

Doctorat en ingénierie - 3737

CRÉDITS :

90 crédits, Troisième cycle

GRADE, DIPLOME OU ATTESTATION :

Philosophiae doctor (Ph.D.)

OBJECTIFS :

L'objectif général du programme est de former des spécialistes capables de concevoir et d'accomplir de façon autonome un programme de recherche faisant progresser l'état des connaissances dans l'ingénierie des systèmes physiques et des procédés industriels.

Par ingénierie, on entend les activités d'analyse, de modélisation, de simulation, d'études expérimentales, de conception, de contrôle et d'optimisation, mettant à contribution les diverses disciplines de l'ingénieur. Les systèmes physiques correspondent à des ensembles d'éléments régis par les lois physico-chimiques. Les procédés industriels visés sont ceux qui permettent de transformer une matière première, un matériau ou une ressource en lui conférant des propriétés désirées et une valeur économique accrue. Des considérations environnementales cherchent, d'une part, à minimiser les effets des procédés sur le milieu ambiant et, d'autre part, à prévoir et contrôler l'impact de l'environnement atmosphérique sur le fonctionnement des systèmes. Les liens solides établis avec l'industrie sont une caractéristique essentielle de cette recherche scientifique.

Le programme s'adresse aux candidats qui s'orientent vers une carrière de recherche ou d'enseignement en ingénierie ainsi qu'aux ingénieurs qui travaillent notamment dans les industries de transformation et qui ont besoin, dans le cadre de leur fonction, d'une formation poussée en recherche et développement.

Au terme de sa formation, l'étudiant devra avoir acquis les connaissances approfondies de l'ingénierie des systèmes physiques et des procédés industriels et être apte à :

- analyser de façon critique les résultats des publications scientifiques;
- concevoir, élaborer et mener à terme un projet original de recherche;
- travailler dans un contexte interdisciplinaire de recherche;
- mettre en œuvre un processus systématique de solution de problèmes réels définis dans leur contexte global d'ordres scientifique, technologique, environnemental ou socioéconomique;
- communiquer ses résultats de recherche et publier des ouvrages accrédités par la communauté scientifique.

INFORMATION SUR L'ADMISSION :

Lieu d'enseignement	Régime	Trimestres d'admission			Étudiants étrangers		
		Aut.	Hiv.	Été	Aut.	Hiv.	Été
Campus de Rimouski	TC	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	TP	✓	✓	✓			

TC : Temps complet
TP : Temps partiel

CONDITIONS D'ADMISSION :

Base études universitaires au Québec

Être titulaire d'une Maîtrise (M.Sc.A. ou type B), obtenue avec une moyenne de 3.2/4.3 en ingénierie; est également admissible au programme toute personne détentrice d'une maîtrise dans un domaine apparenté.

ou
Être titulaire d'un grade de bachelier dans le domaine concerné et posséder les connaissances requises, une expérience pertinente d'au moins cinq ans et une formation adéquate à la recherche.

Lors du processus d'évaluation des admissions, tout candidat, dont la préparation est jugée insuffisante, peut se voir imposer des cours d'appoint ou un programme de propédeutique.

Le candidat doit avoir une connaissance satisfaisante du français écrit et parlé et posséder des habiletés essentielles de la langue anglaise.

Le candidat doit s'assurer qu'un professeur habilité accepte de superviser sa recherche doctorale.

Base études hors Québec

Être titulaire d'un grade universitaire de 2e cycle en ingénierie et répondre aux conditions exigées sous la base d'admission "études universitaires".

PLAN DE FORMATION :

Activités obligatoires (81 crédits)

Le cours suivant (6 crédits)

6DIG990 Examen doctoral (6 cr.)

La recherche (75 crédits)

6THESER Rapport d'avancement de la recherche (0 cr.)

La personne étudiante doit s'inscrire à 6THESER à partir du 2e trimestre suivant son admission dans le programme, et ce, jusqu'au dépôt initial de sa thèse. Le rapport d'avancement trimestriel doit être fourni au secrétariat du comité de programmes à chaque trimestre, en collaboration avec la direction de recherche.

6DIG993 Séminaire de doctorat (3 cr.)
6THESE Thèse (72 cr.)

Pour compléter son programme, l'étudiante ou l'étudiant doit produire une thèse de 72 crédits. Pour ce faire, elle ou il doit s'inscrire en recherche aux trimestres concernés jusqu'au dépôt de sa thèse.

Activités optionnelles (9 crédits)

Trois cours parmi les suivants :

GÉNIE MÉCANIQUE

6DIG960 Méthodes numériques en mécanique des fluides et en transfert de chaleur (3 cr.)
6DIG973 Sujets spéciaux (3 cr.)
ING72415 Vibration mécanique avancée (3 cr.)
6DIG983 Sujets spéciaux II (3 cr.)
ING70415 Analyse des systèmes dynamiques (3 cr.)
6MIG831 Méthodes de diagnostic et mesures avancées (3 cr.)
6MIG832 Analyse énergétique de systèmes (3 cr.)
6MIG833 Mécanique des solides avancés (3 cr.)
6MIG834 Ingénierie nordique (3 cr.)
6MIG835 Procédés d'assemblages (3 cr.)
ING70615 Optimisation avancée (3 cr.)
ING72315 Méthode des éléments finis, concepts et applications (3 cr.)
6MIG926 Compléments de transfert de chaleur (3 cr.)

GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE

6DIG973 Sujets spéciaux (3 cr.)
6DIG977 Dispositifs d'électronique de puissance (3 cr.)
6DIG980 Les isolants en électrotechnique (3 cr.)
6DIG983 Sujets spéciaux II (3 cr.)
6INF911 Réseaux de neurones (3 cr.)
6MIG810 Commande de machines électriques (3 cr.)
6MIG841 Interactions humain-robot (3 cr.)
6MIG842 Prototypage rapide de systèmes électroniques embarqués (3 cr.)
6MIG843 Systèmes de communication numériques avancés (3 cr.)
ING72315 Méthode des éléments finis, concepts et applications (3 cr.)
ING74115 Conception électronique avancée (3 cr.)
ING74215 Systèmes de conversion de l'énergie électrique (3 cr.)
6MIG930 Ingénierie de la haute tension (3 cr.)
6MIG931 Réseaux d'énergie électrique (3 cr.)

