

DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ÉNERGIE ET DES MATÉRIAUX

Code	Titre	Grade	Crédits
3732	DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ÉNERGIE ET DES MATÉRIAUX	Philosophiae doctor, Ph. D.	Quatre-vingt-dix

OBJECTIFS

Ce programme a pour objectif d'approfondir les connaissances du membre étudiant dans une des spécialités des sciences de l'énergie et des matériaux tout en lui permettant d'effectuer des recherches qui devraient apporter une contribution originale au savoir ou à l'application des connaissances dans la pratique à l'intérieur d'un des programmes de recherche du Centre EMT.

CONDITIONS D'ADMISSION

La personne candidate doit être titulaire d'une maîtrise en sciences de l'énergie et des matériaux, ou dans tout autre discipline ou domaine pertinents.

De plus, il doit y avoir une adéquation entre la formation antérieure de la personne candidate et celle requise pour entreprendre des études dans le programme d'enseignement visé.

Elle doit démontrer que ses orientations de recherche sont conformes aux objectifs des programmes de recherche qui supportent le programme d'enseignement visé.

Elle doit posséder un dossier académique de haute qualité dont de très bons résultats scolaires d'au moins 3,2 (sur 4,3) ou l'équivalent.

La personne candidate doit avoir choisi une direction de recherche et avoir obtenu l'acceptation motivée de celui-ci.

À la suite de l'étude du dossier, certaines activités d'appoint peuvent être exigées. Selon le domaine de recherche de la personne candidate, l'un ou l'autre des cours suivants : NRG9213, NRG9200 et NRG9206, ou leur équivalent sont requis.

Elle peut être soumise à une entrevue. Elle peut s'inscrire à l'un ou l'autre des trois trimestres.

Toute personne candidate doit avoir une connaissance suffisante de la langue française parlée et écrite.

RÈGLEMENT PÉDAGOGIQUE PARTICULIER

Le membre étudiant est tenu de se consacrer à plein temps à son programme d'études durant les six trimestres consécutifs à sa première inscription. La durée normale du programme de doctorat est de douze trimestres.

RÉGIME D'ÉTUDES ET DURÉE DES ÉTUDES

- Temps complet : 4 ans
- Temps partiel : 6 ans

LISTE DES ACTIVITÉS

Le doctorat en sciences de l'énergie et des matériaux comporte 90 crédits, dont 77 pour la thèse, 7 pour les cours et séminaires, et 6 pour l'examen doctoral.

ACTIVITÉS OPTIONNELLES (6 CRÉDITS)

NRG2000 DIFFRACTION DES RAYONS X (3 CR.)

Ce cours permet de présenter l'ensemble des concepts théoriques et pratiques à la base de la diffraction des rayons X. Dans le cadre de ce cours, on se concentrera surtout sur la diffraction des rayons X telle qu'elle est pratiquée dans le domaine des poudres et des films minces. Les sujets abordés sont : caractéristiques de la radiation X, source pour la génération de la radiation X, production de la radiation monochromatique, détecteurs, instrumentation, état cristallin, théorie de la diffraction, préparation des échantillons, acquisition des données, analyse qualitative des données et analyse quantitative des données.

NRG3500 LECTURES DIRIGÉES I (1 CR.)

Étude personnelle d'un sujet spécifique sous la direction d'un membre du corps professoral.

NRG3501 LECTURES DIRIGÉES II (2 CR.)

Étude personnelle d'un sujet spécifique sous la direction d'un membre du corps professoral.

NRG3502 LECTURES DIRIGÉES III (3 CR.)

Étude personnelle d'un sujet spécifique sous la direction d'un membre du corps professoral.

NRG3506 SCIENCE ET TECHNOLOGIE DES COUCHES MINCES (3 CR.)

La science et la technologie des couches minces jouent un rôle crucial dans les industries de pointe. Si leur principale application réside dans la microélectronique, leurs applications sont nombreuses et en pleine expansion dans les communications modernes, l'optique électronique, les revêtements ainsi que dans la production, le stockage et la conservation de l'énergie.

