de leur fonctionnement, leurs caractéristiques, leurs applications (communications optiques, affichage, détection, etc.), et acquerront des bases pour leur analyse et conception.

Connaissances préalables recommandées :

Pour aborder efficacement un cours d'optoélectronique, il est recommandé d'avoir des bases solides en physique des semi-conducteurs (notions de bande interdite, jonctions PN, dopage), en optique fondamentale (lois de la réflexion et réfraction, interactions lumière-matière) et en électronique (principes de fonctionnement des composants optoélectroniques comme les LEDs et photodiodes).

Contenu de la matière :

Chapitre I : Introduction aux composants optoélectroniques

I.1 Principaux composants optoélectroniques et leurs applications :

- capteurs, émetteurs de lumière, disques optiques, fibres optiques

I.2 Interaction électron/photon dans un semiconducteur :

- absorption fondamentale, émission spontanée, émission stimulée

Chapitre II : Photodiodes et détecteurs

- Fonctionnement des photodiodes : mécanismes de génération et de recombinaison.
- Caractéristiques des photodiodes : réponse spectrale, temps de réponse, bruit.

Chapitre III : Cellules solaires

- Mécanismes de conversion de l'énergie lumineuse en électricité.
- Types de cellules solaires : cellules à base de silicium, cellules à couches minces.....
- Efficacité et optimisation des cellules solaires.

Chapitre IV : Diodes électroluminescentes / Diodes laser

- Principes de fonctionnement: émission spontanée, émission stimulée et cavités résonnantes.
- Caractéristiques des diodes laser : seuil d'émission, courbe courant-énergie, applications.

Chapitre V : Phénomènes de transport dans les semi-conducteurs

- Concepts de transport de charge : mobilité, conductivité et diffusion.
- Modèles de transport : équation de Boltzmann.
- Effets des gradients de température et de concentration sur le transport.

Chapitre VI : Applications et dispositifs avancés

- Dispositifs à semi-conducteurs avancés : lasers à semi-conducteurs.
- Études de cas sur l'impact des matériaux et des structures sur les performances des dispositifs.

Références:

1. Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices par S.O. Kasap - 2001 (la 3ème édition date de 2017).
2. Semiconductor Optoelectronic Devices par Pallab Bhattacharya - 1994 (la 2ème édition date de 1997).
3. Fundamentals of Photonics par Bahaa E. A. Saleh et Malvin Carl Teich - **1991** (la 2ème édition date de 2007).
4. Laser Fundamentals par William T. Silfvast - 1996 (la 2ème édition date de 2004).
5. Optical Fiber Communications par Gerd Keiser - 1983 (la 6ème édition date de 2017).
6. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits par Larry A. Coldren, Scott W. Corzine et Milan L. Mašanović - **1995** (la 2ème édition date de 2012).

Semestre 3

Unité Fondamentale

Matière : Matériaux innovants

Objectifs de l'enseignement :

Les matériaux innovants jouent un rôle central dans la physique des solides et dans le développement de nouvelles fonctionnalités. Ce cours abordera la synthèse, la caractérisation et l'application de matériaux récemment découverts : graphène, nanotubes de carbone, systèmes électroniques 2D.

Connaissances préalables recommandées :

Physique des solides, méthodes expérimentales.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux matériaux

- Définition
- Enjeux technologiques
- Rôle en physique des matériaux

Chapitre 2 : Classification des Matériaux innovants

- Matériaux nanostructurés
- Nanoparticules, Nanofils
- Nanotubes de carbone
- Graphène
- Les systèmes électroniques 2D

Chapitre 3 : Propriétés physiques à l'échelle nanométrique

- Effets quantiques
- Taille
- Surface
- Propriétés optiques
- Électriques
- Mécaniques

Chapitre 4: Synthèse des matériaux innovants

Chapitre 5 : Caractérisation des matériaux innovants

Chapitre 6: Intérêts et applications potentielles des matériaux innovants

Références :

1. "Materials Science and Engineering: An Introduction" – William D. Callister (1985).
2. "'Advanced Materials for Sustainable Energy and Engineering: Selected Proceedings of the 2023 International Conference on Advanced Materials for Sustain" is listed on Springer's website with a publication date of July 2nd, 2024. The ISBN is 978-3-031-57021-6..
3. "Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications" – Guozhong Cao.
4. Articles scientifiques récents (à intégrer au fil du cours).