GÉNIE DES MATÉRIAUX ET MÉTALLURGIQUE

6DIG973 Sujets spéciaux (3 cr.)
6DIG974 Caractérisation des matériaux (3 cr.)
6DIG975 Nanotechnologies et nanomatériaux (3 cr.)
6DIG983 Sujets spéciaux II (3 cr.)
6MIG835 Procédés d'assemblages (3 cr.)
6MIG851 Ingénierie des surfaces (3 cr.)
6MIG852 Technologies de mise en forme des matériaux (3 cr.)
6MIG853 Matériaux composites (3 cr.)
6MIG854 Corrosion et dégradation des matériaux (3 cr.)
6MIG914 Processus de solidification et de fonderie (3 cr.)
6MIG927 Métallurgie physique et mécanique avancée (3 cr.)
6MIG928 Métallurgie de l'aluminium (3 cr.)
6MIG932 Séparation solide-liquide (3 cr.)

GÉNIE CIVIL

6DIG973	Sujets spéciaux (3 cr.)
6DIG983	Sujets spéciaux II (3 cr.)
6MIG833	Mécanique des solides avancés (3 cr.)
6MIG844	Bois, produits du bois, systèmes constructifs (3 cr.)
6MIG860	Prévisions hydrologiques d'ensemble (3 cr.)
6MIG861	Analyse des risques en génie civil (3 cr.)
6MIG863	Analyse dynamique des structures (3 cr.)
6MIG864	Conception et analyse de ponts routiers (3 cr.)
6MIG866	Conception des structures en bois (3 cr.) (6MIG844)
ING72315	Méthode des éléments finis, concepts et applications (3 cr.)

Implantation du programme en extension de l'UQAC autorisée lors du conseil d'administration du 8 décembre 2015 (CA-651-8085).

6DIG960**Méthodes numériques en mécanique des fluides et en transfert de chaleur**

Objectif : Rendre l'étudiant capable d'utiliser différentes méthodes numériques permettant de solutionner divers problèmes reliés au processus simultané d'écoulement de fluides et de transfert de chaleur.

Contenu : Équation de conservation. Méthodes aux différences finies. Méthodes intégrales. Différentiation amont. Stabilité. Formulation en variables primitives : méthodes de Patankar et méthode MAC. Formulation en variables secondaires : courant-vorticité, fonctions potentielles. Convections forcée, mixte et naturelle. Problèmes, tests et applications.

6DIG973**Sujets spéciaux**

Objectif : Ce cours est utile pour l'étudiant à temps complet mais aussi pour l'étudiant à temps partiel qui peut ainsi bénéficier d'une formation pertinente même pour un sujet de mémoire tiré de son milieu de travail. Le contenu est variable, selon les besoins des étudiants et l'expertise professorale disponible.

Contenu :**6DIG974****Caractérisation des matériaux**

Objectif : Approfondir les connaissances tant théoriques que pratiques dans le domaine de la caractérisation des matériaux et de leurs surfaces.

Contenu : Notions fondamentales sur les interactions rayonnement-matière et particules-matière. Différentes techniques sont décrites selon leurs caractéristiques (principes de fonctionnement, intérêt, résultats types, limitations). Techniques d'analyse basées sur l'interaction particules-matière : microscopie électronique à balayage, microscopie électronique en transmission, spectroscopie en dispersion d'énergie des rayons X (EDS), spectroscopie en dispersion de longueur d'ondes des rayons X (WDS), spectroscopie en pertes d'énergie des électrons (EELS), spectroscopie Auger, diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD), spectroscopie de masse à ionisation secondaire (SIMS).

Techniques d'analyse basées sur l'interaction rayonnement-matière : radiographie X, spectrométrie de fluorescence X, diffraction des rayons X, spectroscopie de photoémission de rayons X (ESCA). Caractérisation physique des surfaces : approche thermodynamique (tension de surface et adhésion), mesures des angles de contact, évaluation des énergies de surface, morphologie des surfaces et méthodes de mesure, techniques avancées de la mesure de la rugosité aux niveaux micrométrique et nanométrique : profilométrie, interférométrie optique, microscopie à force atomique. Ce cours comporte des séances de travaux pratiques avec les

divers appareils de mesure disponibles, incluant la préparation des échantillons et l'interprétation des résultats.

6DIG975**Nanotechnologies et nanomatériaux**

Objectif : Acquérir des connaissances fondamentales et appliquées concernant les nanosciences et les nanotechnologies et rendre apte à saisir l'impact des nanotechnologies dans diverses applications industrielles.

Contenu : Les connaissances scientifiques et technologiques et les matériaux à l'échelle nanométrique. Fabrication des nanomatériaux : approches de bas en haut (bottom-up) et de haut en bas (top-down), croissance épitaxiale, auto-assemblage. Caractérisations structurale, chimique, optique et électrique des nanomatériaux. Systèmes micro-électromécaniques (MEMS) et nanoélectroniques : puits quantique (quantum well) et transistor à un électron. Dispositifs nanophotoniques : lasers et cristaux photoniques. Dispositifs nanomagnétiques utilisant les propriétés de magnétorésistance et de spintronique (spintronics).

6DIG977**Dispositifs d'électronique de puissance**

Objectif : Permettre à l'étudiant de se familiariser avec l'étude, la conception et l'application industrielle des convertisseurs statiques.

Contenu : Semi-conducteurs de puissance : diodes, thyristors, transistors bipolaires, MOSFET et à grille isolée (IGBT). Protection des semi-conducteurs. Circuits d'amorçage et de commande. Classification des convertisseurs selon les modes opératoires et de communication. Principe de la commutation forcée. Circuits d'aide à la commutation. Étude et conception des convertisseurs statiques : redresseurs, convertisseurs de courant, hacheurs, alimentations à découpage, convertisseurs à résonance, onduleurs. Montages de convertisseurs d'applications industrielles : transport en courant continu, redresseurs de grande puissance et commande des machines électriques. Harmoniques : problèmes causés par les harmoniques, méthodes de filtrage et normes.

6DIG980**Les isolants en électrotechnique**

Objectif : Familiariser l'étudiant avec les principaux types de matériaux isolants utilisés en électrotechnique, avec leur problématique de dégradation et avec les essais d'évaluation pour une conception adéquate des équipements utilisant ces isolants.

