





5.00 crédits	30.0 h + 22.5 h	Q2
--------------	-----------------	----

Enseignants	Delannay Laurent ;Pardoen Thomas ;
Langue d'enseignement	Anglais
Lieu du cours	Louvain-la-Neuve
Préalables	<p>Les étudiants seront familiers avec les concepts de base:</p> <ul style="list-style-type: none"> • de la science des matériaux : microstructures, défauts, diffusion à l'état solide, transformations de phase, rudiments d'électrochimie, bases des phénomènes de déformation et rupture des matériaux ; • de la mécanique des milieux continus (tenseurs des contraintes et des déformations) et de la mécanique des solides déformables (thermoélasticité linéaire) qui ont été enseignés dans le programme de bachelier en science de l'ingénieur.
Thèmes abordés	<p>Tous les grands domaines technologiques sont impactés par les questions de vieillissement et de durabilité des matériaux. Les questions de durée de vie des structures et installations sont centrales pour une majorité de secteurs industriels comme l'aéronautique, le nucléaire, le maritime, le biomédical, le ferroviaire, la microélectronique, l'automobile, l'éolien, le spatial, etc. On parle aussi bien de leur fonctionnement en conditions nominales qu'en conditions extrêmes (en cas de tremblement de terre, d'incendie, d'inondation, d'explosion). Les enjeux sont multiples. C'est d'abord une question de sécurité des personnes de pouvoir prédire la fin de vie d'un matériau par rapport aux performances attendues ; c'est ensuite une question environnementale centrale – aujourd'hui il est crucial d'étendre la durée de vie de technologies par de nouveaux matériaux ou des revêtements performants ; c'est certainement aussi une question de coût économique lié au remplacement ou la réparation des installations ; c'est enfin lié à la question éthique de l'obsolescence programmée ou parfois seulement de la non optimisation voulue des produits. Ce sujet est à la fois passionnant et complexe car il exige de prendre en compte de nombreux phénomènes interagissant entre eux, convoquant ainsi un grand nombre de disciplines fondamentales de l'ingénieur. L'objectif du cours est de pouvoir donner les clés scientifiques et techniques pour pouvoir aborder des questions aussi variées que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quels mécanismes limitent la durée de vie des éoliennes ? • Quels processus induisent la dégradation des batteries au lithium ? • Comment choisir un matériau pour le divertor des futurs réacteurs de fusion thermonucléaire à même de supporter des radiations neutroniques intenses, de très hautes températures et l'érosion ? • Qu'est ce qui gouverne le vieillissement des tiges implantées dans le dos d'enfants scolioïtiques et destinées à redresser la colonne ? • Quels sont les risques de pollution nucléaire lors du stockage des déchets de haute activité ? • Pourquoi la durée de vie de certains composants microélectroniques est si limitée ? Peut on faire mieux ? • Comment dimensionner les composites polymères renforcés par des fibres de carbone utilisés en aéronautique par rapport aux risques de vieillissement au contact d'huiles et autres solvants ? • Quels facteurs limitent la durée de vie des turboréacteurs dans les parties les plus chaudes des moteurs ? <p>Les grands thèmes abordés dans le cours concerneront</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. le positionnement global des problèmes de durabilité des matériaux dans le contexte du développement durable et de la sécurité des personnes, structures et installations; 2. la description des phénomènes physiques et chimiques affectants le vieillissement et la durabilité des matériaux. Cela comprend les perturbations mécaniques (fatigue, plasticité-endommagement, usure, érosion, contraintes internes, fluage), chimiques et physico-chimiques (corrosion-oxydation, réactions chimiques, diffusion d'agents fragilisant, solvants et autres, transformations de phase), physiques (radiations de différents types), et thermiques en insistant sur les couplages entre ces phénomènes et sur la possibilité de les prédire mathématiquement. Les couplages en question sont de deux types : soit la cinétique des phénomènes de dégradation/vieillessement est modifiée et/ou soit les propriétés de résistance à la ruine sont modifiées. 3. la mise en place d'outils de prédiction de la durée de vie des matériaux et structures.
Acquis d'apprentissage	<p>A la fin de cette unité d'enseignement, l'étudiant est capable de :</p> <p>Contribution du cours au référentiel du programme</p> <p>Eu égard au référentiel AA du programme KIMA, cette activité contribue au développement et à l'acquisition des AA suivants :</p> <p>AA1 Socle de connaissances scientifiques et techniques (AA1.1, AA 1.2, AA1.3)</p> <p>AA2 Compétences d'engineering (AA2.1, AA2.2, AA2.5)</p> <p>AA3 Compétences de R & D (AA3.2)</p> <p>AA5 Communication efficace (AA5.3, 5.4, 5.6)</p> <p>AA6 Ethique et professionnalisme (AA6.1, AA6.2, AA6.3)</p> <p>Acquis d'apprentissage spécifiques au cours</p>