Semestre 3

Unité Fondamentale

Matière : Matériaux photoniques

Objectifs de l'enseignement :

- Comprendre les propriétés des matériaux photoniques (interaction lumière-matière, indices de réfraction, transparence, biréfringence, photosensibilité)
- Concevoir les cristaux photoniques
- Concevoir des dispositifs photoniques (fibres optiques, fibres optiques à cristaux photoniques).

Connaissances préalables recommandées :

Une bonne compréhension des principes fondamentaux de l'optique, de la physique des solides, de la mécanique quantique, ainsi que de solides compétences mathématiques, est nécessaire.

Contenu de la matière :

Chapitre I : Introduction

- Propriétés de base des matériaux (transparence, biréfringence, photosensibilité).
- Géométrie ou mise en forme du matériau en tant que couche mince, fibre ou autre.
- Nouvelles propriétés des matériaux à l'échelle nanométrique.

Chapitre II : Généralité sur les cristaux photoniques

- Définition des cristaux photoniques
- Analogie entre l'électron et le photon
- Propriétés de base des cristaux photoniques
- Diagrammes de bandes : Cristal photonique 2D et 3D
- Guides d'ondes
- Indices de réfraction de groupe et de phase
- Les indices effectifs de réfraction de phase et de groupe.
- Matériaux à bandes interdites photoniques naturels

Chapitre III : Fibre à cristaux photoniques - Fibres optiques

- Nouvelles fibres optiques : les fibres à cristaux photoniques
- Concept des fibres à cristaux photoniques
- Classification des fibres à cristaux photoniques
- Techniques Fabrication

Références :

1. Optical Properties of Solids par Mark Fox - **2001** (la 2ème édition date de 2010).
2. Photonics: Optical Electronics in Modern Communications par Amnon Yariv et Pochi Yeh - 1997 (la 6ème édition date de 2007).
3. Introduction to Nanophotonics par Henri J. Lezec et Albert Polman – 2012.
4. Semiconductor Optoelectronic Devices par Pallab Bhattacharya - 1994 (la 2ème édition date de 1997).

Semestre 3

Unité Méthodologie

Matière : Techniques d'élaboration et/ou synthèses des matériaux

Objectifs de l'enseignement :

L'enseignement de cette matière vise à former des experts capables de comprendre, de sélectionner, de mettre en œuvre et d'optimiser les techniques d'élaboration et de synthèse pour créer des matériaux sur mesure répondant à des besoins spécifiques dans divers domaines d'application.

Connaissances préalables recommandées :

Pour aborder efficacement le cours sur les techniques d'élaboration et synthèse des matériaux, une base solide en :

- Thermodynamique.
- Physique des matériaux.
- Métallurgie physique.

Contenu de la matière :

I. Rappels sur la classification des matériaux

- Notions fondamentales sur les familles de matériaux (métaux, céramiques, polymères, composites, semi-conducteurs), leurs structures, propriétés et domaines d'application.

II. Synthèse des matériaux sous forme de poudres

- Synthèse de poudres par des méthodes chimiques : co-précipitation, sol-gel, méthode solvothermale,etc.

III. Élaboration des matériaux céramiques

- Mécanismes de diffusion dans les solides.
- Frittage en phase solide.
- Applications aux céramiques : céramiques électroniques, céramiques thermomécaniques.

IV. Méthodes d'élaboration des matériaux en couches minces

- Méthodes physiques : évaporation thermique, pulvérisation cathodique, ablation laser, épitaxie par jet moléculaire.
- Méthodes chimiques et électrochimiques : dépôt chimique en phase vapeur (CVD), pyrolyse par pulvérisation (spray pyrolysis), Dipcoating, spin coating, électrodéposition, etc.

V. Méthodes de préparation des matériaux monocristallins

- Méthodes de croissance cristalline par tirage (méthode de Czochralski, etc.).
- Méthodes de transport en phase gazeuse.

VI. Technologies des semi-conducteurs

- Cristallogénèse du silicium.
- Élaboration des semi-conducteurs composés : matériaux III-V et II-VI.
- Techniques de dopage des matériaux
 - ❖ Dopage par diffusion.
 - ❖ Implantation ionique.

VII. Élaboration des polymères

- Réactions de polyaddition et de polycondensation.
- Applications aux matériaux thermoplastiques et thermodurcissables.