Contenu : Étude des principales isolations utilisées en électrotechnique (vide, gaz, liquide, solide ou mixte). Décharge électrique dans les gaz : effet couronne, gênes acoustiques, arcs électriques; influence de l'environnement atmosphérique : décharge et nuisance sous la pluie et la neige, arc de contournement en présence du givre et

du verglas. Mécanismes des décharges partielles, arborescences et décharges électriques. La supraconductivité et ses applications. Étude du vieillissement et de dégradation des isolations, en particulier ceux provoqués par un champ électrique non uniforme. Essais d'évaluation. Méthodes de diagnostics, de contrôles et de surveillance en ligne des appareillages.

6DIG983**Sujets spéciaux II**

Objectif : Fournir à l'étudiant un complément de formation dans son domaine de spécialisation, en relation avec les exigences de son programme.

Contenu : Le contenu du cours est variable, selon la formation et les besoins de l'étudiant en lien avec ses travaux de recherche, et l'expertise professorale disponible. Un plan de cours est préparé par le professeur responsable de l'activité de manière à couvrir les objectifs de formation et les exigences requises pour compléter le programme.

6DIG990**Examen doctoral**

Objectif : L'examen doctoral, contrôlé par un comité d'examen, vise à vérifier si le candidat est en mesure d'évoluer dans son domaine de recherche en ingénierie et s'il a la capacité de mener à terme son projet de recherche.

Contenu : Cet examen, qui doit être complété à la fin du troisième trimestre d'inscription, comporte deux parties distinctes, soit l'évaluation des connaissances de base du candidat dans son domaine de recherche, et la présentation du sujet de thèse devant le jury. Première partie: Dès que l'étudiant s'inscrit à l'examen doctoral, soit au troisième trimestre d'inscription, son directeur de recherche procède à la formation du jury, et informe l'étudiant des connaissances générales qui sont évaluées lors de la première partie de l'examen. L'étudiant, dans cette première partie de l'examen, doit répondre par écrit à une série de questions posées par les membres du jury. Au besoin, les réponses peuvent être complétées oralement devant le jury avant d'entreprendre la deuxième partie de l'examen doctoral. Lorsque la première partie est réussie à la satisfaction du jury, l'étudiant peut poursuivre son examen doctoral. Deuxième partie: La deuxième partie de l'examen consiste en un exposé oral qui se déroule deux semaines après la première partie. Pour ce faire, l'étudiant doit déposer, au plus tard une semaine avant la date prévue pour la présentation orale, un rapport d'une trentaine de pages sur le sujet de sa recherche, sa problématique et le cadre général de sa démarche incluant une revue critique de la littérature, la méthodologie de même que l'approche retenue. L'étudiant doit faire la preuve que son sujet de recherche est original, et que l'échéancier est réaliste. En plus d'exposer oralement le contenu du document préalablement déposé, l'étudiant devra répondre aux questions

des membres du jury. Jury: Le jury d'examen doctoral est nommé par le comité de programme. Il est composé du directeur de programme, qui agit à titre de président, du directeur de recherche, du co-directeur de recherche s'il y a lieu, et d'au moins un professeur externe au projet. L'évaluation de l'activité se fait par la notation S, I ou E. La réussite aux deux parties de l'examen est requise afin d'obtenir la notation S. En cas d'échec, une seule reprise est autorisée. Le délai de reprise est fixé par le jury et ne doit pas dépasser six mois. Un second échec entraîne l'exclusion du programme.

6DIG993**Séminaire de doctorat**

Objectif : Les travaux de la thèse comportent en outre l'obligation du candidat à présenter le contexte global de l'évolution de sa recherche dans le cadre du séminaire de recherche du programme.

Contenu : Présentation orale, normalement entre le sixième et le neuvième trimestre d'inscription, sur l'ensemble des travaux de recherche. Il s'agit d'un rappel des éléments présentés lors de l'examen doctoral; à savoir: la problématique, les objectifs, l'originalité, la recherche bibliographique et la méthodologie retenue. Présentation en détail des résultats obtenus, analyse comparative des résultats des travaux avec ceux déjà publiés et conclusion. Préparation d'un rapport d'une trentaine de pages maximum portant sur les éléments ci-dessus, et remise au jury d'évaluation au moins une semaine avant la présentation orale. Le jury est nommé par le comité de programme. Il est composé du directeur de programme ou de son remplaçant, qui agit à titre de président, du directeur de recherche, du co-directeur de recherche s'il y a lieu, et d'au moins un professeur externe au projet.

6INF911**Réseaux de neurones**

Objectif : Rendre l'étudiant capable de comprendre, de concevoir et de réaliser des systèmes basés sur les réseaux de neurones à des fins d'apprentissage, de mémorisation, de reconnaissance, de commande, etc.

Contenu : La cellule nerveuse physiologique, la connectivité de ces cellules, le neurone formel. Principales différences entre cellules nerveuses et neurones formels : traitement dynamique versus statique. Processus d'apprentissage : Hebb, compétitif, Boltzmann, supervisé, etc. Mémoires matricielles, réseau Dystal, le perceptron, le perceptron multicouche (rétropropagation, contrôle flou de l'apprentissage), les réseaux à fonctions radiales. Réseaux récurrents : modèle Brain State in a Box, réseaux Adaptive Resonance Theory, réseaux à attracteurs fixes ou multiples. Systèmes auto-organisés : apprentissage hebbien, apprentissage compétitif, apprentissage par calcul d'entropie. Réseaux pour le traitement temporel. Dynamique des réseaux de neurones : manipulation des attracteurs. Liens entre réseaux de

neurones et logique floue, apprentissage automatique des fonctions d'appartenance, applications aux cartes de Kohonen et aux réseaux d'Hopfield. Algorithmes évolutifs, techniques d'apprentissage de réseaux de neurones par algorithmes évolutifs, comparaisons.

6MIG810

Commande de machines électriques

Objectif : Permettre à l'étudiant d'acquérir des connaissances dans le domaine de l'alimentation électronique et en commande intelligente des machines électriques les plus utilisées : machine à courant continu, machine asynchrone triphasée, machine sans brosses et machine à réluctance variable.

Contenu : Rappels sur les convertisseurs d'électronique de puissance. Généralités sur les entraînements à vitesse variable. Variation de vitesse et commande d'un moteur à courant continu. Variation de vitesse et commande d'un moteur asynchrone : modèle de la machine dans les différents repères, commande vectorielle directe et indirecte, commande directe de couple, commande sans capteur mécanique. Variation de vitesse et commande d'une machine sans brosses. Variation de vitesse et commande d'une machine à réluctance variable.