Ce cours passe en revue les notions essentielles de science des matériaux et du vide, présente les principales méthodes de synthèse de couches minces. Il couvre ensuite la nucléation, la croissance, l'épitaxie et la microstructure des couches.

La science des matériaux — et en particulier celle des couches minces — reposant largement sur des outils et des techniques de caractérisation avancés, les membres étudiants explorent également par eux-mêmes les techniques de caractérisation des couches minces à travers un projet de recherche et une présentation à la classe sur une technique de caractérisation qu'ils ont choisi d'étudier.

NRG3507 BATTERIES ET ÉLECTRIFICATION DES TRANSPORTS (1 CR.)

Ce cours, offert en alternance entre l'Unité mixte de recherche INRS-UQTR et l'Université Paris-Saclay, propose une formation intensive de cinq jours consacrés aux batteries et à l'électrification des transports. Il présente une description approfondie des notions fondamentales en électrochimie des batteries (thermodynamique, cinétique, transport ionique, mécanismes d'insertion et de dégradation), ainsi que des matériaux, procédés de fabrication et méthodes de caractérisation et de modélisation. Les membres étudiants auront l'opportunité de comprendre l'intégration des systèmes de batteries dans les applications de transport et leur interaction avec le réseau électrique, tout en abordant les enjeux de gestion et de sécurité (BMS, SOC, SOH), d'industrialisation, de circularité et de réglementation. La formation comprend également des ateliers pratiques, séminaires d'experts, visites d'infrastructures de recherche et de sites industriels et séance d'affiches étudiantes, favorisant une approche intégrée et interdisciplinaire en lien avec les réalités académiques et industrielles.

Cours faisant partie d'une école d'été, offert en alternance entre le Québec et la France.

NRG7218 LASER ET TECHNIQUES OPTIQUES (3 CR.)

Principes de base des lasers, propriété de la radiation laser. Interaction d'une onde électromagnétique avec un système atomique : traitement de l'oscillateur harmonique, traitement semi-classique. Élargissement de raie : élargissement homogène, élargissement par saturation, effet Doppler. Propagation d'une impulsion laser dans un milieu amplificateur ou absorbant, saturation. Condition d'oscillation, « Q-switching », oscillateur à relaxation. Laser à rubis, laser à néodyme-verre, laser à CO₂. Optique du faisceau gaussien et application au résonateur laser.

NRG7700 INTRODUCTION AUX MÉTHODES NUMÉRIQUES (3 CR.)

Ce cours servira à améliorer des habiletés en programmation par la pratique. Il permettra d'acquérir les connaissances relatives au traitement de données et à l'application de modèles basés sur les équations différentielles. Il permettra de comprendre les avantages et les inconvénients des différentes approches possibles pour résoudre un problème donné (schéma explicite ou implicite, split-step ou global, etc.).

NRG7701 PROBLÈMES SPÉCIAUX I (1 CR.)

Ce cours, offert généralement sous forme de lectures dirigées, donne un complément de formation dans certains domaines jugés nécessaires par le comité de programmes.

NRG7702 PROBLÈMES SPÉCIAUX II (2 CR.)

Ce cours, offert généralement sous forme de lectures dirigées, donne un complément de formation dans certains domaines jugés nécessaires par le comité de programmes.

NRG7703 PROBLÈMES SPÉCIAUX III (3 CR.)

Ce cours, offert généralement sous forme de lectures dirigées, donne un complément de formation dans certains domaines jugés nécessaires par le comité de programmes.

NRG7713 PROBLÈMES SPÉCIAUX III (3 CR.)

Ce cours, offert généralement sous forme de lectures dirigées, donne un complément de formation dans certains domaines jugés nécessaires par le comité de programmes.

NRG7723 PROBLÈMES SPÉCIAUX III (3 CR.)

Ce cours, offert généralement sous forme de lectures dirigées, donne un complément de formation dans certains domaines jugés nécessaires par le comité de programmes.

NRG7733 PROBLÈMES SPÉCIAUX III (3 CR.)