VIII. Élaboration des matériaux composites

- Composites à matrice céramique.
- Composites à matrice métallique.
- Composites à matrice polymère (résine).

Références :

1. Principles of Materials Processing par Robert D. Doherty et Robert S. Davis – 1994.
2. Solid State Chemistry and Its Applications par Anthony R. West - 1984 (la 2ème édition date de 1999).
3. Polymer Science and Technology par Joel R. Fried - 1995 (la 3ème édition date de 2014).
4. Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications par Randall M. German - 1984 (la 2ème édition date de 1994).
5. Thin Film Deposition: Principles and Practice par Donald L. Smith – 1995.

Semestre 3

Unité Méthodologie

Matière : Méthodes de caractérisation et d'analyse des matériaux (2)

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de cet enseignement est de présenter à l'étudiant les différentes techniques de contrôle de la morphologie, de la structure et de la composition des matériaux, et de lui faire découvrir leurs applications dans les domaines tels que la métallurgie, la technologie des semi-conducteurs et des matériaux organiques. Cet enseignement permettra d'une part à l'étudiant de s'initier aux différentes techniques et d'acquérir les connaissances nécessaires à la compréhension des analyses effectuées. D'autre part, cette matière sera présentée sous forme d'une méthodologie qui l'aidera à choisir les techniques les plus adaptées aux problèmes qui lui seront posés. Quelques séances de cours sont nécessaires au bon déroulement de cet enseignement. Quant aux travaux pratiques, ils peuvent être présentés sous forme de démonstrations de l'instrumentation dans les Centres de Recherche et dans les Laboratoires ou au niveau des Plateaux Techniques d'analyse physico-chimiques possédant les équipements nécessaires. Ils peuvent être réalisés sous forme d'acquisition de méthodes de dépouillement et d'analyse d'images, de clichés et de spectres.

Connaissances préalables recommandées :

- **Sciences des matériaux** : Notions fondamentales sur la structure et les propriétés des matériaux.
- **Chimie générale** : Compréhension des interactions chimiques et des méthodes d'analyse.
- **Physique** : Concepts de base en optique, électromagnétisme et mécanique.

Contenu de la matière :

Chapitre I : Techniques de Caractérisation Structurale

I.1 Diffraction des rayons X (DRX)

I.2 Microscopie : Microscopie Electronique à Balayage (SEM), Microscopie Electronique à Transmission (TEM), Microscopie Tunnel à Balayage (STM), Microscopie à Force Atomique (AFM)

I.3 Analyse par diffraction neutronique : Applications pour étudier les structures à l'échelle atomique.

Chapitre II : Analyse chimique et profils des concentrations

II.1 Spectroscopies d'électrons (AES, XPS)

II.2 Microanalyse X (EDS, WDS)

II.3 Microanalyse par émission ionique secondaire (SIMS)

II.4 Microanalyse nucléaire (RBS, ERDA)

Chapitre III : Domaines d'applications et Développements Futurs

III.1 Applications industrielles : Exemples d'utilisation des techniques de caractérisation dans différents secteurs (aéronautique, biomatériaux, électronique).

III.2 Innovations en caractérisation : Nouvelles technologies et méthodes émergentes dans le domaine de la caractérisation des matériaux.

III.3 Intégration des données : Approches pour combiner les résultats de différentes techniques de caractérisation pour une compréhension globale.

Références :

1. A. D. Franklin et al., Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods, 2nd édition, Wiley, 2014.
2. D. J. Fisher, Principles and Practice of Materials Characterization, 1ère édition, Wiley, 2008.
3. E. N. Kaufmann et al., Characterization of Materials, 3ème édition, Wiley, 2005.
4. B. Agius M. Froment et al., Surfaces Interfaces et couches minces-Observation et analyse
5. J.C. Vickerman, Surface Analysis-The principle technique

Semestre 3

Unité Méthodologie

Matière : Advanced Topics in AI and Materials Science

Course Objectives:

Introduce more advanced AI and ML techniques, with an emphasis on real-world in materials science. Students will deepen their understanding of AI-driven material discovery and design.

Course Content:

1. Advanced ML Techniques

- Ensemble methods (Random Forests, XGBoost, LightGBM).
- Advanced regression and classification methods.
- Dimensionality reduction: PCA, t-SNE, UMAP.