6MIG831

Méthodes de diagnostic et mesures avancées

Objectif : Présenter aux étudiants les principes et techniques des mesures en ingénierie, incluant la détermination des paramètres physiques primaires et dérivés ainsi que les méthodes de diagnostic des champs et des structures.

Contenu : Notions de base. Les éléments d'une chaîne de mesure (capteur, transmetteur, unités d'affichage et d'enregistrement). Conversion des grandeurs physiques à des signaux standardisés. Exactitude, précision, sensibilité. Étalonnage (calibration). Mesures absolues et comparatives. Mesures par déflexion et mesures par compensation. Mesures des différentes grandeurs physiques: température, pression, déformation, vitesse. Capteurs électriques, pneumatiques et optiques ou fibroptiques. Méthodes non-invasives. Mesures directes des champs des grandeurs physiques: imagerie infrarouge, interférométrie, vélocimétrie par imagerie des particules (PIV). Mesures des grandeurs dérivées: conductivité thermique et électrique, diffusivité, chaleur massique etc.

6MIG832

Analyse énergétique de systèmes

Objectif : Rendre l'étudiant apte à évaluer les besoins et ressources énergétiques, à comprendre les différents systèmes énergétiques et à maîtriser les principes de la conception des systèmes énergétiques industriels, commerciaux et domestiques.

Contenu : Énergie et société, énergie et environnement, systèmes énergétiques ouverts. Structure des demandes et des

ressources énergétiques. Caractérisation des ressources énergétiques. Disponibilité et demande, couplage. Transformation, stockage et transport d'énergie. Ressources renouvelables, gestion et conservation d'énergie. Appareillage d'énergétique : échangeurs de chaleur régénératifs et récupérateurs. Conception thermique, hydrodynamique, mécanique; vibrations, encrassement. Chaudières, capteurs solaires, réacteurs nucléaires. Échangeurs à contact direct et indirect. Énergétique des bâtiments. Chauffage et climatisation. Climatisation partielle et complète. Contrôle de l'humidité. Facteurs de confort humain. Considérations énergétiques de l'enveloppe des bâtiments: résistance et capacité thermique, filtration, condensation, fenestration. Contrôle de qualité de l'air. Tours de refroidissement.

6MIG833

Mécanique des solides avancés

Objectif : Rendre l'étudiant apte à analyser le comportement des matériaux d'ingénierie sous l'effet des charges externes mécaniques, afin de supporter la conception des nouvelles composantes et machines.

Contenu : Récapitulation des notions sur l'état de contraintes et de déformations dans les solides. Survol des méthodes mathématiques comme les tenseurs de contraintes et de déformations, cercles de Mohr. Lois de comportement, éléments de rhéologie. Déformations élastiques et plastiques. Fluage, écrouissage. Comportement non-linéaire des matériaux, non linéarité de nature géométrique et grandes déformations, condition de contact et frottement. Résistance mécanique à hautes températures. Chargement statique et cyclique, fatigue. Critères de dimensionnement, méthodes analytiques et numériques de calcul.

6MIG834

Ingénierie nordique

Objectif : Familiariser l'étudiant aux problèmes d'ingénierie causés par la neige, le givre et la glace, et le renseigner sur les techniques de dégivrage développées pour contrer les problèmes rencontrés.

Contenu : Physique de la glace. Structure cristalline. Germination et croissance des cristaux de glace. Glace atmosphérique, d'eau douce et d'eau de mer. Humidité et précipitations atmosphériques en bas de 0°C: neige, grêle, pluie verglaçante, gelée, brouillard givrant, pluie et brume verglaçante. Caractéristiques des dépôts de glace: verglas, givre lourd et givre léger. épaisseur radiale équivalente, résistance mécanique et adhérence en tension et en compression et cisaillement. Glace mono et polycristalline. Facteurs affectant l'adhérence. Mesure de l'adhérence. Force exercée par un couvert de glace Poids de la glace, charge éolienne,. Prévention du givrage: moyens mécaniques, thermiques, et chimiques avec produits dégivrants et antigivrants. Substances glaciophobes; évaluation de leur efficacité, paramètre à

considérer Couvert de neige: déposition et métamorphose. Propriétés de la neige sèche et mouillée. Accumulation sous l'effet du vent. Moyens de transport sur la neige. Techniques de déneigement: méthodes mécaniques, thermiques et chimiques (sels et abrasifs).

6MIG835

Procédés d'assemblages

Objectif : Familiariser avec les principales techniques industrielles d'assemblage. Connaître les mécanismes physiques ainsi que les avantages et inconvénients de diverses méthodes d'assemblage et être en mesure de concevoir un assemblage.

Contenu : Différents types d'assemblage. Types d'assemblage mécanique (boulonné, riveté, etc.) et types de sollicitation. Calcul et critère de conception. Procédés de soudage; descriptions des procédés, avantages et inconvénients, symboles de soudage. Techniques de brasage; descriptions des procédés, avantages et inconvénients. Métallurgie du soudage et du brasage; effets des paramètres (température, alliage, vitesse, etc.); défauts et défaillances. Colles et adhésifs; mécanismes d'adhésion et modes de rupture. Critères de choix et conception d'assemblages.

6MIG841

Interactions humain-robot

Objectif : L'objectif général du cours est d'outiller et de familiariser l'étudiant aux particularités de l'interaction humain-robot et de la perception humaine, par l'approche de la boucle perception-décision-action.

Contenu : Élément d'instrumentation biomédical: définition, potentiel d'action, système d'acquisition dédié à la mesure d'un paramètre physiologique (gestuelle, démarche, sonore, haptique) ou d'un des signes vitaux (conception des capteurs biophysiques: EEG, EMG, ECG, pléthysmographie) de l'humain. Conception de systèmes de reconnaissance de certains paramètres humains: connaissance des symptômes associés à l'ergonomie au travail, les accidents de travail, des maladies dégénératives, ou occasionnant des déficiences motrices (parkinson, dystrophie musculaire, amputation). Étude approfondie des retours sensorimoteurs: modéliser le système sensorimoteur humain dans une boucle d'interaction et en étudier son impact (modélisation physique et biophysique des réflexes, des sens et de l'interaction), concevoir une technique de retour sensoriel (visuel, sonore ou haptique) utilisant un robot ou un dispositif portatif (conception d'actionneurs bioniques ou mécatronique comme un exosquelette, une prothèse de la main et du bras), interactions sociales, physiques et sans contact. Techniques liées à la méthodologie expérimentale afin d'évaluer le système interactif (méthode d'évaluation psycho-physique) tout en considérant les normes et la politique de l'éthique canadienne.