Ce cours, offert généralement sous forme de lectures dirigées, donne un complément de formation dans certains domaines jugés nécessaires par le comité de programmes.

NRG7704 ÉLECTROCHIMIE : MÉTHODOLOGIE ET APPLICATIONS (3 CR.)

Ce cours permettra une introduction et des connaissances générales sur l'électrochimie, les techniques expérimentales conventionnelles et modernes ainsi que quelques méthodes de simulation numériques des résultats expérimentaux.

On y introduira plusieurs domaines d'importance technologiques. Il permettra de mettre en pratiques les connaissances théoriques acquises.

NRG9004 DIAGNOSTICS DES PLASMAS (3 CR.)

L'objectif de ce cours est de familiariser les étudiantes et étudiants aux différentes techniques utilisées pour la caractérisation des plasmas (chaud et froid). Les sujets couverts sont : interférométrie, diffusion Thomson, diagnostics ILM, spectrométrie [équilibre et modèles ionisation (ETL, coronal, radiative-collisionnel), émission de raies et du continuum, élargissement des raies, spectroscopie d'absorption et

spectroscopie laser], chronoscopie, imagerie et tomographie, sondes magnétiques, électrostatiques et capacitive, analyseurs de masse et énergie. Il y a deux cours de travaux pratiques en laboratoire.

NRG9200 PHYSIQUE DES PLASMAS (3 CR.)

Ce cours couvre les sujets suivants : la physique atomique dans les plasmas, les collisions atomiques, les orbites des particules, la fonction de distribution, les équations des deux fluides (diffusion, mobilité), les équations MHD, les ondes de plasmas, les équations cinétiques, les collisions coulombiennes, les sources de plasmas dans la nature et dans le laboratoire.

NRG9201 PLASMAS FROIDS (3 CR.)

Introduction à la physique et aux diagnostics des plasmas froids. Réacteurs à plasmas. Décharges DC, capacitatives et inductives. Plasmas entretenus par des ondes, plasmas créés par laser à faible intensité. Applications des plasmas au dépôt et à la gravure des couches minces. Applications des plasmas à l'analyse de matériaux.

NRG9202 SYSTÈMES COLLOÏDAUX (3 CR.)

Liquides et solutions : théories des liquides, solvation, tensioactifs, état colloïdal. Systèmes micellaires : thermodynamique, cinétique, structure, solubilisation, action détergente. Émulsions et microémulsions, vésicules et liposomes, mousses, sols et dispersions. Propriétés électriques, optiques et rhéologiques des colloïdes. Applications aux systèmes non aqueux et aux polymères.

NRG9203 SUJETS D'ACTUALITÉS (3 CR.)

Cours spéciaux offerts périodiquement par des professeurs et professeurs invités ou réguliers sur des sujets d'actualité dans le domaine des sciences de l'énergie et des matériaux.

NRG9204 SURFACES ET INTERFACES (3 CR.)

Ce cours a pour but de donner une introduction et des connaissances générales sur les propriétés des surfaces, les techniques pertinentes à leur caractérisation ainsi que les méthodes les plus utilisées pour les modifier (plasmas, implantation ionique, irradiation photonique). Les principales propriétés de surface traitées dans ce cours sont : la mouillabilité, l'adhérence, la perméation, les propriétés tribologiques (dureté, usure, friction), les propriétés optiques, la conductivité, la corrosion et la biocompatibilité.

NRG9207 INTERACTION LASER-MATIÈRE (3 CR.)

Interaction du rayonnement laser et du plasma de couronne : absorption collisionnelle, absorption résonante, instabilités paramétriques, saturation des instabilités. Transport d'énergie dans la matière. Hydrodynamique : ondes de choc, ondes de déflagration, compression de la matière. Physique atomique. Fusion par laser. Accélération d'électrons. Sources X créées par l'interaction laser-matière.

NRG9209 ÉNERGIE DE FUSION (3 CR.)