2. Explainable AI and Trustworthy Models

- Trust in AI for materials discovery: explainability, transparency.
- SHAP, LIME for model interpretability.

3. Advanced Applications in Materials Science

- Inverse design for material discovery using AI.
- Predicting material properties (elastic moduli, superconductivity, etc.).
- Multiscale modeling: combining AI with molecular dynamics or density functional theory (DFT).

4. Capstone Project

- Students will complete a project where they apply AI/ML to solve a materials science problem, using the skills learned throughout the semester.

Recommended Textbooks:

- "Machine Learning for Materials Science" by Jha et al. (directly relates to AI in materials science)
- "Data Science for Materials Discovery" by K. A. Persson, et al. (focused on machine learning applications in materials science)
- "Materials Informatics: Methods, Tools, and Applications" by Rajiv S. Mishra (further extends ML into material discovery)

Tools & Libraries:

- Python, Jupyter Notebooks
- TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn
- Matminer, Pymatgen, ASE, CGCNN

Semestre 3

Unité Découverte

Matière :

1/ Nano matériaux, 2/ Energies renouvelables ou 3/ Autre matière du domaine des matériaux

1/ Nano matériaux

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de ce cours est de donner à l'étudiant la chance de découvrir le monde des nanomatériaux et leurs applications. Ces nano-objets possèdent de nouvelles propriétés physiques, notamment optiques et électroniques, différentes de celles de la matière à l'état massif et ils ont plusieurs applications technologiques dans divers domaines.

Connaissances préalables recommandées :

Ce cours nécessite de bonnes connaissances des propriétés physiques des matériaux à l'état massif en particulier les propriétés électroniques et optiques.

Contenu de la matière :

1. Classification:

- Définitions, points quantiques, nanotubes et nano-films, nanostructures. Alliages à mémoire de forme, Les Biomatériaux.

2. Propriétés physiques:

- Introduction : effet d'atome de surface.
- Propriétés structurales : Caractéristiques géométriques des nanomatériaux.
- Propriétés électroniques : Densité d'états et structure électronique, confinement quantique de taille.
- Propriétés optiques : Phénomènes d'absorption et émission dans les nanoparticules de semi-conducteurs et de métaux nobles. Propriétés électriques : Conduction électrique.

3. Méthodes de synthèse:

Méthodes physiques en phase gazeuse, méthodes chimiques en phase liquide, assemblage d'agrégats métallique, techniques de dépôt d'agrégats et colloïdes, mécanismes de formation de nanomatériaux.

4. Applications :

- Optoélectronique : laser à semi-conducteur, cristaux photoniques, conversion de l'énergie solaire.
- Biologie : couplage de nanoparticules et de biomolécules, nanostructures luminescentes à base de semi-conducteurs et de métaux.

Références

1. Les nanosciences 2 Nanomatériaux et nanochimie. Lahmani Marcel, Bréchnignac Catherine et Houdy Philippe. Editeur: Editions Belin (2006).
2. Introduction to Nanoscience. S.M. LINDSAY. Oxford University press (2010).
3. Size Effects in Metals Semiconductors and Inorganic Compounds. By Grégory Guisbiers and Dibyen du Ganguli. Trans Tech Publications Ltd (2010).

2/ Energies renouvelables

Objectifs de l'enseignement :

Ce programme vise à fournir à l'étudiant des informations de base des principes fondamentaux des énergies renouvelables, en explorant leurs sources, technologies associées et applications dans divers secteurs.

Connaissances préalables recommandées :

Connaissances de bases sur la physique des semi-conducteurs, métallurgie.

Contenu de la matière :

1- Introduction aux énergies renouvelables

Définitions, enjeux climatiques et énergétiques et rôle des énergies dans la transition énergétique mondiale et nationale.

2- Énergie solaire

Photovoltaïque et thermique : principes, technologies et applications.

3- Énergie éolienne

Fonctionnement des éoliennes terrestres et offshore.

Conception, matériaux innovants et optimisation des turbines.

4- Énergie hydraulique

Centrales hydroélectriques, micro-hydroélectricité.

Impacts environnementaux et potentialités.

5- Biomasse et bioénergie

Sources de biomasse, procédés de conversion.

Biocarburants et valorisation des déchets organiques.

6- Géothermie

Géothermie superficielle et profonde.

Applications en chauffage et production d'électricité.

7- Stockage de l'énergie

Besoins en stockage pour les énergies renouvelables.