6MIG842

Prototypage rapide de systèmes électroniques embarqués

Objectif : Apprendre et approfondir les notions du prototypage rapide de systèmes embarqués sur des plate-formes matérielles à base de microcontrôleurs et de circuits programmables.

Contenu : Conception et vérification à haut niveau, développement d'algorithmes, implémentation sur des architectures des circuits programmables avancés. Méthodologies pour le prototypage rapide de systèmes embarqués: synthèse par des langages de haut niveau, systèmes mixtes (matériel - logiciel), utilisation de modules préconçus, choix et utilisation des puces préconçus, conception de modules matériels (langage VHDL). Logiciels dédiés pour le prototypage rapide de systèmes numériques: description, simulation, synthèse, vérification et programmation de circuits. Considérations mécaniques: conception du circuit imprimé, du montage, du boîtier et impression 3D. Conception et réalisation d'un système embarqué.

6MIG843

Systèmes de communication numériques avancés

Objectif : Introduire aux concepts fondamentaux en communication numérique complexe: modulation, codage du canal, égalisation, estimation d'erreur. Comprendre les problèmes liés à la transmission des données et acquérir les outils nécessaires à la conception de nouveaux systèmes ou à la modélisation de systèmes existants. Comprendre le principe de l'étalement de spectre, modulation à spectre étalé à sauts de fréquence, communication sans fil, communication mobile, les systèmes MIMO.

Contenu : Rappel sur les signaux et traitement du signal numérique. Classification des signaux. Densité spectrale. Autocorrélation. Signaux aléatoires. Transmission du signal à travers les systèmes linéaires. Bande passante de données numériques. Formatage de données textuelles (codage des caractères). Rappel sur le formatage des données et modulation. Formatage des informations analogiques. Sources de bruit et modulation par impulsion codée. Quantification uniforme et non uniforme. Modulation en bande de Base. Codage corrélatif. Démodulation et détection en bande de base et bande passante. Signaux bruités et détection binaire dans un bruit Gaussien. Interférence inter-symboles et égalisation du canal. Techniques de modulation. Détection cohérente et non cohérente. Performance d'erreur. Codage du canal. Codage du signal. Types de contrôle d'erreur. Séquences structurés. Codage par bloc linéaire. Détection d'erreur et la capacité de la correction. Codage cyclique. Codage convolutionnel. Propriétés des codes de convolution. D'autres algorithmes de décodage. MIMO systèmes et caractérisations. Multiplexage. Allocation des ressources

de communication. Accès Multiple en système de communication. Système et architecture. Algorithmes d'accès. Techniques d'accès multiple pour un réseau local. Techniques d'étalement du spectre. Séquences Pseudo-aléatoires. Étalement du spectre et applications. Modulation par saut de fréquence. Communications mobile. Canaux à évanouissement. Le défi en communication sur des canaux à évanouissement. Caractérisation de la propagation mobile. Principaux paramètres caractérisant les canaux à évanouissement. Modélisation de l'évanouissement. Évanouissement de Rayleigh. Applications: Atténuer les effets des évanouissements sélectifs en fréquence. Capacité d'une communication sous atténuation de Rayleigh. Station de base à M antennes en présence de mobiles. Description du système. Traitement linéaire (et non linéaire) optimal. Analyse de performances. Capacité.

6MIG844

Bois, produits du bois, systèmes constructifs

Objectif : Présenter le bois, les produits d'ingénierie du bois, les systèmes constructifs et les assemblages pour en faire une utilisation optimale dans un contexte de construction.

Contenu : Le bois et la construction (architecture ancienne et contemporaine utilisant le bois). Interaction forêt-arbre-bois. Les atouts écologiques du bois et le développement durable. Approche anatomique (essences de bois, provenances, variabilités, spécificités, singularités, utilisations). Vers un matériau de construction normalisé (dimensions, règles de classement). Bois composite naturel. Propriétés physiques (densité, hygroscopie, retrait, gonflement, séchage, température). Propriétés mécaniques (Viscoélasticité, fatigue, fluage, effet mécanosorptif, loi de comportement, matrice de rigidité). Propriétés thermiques, comportement au feu. Durabilité. Produits et traitements de préservation et de finition. Les produits d'ingénierie du bois (bois abouté, lamellé collé, lamellé croisé ou CLT, fermes de toit, murs préfabriqués, poutrelles de plancher en I et ajourées, microlames ou LVL, LSL et OSL, Parallam, panneaux de fibres et de particules, panneaux lattés, contreplaqués). Notions de performances énergétiques et écohabitation. Systèmes constructifs en bois usuels et innovants (ossature légère, système poteaux-poutres, combinaison, massif avec bois lamellé collé croisé, fermes de gros bois, arches en bois lamellé collé, résilles et coques, structures tridimensionnelles, hybrides). Principes et propriétés des assemblages.

6MIG851

Ingénierie des surfaces

Objectif : Acquérir des connaissances approfondies et techniques dans le domaine de l'ingénierie des surfaces.

Contenu : Principes de base en ingénierie des surfaces. Initiation aux

principales méthodes de revêtements et traitements de surface des métaux, bois, polymères et autres matériaux. (Plaquage, électro plaquage, système de peinture, sablages, attaques chimiques, passivation de surfaces, méthodes au plasma, anodisation, électromodification) Modifications des propriétés des matériaux (dureté, résistance au frottement résistance au choques, propriétés thermiques, électriques, optiques et magnétiques, augmentation de l'adhérence, propriétés superhydrophobes et glaciophobes). Tribologie (Sciences du frottement). Interaction solide gazeux, solide liquide (théorie de diffusion). Familiariser avec les propriétés et l'utilisation des revêtements et traitements de surface de lutte contre la corrosion et l'usure des matériaux métalliques. Sensibiliser aux nouveaux procédés et à ceux en développement. Techniques de caractérisation des surfaces.

6MIG852

Technologies de mise en forme des matériaux

Objectif : Acquérir des connaissances techniques et approfondies en technologie de la mise en forme des matériaux.