La fusion thermonucléaire dans le bilan énergétique. Les réactions de fusion. Réacteurs potentiels : confinement inertiel et par champs magnétiques. Tokamaks, transport, modélisation du plasma, bilan d'un réacteur. Paramètres d'opération.

Chauffage du plasma, entraînement de courant. Ravitaillement. Couverture : neutronique, production de tritium, transfert de chaleur, dommages. Aimants. Sécurité. Application à ITER.

NRG9210 TRANSFERT DE LA CHALEUR ET DE L'ÉNERGIE (3 CR.)

Lois fondamentales dans les trois domaines de transfert : quantité de mouvement, chaleur et masse. Propriétés des fluides significatives pour les transferts : phénomènes dans les écoulements, analyse dimensionnelle, notions de couche limite. Modes de transfert de chaleur : conduction thermique, cas d'un écoulement, convection libre, convection à l'intérieur de tuyaux et à l'extérieur de surfaces, transfert avec changement d'état physique, transfert par rayonnement. Transfert de masse. Procédés de transfert de chaleur combinés et échangeurs de chaleur. Nouveaux procédés de stockage et de valorisation de l'énergie thermique.

NRG9211 PHYSIQUE ET CHIMIE DU SOLIDE (3 CR.)

Classification des solides. Liaisons ioniques : thermodynamique, modèle électrostatique, énergie du cristal. Composés covalents : mécanique quantique, orbites moléculaires, calculs orbitaux. Solides diélectriques : polarisation, moments dipolaires, liaison Van der Waal. Métaux : conductivité électrique, chaleur spécifique, structure de bande.

NRG9212 TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX (3 CR.)

Plusieurs techniques de caractérisation de la microstructure et de la composition chimique des matériaux et de leurs surfaces sont présentées : la diffraction des rayons X, la microscopie électronique en transmission (TEM), la microscopie électronique à balayage (SEM), la microscopie Auger à balayage (SAM), la spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS), l'absorption des rayons X (XAS), les spectroscopies X et UV des photoélectrons (XPS et UPS), l'analyse de la structure des surfaces par RHEED et LEED, les microscopies par effet tunnel et force atomique.

NRG9216 NOUVEAUX HORIZONS ET PHOTONIQUE (3 CR.)

Ce cours présente une description approfondie des principes de base de l'optique non linéaire pour les gammes de longueur d'onde infrarouge et fréquences térahertz. La technologie des dispositifs y est également détaillée.

Les étudiantes et étudiants auront l'occasion de comprendre comment les interactions optiques non linéaires peuvent être utilisées pour des applications pratiques et comment les dispositifs associés peuvent opérer dans le domaine des télécommunications, capteurs, métrologie, etc.

Les sujets couverts dans ce cours incluent : les matériaux pour photonique, les principes de base de l'optique non linéaire, l'introduction au térahertz, les lasers intégrés et leurs applications.

NRG9217 DÉPÔT PAR ABLATION LASER (3 CR.)

L'objectif de ce cours est de présenter le dépôt par ablation laser (DAL) comme technique de dépôt d'une vaste gamme de matériaux et de clarifier les principes d'opération, les applications et les limitations de cette technique. En premier

lieu, le cours fera état des aspects fondamentaux du DAL et de ses applications.

La deuxième partie sera consacrée à la cinétique de croissance. La troisième partie portera sur la croissance détaillée et la caractérisation des métaux purs et des alliages. Enfin, dans la quatrième partie, les développements récents et les applications aux ferroélectriques destinées aux dispositifs microondes seront exposés, en utilisant comme exemple le cas des couches minces de BST.

NRG9220 VECTORISATION ET CIBLAGE DU MÉDICAMENT (3 CR.)

Ce cours présentera un aperçu des principes de bases, des concepts physico-chimiques et des méthodologies associées à la vectorisation/ciblage des médicaments.

L'objectif principal de ce cours est de développer une compréhension des méthodes et des technologies fréquemment employées dans ce domaine, plutôt que sur la physiologie humaine ou sur la biologie des maladies abordées.