Technologies de stockage : batteries, hydrogène, etc.

8- Enjeux économiques: Coûts des technologies renouvelables

Coûts des technologies renouvelables.

Références:

1. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future par Godfrey Boyle - 1996 (la 4ème édition date de 2018) .
2. Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Economics par Olindo Isabella, Arno Smets, René van Swaaij et Miro Zeman - 2016.
3. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application par James F. Manwell, Jon G. McGowan et Anthony L. Rogers - 2002 (la 2ème édition date de 2009).
4. Biomass for Energy: Global Potential and Future Directions par David Boyles - 2004 (la 2ème édition date de 2019 sous le titre "Bioenergy: Technology and Engineering"). sont abordées.
5. Fuel Cell Fundamentals par Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella et Fritz B. Prinz - 2006 (la 3ème édition date de 2016).

Semestre 3

Unité Transversale

Matière : Entrepreneuriat, Innovation et Startup

Objectifs de l'enseignement :

Donner aux étudiants une vision globale de l'entrepreneuriat moderne, développer leur esprit entrepreneurial et leur capacité à initier un projet.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Fondements de l'Entrepreneuriat

- Définition, création de valeur par l'innovation et la prise de risque.
- Piliers : opportunité, innovation, gestion du risque, création de valeur.
- Écosystème : chercheurs-entrepreneurs, investisseurs, incubateurs, clusters.
- Processus : Idéation → Validation → Business Plan → Lancement → Croissance.
- Enjeux scientifiques : brevets, normes, financement R&D, équipes pluridisciplinaires.
- Cas pratiques : simulation de dépôt de brevet, recherche de financement.

Chapitre 2 : L'esprit entrepreneurial dans les sciences et technologies

- Comprendre l'entrepreneuriat scientifique et technologique.
- Esprit entrepreneurial : créativité, innovation, résilience, gestion du risque.
- Motivations à entreprendre dans les domaines scientifiques et technologiques.
- Grands secteurs d'opportunités : énergie, santé, matériaux, numérique, environnement, sciences alimentaires.

Chapitre 3 : De la recherche scientifique à l'opportunité entrepreneuriale

- Transformer une découverte scientifique ou technologique en projet entrepreneurial.
- Approche "problème-solution" : identifier un besoin réel.
- Initiation à l'étude de marché pour projets scientifiques.
- Validation rapide d'une idée : prototype minimum viable (MVP), enquêtes, tests utilisateurs.

Chapitre 4 : Construire et modéliser son projet innovant

- Introduction au Business Model Canvas (BMC) pour projets technologiques.
- Définir une proposition de valeur claire et différenciante.
- Identifier ressources, partenaires stratégiques, canaux de distribution.

Chapitre 5 : Lancer son projet scientifique ou technologique

- Étapes clés pour passer de l'idée au projet structuré.
- Sources classiques de financement en phase de démarrage : fonds d'amorçage, concours, soutiens privés.
- Savoir pitcher : vulgariser une innovation pour convaincre investisseurs, partenaires et premiers clients.
- Erreurs fréquentes à éviter : mauvaise évaluation du marché, développement technologique déconnecté du besoin réel.

Chapitre 6 : Réussir et se développer comme entrepreneur scientifique

- Gestion du risque et de l'incertitude dans les projets innovants.
- Stratégies de pivot : adapter son projet selon les retours du marché.
- Leadership scientifique : organiser et animer une équipe pluridisciplinaire.
- Bases de la propriété intellectuelle : brevets, licences, valorisation de l'innovation, protection.
- Entrepreneuriat à impact : répondre aux défis environnementaux, sociaux et économiques.
- Continuer à progresser : réseaux d'innovation, incubateurs, mentors, formations continues.

Références :

1. Verstraete, Thierry, et Fayolle, Alain, Entrepreneuriat : Fondements et dynamiques. Édition De Boeck Supérieur, 2005.
2. Julien, Pierre-André, Entrepreneuriat : devenir entrepreneur : théories et pratiques. Édition Économica, 2007.
3. Schieb-Bienfait, Nathalie, et Lemoine, Valérie, Entrepreneuriat : théories et réalités entrepreneuriales. Édition EMS (Management & Société), 2013.
4. Fayolle, Alain, Entrepreneuriat : Apprendre à entreprendre, Édition Dunod, 2014.