Contenu : Principes généraux de formage des matériaux, métaux polymères céramiques. Phénomènes physiques et techniques industrielles utilisés pour la mise en forme des matériaux métalliques, des polymères et des céramiques, à leurs limitations ou avantages réciproques pour la conception de produits en insistant sur les évolutions de ces procédés. Mise en forme à l'état liquide. Mise en forme à l'état pâteux. Mise en forme à l'état solide. Mise en forme à l'état semi solide. Classification des procédés de mise en forme. Conception de produits, applications des procédés. Critères de qualité des produits formés et défauts décelés. Projet de conception pour la mise en forme de produits. Laboratoires de mise en forme.

6MIG853

Matériaux composites

Objectif : Acquérir des connaissances spécialisées dans le domaine des matériaux composites.

Contenu : Principes de base en matériaux composites. Fabrication des matériaux composites. Composites à partir de métaux, polymères, céramiques. Théorie des multicouches. Matériaux superdurs Comportement mécanique des matériaux composites. Lois de la micromécanique. Application des critères de rupture aux composites. Comportement mécaniques des composites contenant des polymères. Systèmes polymères multiphasés. Conception mécanique de pièces et assemblages en matériaux composites. Dégradation des matériaux composites. Projet de conception d'un système en matériaux composites.

6MIG854

Corrosion et dégradation des matériaux

Objectif : Acquérir des connaissances spécialisées en corrosion et dégradation des matériaux. Acquérir des connaissances sur la lutte à la corrosion.

Contenu : Mécanismes de corrosion des matériaux, thermodynamique, cinétique et morphologie. Corrosion électrochimique, corrosion sous-contrainte, Oxydation à haute température. Corrosion en industrie (pétrolière, nucléaire, portuaire), Lutte à la corrosion, méthodes de détection de la corrosion. Caractérisation de la corrosion. Dégradation des matériaux : endommagement, rupture et fatigue: approche microscopique, mécanique de la rupture et de l'endommagement. Dégradation des matériaux par les cycles de température, rayonnement UV, érosion des matériaux par la pluie et le sable.

6MIG860

Prévisions hydrologiques d'ensemble

Objectif : Outiller l'étudiant en vue de la production de prévisions hydrologiques probabilistes à l'aide de modèles hydrologiques physiques, conceptuels et à base de réseaux de neurones. Spécifiquement, l'étudiant devra distinguer les prévisions déterministes des prévisions d'ensemble. Monter un système de prévisions hydrologiques d'ensemble à base de réseaux de neurones sous l'environnement Matlab. Comprendre le fonctionnement et la mise en place d'un modèle hydrologique physique. Évaluer la performance des prévisions hydrologiques d'ensemble et déterministes. Comprendre la raison d'être des procédures d'assimilation de données et de post-traitement des prévisions.

Contenu : Types de prévisions météorologiques et hydrologiques, principaux modèles atmosphériques et hydrologiques; Réseaux de neurones; Modèles hydrologiques conceptuels, en particulier GR4J; Modèles hydrologiques physiques, en particulier HYDROTEL; Nomenclature, conversion de formats de fichiers sous Matlab, organisation d'un système de prévisions hydrologiques d'ensemble; Assimilation des données: assimilation manuelle, par filtre de Kalman et par filtre particulaire; Évaluation de la performance des prévisions: scores numériques, diagramme de fiabilité et histogramme de rang; Post-traitement statistique des prévisions probabilistes. Évaluation de la performance économique des prévisions: score ROC et lien avec l'optimisation de la production hydroélectrique.

6MIG861

Analyse des risques en génie civil

Objectif : Acquérir les méthodologies d'analyse de l'impact de différents risques naturels sur les collectivités, les territoires et les personnes et les ouvrages bâtis en particulier. Sensibiliser à la réglementation et à la pratique de la prévention de ces risques.

Contenu : Le contenu de ce cours peut préparer à des métiers variés autour des problématiques d'identification des aléas, d'évaluation des risques et leur

gestion, d'expertise pour le compte des décideurs politiques et de l'Administration etc. Le programme aborde différents aléas dont on présente les origines, les mécanismes d'apparition, les facteurs aggravants, les probabilités d'occurrence, l'évaluation de l'intensité, les conséquences vis à vis d'enjeux repérés. Les mesures de réduction des risques, l'aspect réglementaire, les pratiques de prévention sont traités. Le programme comporte des exposés généraux et des applications particulières à certains types d'aléas: Introduction générale sur les notions d'aléas, de vulnérabilité, des enjeux, des risques; Méthodologie d'évaluation des risques. étude de cas; L'aléa sismique et l'aléa volcanique; L'aléa crues et inondation; L'aléa retrait-gonflement; La vulnérabilité des ouvrages et des territoires aux mouvements de terrain.

6MIG863

Analyse dynamique des structures

Objectif : Analyser dynamique des structures en génie civil. Voir les concepts théoriques de base servant au calcul de la réponse de structures soumises à des chargements d'intensité variable dans le temps, notamment les séismes. Étudier le comportement de systèmes à un degré de liberté en développant le spectre de réponse à différentes sollicitations, notamment les sollicitations de type harmonique, les impacts et les séismes. Faire l'étude élargie des systèmes à plusieurs degrés de liberté, en particulier leur comportement sous sollicitations sismiques.

Contenu : Caractéristiques d'un problème dynamique. Méthodes de discrétisation: masses concentrées, coordonnées généralisées, éléments finis. Formulation des équations du mouvement. Systèmes à 1 degré de liberté: réponse dans le temps, réponse en fréquence, intégration numérique, système non linéaire, système généralisé, réponse à un tremblement de terre. Système à plusieurs degrés de liberté: évaluations des propriétés structurales, réponses modales, calcul d'erreur, correction statique, réduction des coordonnées, méthodes numériques de calcul des valeurs et vecteurs propres, amortissement. Effets des tremblements de terre: caractérisation des tremblements de terre, réponse des systèmes à un et à plusieurs degrés de liberté, réponse des ponts.

6MIG864

Conception et analyse de ponts routiers

Objectif : Concevoir et analyser des structures de ponts routiers selon les normes canadiennes en vigueur. Familiariser avec les normes et méthodes de calcul dans le contexte du calcul aux états limites, la maîtrise des règles de bonne pratique et des notions relatives à la durabilité.