Ce cours portera attention particulière sur les médicaments anticancéreux ainsi que sur les peptides, protéines et acides nucléiques thérapeutiques.

NRG9800 INTERACTION DES PARTICULES ET DES PLASMAS AVEC LES MATÉRIAUX (3 CR.)

Introduction aux phénomènes d'interaction plasma-surface. Les défauts dans et sur les cristaux : thermodynamique, modèles macroscopiques, modèles atomiques. Théorie des collisions atomiques élastiques et inélastiques ; pénétration des particules énergiques dans la matière, canalisation. Cascades de collisions et production d'amas de défauts. Pulvérisation cathodique (physique). Introduction aux processus chimiques : thermodynamique, cinétique. Adsorption et désorption. L'érosion chimique et la gravure ; synergies entre les effets physiques et chimiques. Diffusion de surface, nucléation, croissance de film. Implantation, synthèse de composés, ségrégation et précipitation, bulles.

NRG9801 SCIENCES ET TECHNOLOGIE DES POLYMÈRES (3 CR.)

Introduction à la science des polymères. Synthèse des polymères. Propriétés en solution, thermodynamique et poids moléculaire. Propriétés à l'état solide des polymères. Viscoélasticité. Dégradation, stabilité et considérations environnementales. Additifs, mélanges et composites. Thermoplastiques et fibres. Élastomères et thermosets. Polymères spéciaux et d'ingénierie. Mise en œuvre et rhéologie. Applications.

NRG9802 PILES À COMBUSTIBLE (3 CR.)

Revue de la technologie des piles à combustible, l'électrochimie des piles à combustible, traitement du carburant, caractéristiques des systèmes de piles à combustible, conception et optimisation des piles, recherche et développement des piles alcalines à combustible, recherche et développement des piles à acide phosphorique, recherche et développement des piles à polymère solide, l'économétrie des piles à combustible, études de marché.

NRG9901 LE TRANSPORT DE CHARGES DANS LES MATÉRIAUX MOLÉCULAIRES ET SES APPLICATIONS (3 CR.)

Ce cours donnera une vue d'ensemble sur les théories de transport de charges dans les matériaux moléculaires. Ce transport peut se faire soit par les trous, soit par les électrons ou être bipolaire. Les formalismes considérés dans cette partie théorique seront le formalisme de désordre, celui des polarons et celui de Sher-Montroll. Des formalismes moins utilisés seront aussi examinés (piège de dipôles, percolation, pièges multiples, effet Poole Frenkel). Les formalismes seront utilisés pour expliquer les résultats obtenus dans certaines applications des matériaux moléculaires. Comme applications, nous verrons soit les photorécepteurs reprographiques organiques (dans ce cas, le cours touchera également à la photogénération de charges dans les solides organiques), soit les dispositifs organiques électroluminescents (dans ce cas, le cours touchera aussi à la génération de photons par électroluminescence et à la stabilité des dispositifs).

ACTIVITÉS OBLIGATOIRES (84 CR.)

NRG8801 EXAMEN DOCTORAL (6 CR.)

L'objectif principal de l'examen doctoral est de vérifier d'une part, si le projet de recherche du membre étudiant a été suffisamment bien défini et, d'autre part, s'il a la préparation suffisante pour mener à bien son projet. Il pourra, par la même occasion, tirer profit de recommandations susceptibles de favoriser la progression de ses travaux. Il est invité à présenter par écrit et à défendre oralement devant jury sa problématique de recherche.

L'examen doctoral a normalement lieu à la fin du cinquième trimestre ou au plus tard durant le sixième trimestre du programme de doctorat.

NRG9205 SÉMINAIRE DE DOCTORAT (1 CR.)

Présentation de sujets d'actualité dans les sciences de l'énergie et des matériaux par des étudiantes et étudiants dans le cadre des séminaires du Centre Énergie Matériaux Télécommunications de l'INRS.

THÈSE (77 CR.)

Chaque étudiante et étudiant est tenu de rédiger une thèse qui démontre son aptitude à mener à bien une recherche scientifique originale. La thèse est présentée devant un jury.