Contenu : Introduction à l'histoire des ponts routiers et des types de ponts modernes, énumération des étapes de construction. Présentation des éléments

Description des cours

principaux de la norme canadienne CAN/CSA-S6: États limites, charges, combinaisons, méthodes d'analyse (distribution des charges), notion de fatigue structurale. Modélisation des composantes structurales d'un pont à l'aide d'un logiciel commercial. Conception et calcul des éléments du tablier (dalles, poutres, diaphragmes), appareils d'appui, chevêtres, piliers et fondations. Notions de calcul parasismique.

6MIG866

Conception des structures en bois

Objectif : Donner les compétences de base nécessaires pour appréhender la conception des structures et ouvrages en bois, dans les secteurs du résidentiel, du non résidentiel et dans le domaine des ouvrages d'art. Rendre apte à effectuer les calculs associés à la conception dans le contexte de la réglementation.

Contenu : Codes et objectifs, réglementations et certifications canadiennes et internationales. Prédimensionnement et dimensionnement. Calculs éléments fléchis, éléments tendus et comprimés, éléments comprimés perpendiculaires au fil, éléments combinés. Typologie et calculs des assemblages (théorie, boulons, goujons, clous, rivets, vis, disques de cisaillement et anneaux fendus, étriers, ancrages, nouveaux connecteurs). Calculs diaphragmes et murs de refend. Gestion des interfaces avec la maçonnerie. Comportement au feu des éléments structuraux en bois, des assemblages et sécurité incendie. Étude de cas (pont, stade de soccer, aréna...). Calculs et logiciels structure avec module bois. Étude des multiétages en bois et des structures hybrides.

6MIG914

Processus de solidification et de fonderie

Objectif : Rendre l'étudiant apte à utiliser les notions de thermodynamique, de transferts de chaleur et de masse pour décrire et modéliser les phénomènes qui accompagnent la solidification.

Contenu : Familiariser l'étudiant avec les techniques de fonderie. Solidification d'alliages polyphasés : aspects microscopiques et macroscopiques. Thermodynamique et cinétique de la germination et de la croissance des grains; redistribution du soluté, stabilité et morphologie de l'interface liquide-solide; cas des alliages entectiques. Transfert de masse et de chaleur au cours de la solidification : effets structuraux. Notions de solidification rapide. Aspects technologiques de la fonderie. Traitement du métal liquide : fusion, dégazage, nettoyage, modification; application aux alliages d'aluminium. Caractérisation des procédés de fonderie courants. Phénomènes à l'interface moule-métal.

6MIG926

Compléments de transfert de chaleur

Objectif : Familiariser l'étudiant avec des phénomènes complexes de transfert de chaleur rencontrés dans divers procédés industriels.

Contenu : Transfert de chaleur avec changement de phase : régimes d'ébullition et de condensation, régimes d'écoulement bi-phasique, effets de la géométrie. Rayonnement thermique : caractéristiques des matériaux, effet de forme, corps semi-transparents, gaz clair et chargé de particules. Conduction de la chaleur dans les métaux, les diélectriques, les systèmes bi-phasiques, les matériaux composites, granulaires et fibreux; effet de la température. Rayonnement inter-granulaire. Méthodes de chauffage à travers la surface externe : par contact, par convection et par rayonnement. Méthodes de chauffage par source de chaleur interne : par courant électrique et par ondes électromagnétiques. Méthodes d'augmentation et de suppression des échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement. Principes de fonctionnement et conception d'appareillages : récupérateurs, régénérateurs, capteurs solaires et thermosiphons.

6MIG927

Métallurgie physique et mécanique avancée

Objectif : Conduire l'étudiant à une compréhension approfondie des théories de la physique et de la mécanique des métaux et alliages métalliques.

Contenu : Structure des métaux, propriétés physiques intrinsèques, liaisons métalliques, imperfections et impuretés. Théorie de la plasticité appliquée aux métaux, texture et réseaux de dislocations. Durcissement structural. Phénomène de diffusion, de restauration et de recristallisation. Phénomènes de fluage et de superplasticité. Fatigue-endurance, fatigue oligocyclique, mécanismes. Mécanique de la rupture.

6MIG928

Métallurgie de l'aluminium

Objectif : Rendre l'étudiant capable d'établir des corrélations entre la composition, la microstructure, les traitements thermiques et thermomécaniques et les propriétés des alliages d'aluminium.

Contenu : Constitution des principaux alliages d'aluminium; leurs propriétés et domaines d'application. Étude de la structure du métal à l'état brut après coulée. Rappels sur la diffusion à l'état solide. Traitement thermique des alliages d'aluminium, aspects fondamentaux : transformation de phase dans les alliages d'aluminium à l'état solide. Études microstructurales des phases durcissantes métastables et des phases stables. Durcissement par précipitation et par écrouissage; traitement de mise en solution, recuit, vieillissement. Aspects métallurgiques de mise en forme (restauration, recristallisation statique et dynamique) d'alliages d'aluminium. Assemblage (soudage, brasage). Propriétés des alliages commerciaux. Développement

de nouveaux alliages. Éléments de métallurgie des poudres.

6MIG930

Ingénierie de la haute tension

Objectif : Familiariser l'étudiant aux phénomènes et aux techniques reliés à la haute tension.

Contenu : Production et mesure de hautes tensions en laboratoire : tension continue, alternative et de choc. Génération et mesure des courants : courant de fuite et courant fort. Essais du matériel haute tension. La maîtrise des champs électriques et applications à la conception des équipements. Configurations des réseaux et des postes. Éléments des réseaux de transport : définition, fonction, conception et construction des appareillages à haute tension (disjoncteurs, sectionneurs, fusibles, condensateurs, câbles, transformateurs de puissance, parafoudres). Techniques statistiques de coordination de l'isolement. Étude approfondie des mécanismes d'amorçage d'une décharge dans l'air et application au dimensionnement des réseaux.

6MIG931

Réseaux d'énergie électrique

Objectif : Familiariser l'étudiant aux outils d'analyses et de protections des réseaux électriques.

Contenu : Architecture des réseaux électriques. Rappel de notions d'analyse de circuits triphasés et des composantes symétriques. Réseaux d'impédances séquentielles (directs, inverses et homopolaires). Circuits équivalents séquentiels d'une ligne, d'une machine synchrone et d'un transformateur. Calcul des matrices d'impédances et d'admittances. Courant de court-circuit (entre deux phases, une phase et la terre, etc.). Phénoménologie de la foudre. Étude des surtensions d'origines externes ou atmosphériques. Génération et propagation des surtensions dans un réseau électrique : surtension de manoeuvre à fréquence industrielle et surtension de foudre. Réflexion des ondes. Protection des lignes de transport contre les surtensions. Systèmes de mise à la terre des réseaux. Bobines d'extinction. Protection des réseaux contre les surintensités (courts-circuits) dissymétriques. Principaux types de relais : protection de distance, directionnelle et différentielle.

6MIG932

Séparation solide-liquide

Objectif : Familiariser l'étudiant de façon approfondie avec les phénomènes physico-chimiques pertinents à la séparation solide-liquide et avec quelques procédés industriels.

Contenu : Caractérisation des particules suspendues dans un liquide : types de distribution, échantillonnage, mesures en laboratoire et en ligne, définitions de l'efficacité de séparation. Thermodynamique de la séparation solide-liquide. Coagulation et floculation : modèles colloïdal et à double couche, phénomènes électrocinétiques et

potentiel zeta, floculation par polyélectrolytes, distinction entre floculation orthocinétique et péri-cinétique, gradient de vitesse constant et variable, optimisation des conditions de floculation, floculateurs industriels. Clarification par gravité et épaisseur : conception et mise à l'échelle. Hydro-cyclone: profils d'écoulement, mouvement des particules, écoulement disphasique turbulent, conception et mise à l'échelle. Filtration : média de filtration et sélection, relations débit-pression, gâteau incompressibles et compressibles, liquides non newtoniens, lavage du gâteau, méthodes pour limiter la formation du gâteau.

6THESE

Thèse

Objectif : La thèse constitue un travail de recherche original et autonome, contribuant à l'avancement des connaissances théoriques et appliquées, et à des développements dans le domaine de l'ingénierie des systèmes physiques et des procédés industriels.

Contenu : L'étudiant est fortement incité à produire au moins un article dans une revue scientifique à comité de lecture.

6THESER

Rapport d'avancement de la recherche

Objectif : Réaliser un rapport d'avancement trimestriel avec la direction de recherche.

Contenu : Complétion du rapport d'avancement en fonction du plan de travail initial. Progression de la recherche dans le cadre des études doctorales.

ING70415

Analyse des systèmes dynamiques

Objectif : Acquérir les bases conceptuelles et maîtriser les outils couramment utilisés pour l'analyse et la commande automatique des systèmes dynamiques.

Contenu : Systèmes linéaires continus et discrets. Transformée de Laplace. Équations différentielles ordinaires. Transformée en Z. Équations aux différences. Outils d'analyse classiques et structures de modèles : fonctions de transfert, modèles d'état, équations d'entrée-sortie. Modèles empiriques et modèles physiques ou phénoménologiques. Introduction au bruit et structures stochastiques (OE, ARX, ARMAX, BJ). Identification des systèmes en présence de bruit. Introduction au filtrage optimal de Kalman. Applications à la commande des systèmes dynamiques.

ING70615

Optimisation avancée

Objectif : Maîtriser les notions fondamentales et les méthodes avancées en optimisation des systèmes.

Contenu : Optimisation des systèmes linéaires. Optimisation des systèmes non linéaires. Méthodes de recherche

systématiques avec ou sans contraintes. Optimisation des systèmes séquentiels. Théorie de la décision et optimisation stochastique. Applications aux problèmes de conception et de commande des systèmes.

ING72315

Méthode des éléments finis, concepts et applications

Objectif : Maîtriser la méthode d'analyse par éléments finis pour la modélisation et la simulation numérique de systèmes complexes.

Contenu : Approche directe d'analyse matricielle. Fonctions d'interpolation et intégration numérique. Formulations compatibles de divers types d'éléments. Problèmes aux valeurs propres. Étude des systèmes linéaires. Analyses non linéaires. Formulations variationnelles : mixte, généralisée et hybride. Méthodes des variations et des résidus pondérés. Modèles axisymétrique, 2D et 3D. Applications : Modèles mécaniques, modèles thermiques et modèles AC/DC. Modèles multi-physiques : Modèles thermomécaniques et modèles électromagnétiques-thermiques.

ING72415

Vibration mécanique avancée

Objectif : Maîtriser les notions et les méthodes avancées en mesure et en analyse des vibrations mécaniques.

Contenu : Révision des principes, des concepts et des méthodes de base à l'aide de systèmes à deux degrés de liberté. Application de ces concepts aux systèmes à plusieurs degrés de liberté. Formulation des problèmes pour des systèmes complexes. Méthodes numériques dans la résolution des systèmes d'équations. Introduction à la méthode de Lagrange et à son utilisation dans la formulation de problèmes plus complexes. Méthodes analytiques et analyse modale. Décrément logarithmique. Résonances et amortissement. Notions sur les techniques expérimentales de mesure et d'analyse des vibrations

ING74115

Conception électronique avancée

Objectif : Familiariser l'étudiant avec les outils CAO pour la conception avancée en génie électrique.

Contenu : Étapes du processus de conception en génie électrique (ingénierie, conception et fabrication assistée par ordinateur). Schémas électriques avancés et schémas de câblage. Conception de plaquettes avancées de circuit imprimé (PCB). Approfondissement d'un langage de conception matérielle (HDL). Démarche de conception numérique de circuits séquentiels avancés par l'utilisation de puces FPGA. Expérimentation et développement sur cartes prototypes.

ING74215

Systèmes de conversion de l'énergie électrique

Objectif : Approfondir et appliquer les

connaissances liées à l'étude, à l'analyse et au contrôle des systèmes de conversion de l'énergie électrique.

Contenu : Généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie électrique : production, transport, stockage et utilisation de l'énergie. Conversion électrique-électrique, conversion électromécanique. Transformateurs monophasés et triphasés : structure, constitution, modélisation et fabrication. Alternateurs et moteurs électriques : principe, constitution, modèles de régime permanent et de régime transitoire, applications. Convertisseurs statiques : redresseurs, onduleurs, hacheurs. Commande et contrôle des dispositifs de conversion de l'énergie électrique. Contrôle de la tension et de la fréquence. Commande et contrôle des ensembles convertisseurs-machines : principe de variation de vitesse des machines à courant continu et à courant alternatif, autopilotage, commande scalaire, commande vectorielle, réglage du couple et de la vitesse, alimentation électronique des machines. Applications : alternateurs hydrauliques, système de génération distribuée, systèmes d'énergies renouvelables, liaison HVDC, variateurs de vitesse industriels, système de traction et de propulsion électrique.