	<p>A la fin du cours, l'étudiant sera capable de/d'</p> <ul style="list-style-type: none"> • AA1.1. AA6.1 Identifier et décrire les phénomènes physiques, mécaniques et chimiques contrôlant la durée de vie des matériaux avec une vision claire des échelles spatiales et de temps en jeu, des intensités, des couplages et méthodes de mesures; la description est poussée jusqu'à la mise en équation via des modèles simples au premier ordre; • AA1.1. Estimer la valeur des contraintes internes pour différents types d'origines ; • AA1.1. Résoudre des problèmes simples de (visco-)plasticité en 3D, de mécanique de la rupture/fatigue et de tribologie; • AA1.1. Résoudre analytiquement des problèmes couplés (électro- ou physico-) chimique-mécanique simples; • AA2.1. Partir d'un problème de durée concret et de formuler les hypothèses et choix de modèles permettant de le résoudre dans un temps raisonnable via l'outil élément finis ; • AA1.2, 2.1, 2.2, 2.4. Apprendre l'utilisation et utiliser un code de calcul par éléments finis pour conduire une analyse de l'effet de certains paramètres afin d'évaluer leur influence sur la durée de vie; • AA1.3, 2.2. Comparer de manière critique les prédictions numériques aux résultats de modèles analytiques simplifiés et établir des liens avec les enjeux technologiques; • AA5.3, 5.4, 5.6. Donner un compte-rendu oral et écrit des simulations menées en utilisant le code de calcul par éléments finis et démontrant l'utilité des modèles mathématiques pour le contrôle et la prédiction de la durée de vie des matériaux. • AA6.2 6.3 Prendre du recul par rapport aux problématique en jeu et positionner un raisonnement sur les risques liés à la durée de vie limitée des matériaux dans la perspective d'un développement soutenable, des problèmes d'obsolescence programmée, mais aussi du débat entre risques acceptables et principe de précaution.
<p>Modes d'évaluation des acquis des étudiants</p>	<p>Les étudiants seront évalués individuellement et collectivement sur base de l'atteinte des acquis d'apprentissage visés pour ce cours. Plus précisément, l'évaluation implique une note sur</p> <ul style="list-style-type: none"> • les réponses écrites à quelques questions de synthèse sur des concepts, modèles et phénomènes principaux abordés dans le cours ; ces questions seront extraites d'une liste préparées avec les étudiants pendant l'année (évaluation individuelle - environ 30%) . • la réalisation du travail de modélisation impliquant une présentation orale (et la qualité de la discussion qui s'ensuit), un bref rapport de synthèse sous une forme précisée par l'enseignant en cours d'année, la quantité et la qualité du travail effectué en cours d'année. (évaluation collective – environ 30%) • la rédaction de quelques devoirs ou rapports (évaluation collective ou individuelle - environ 15%) ; • la solution d'un exercice imposé par les enseignants le jour de l'examen, le syllabus étant disponible pour cette partie de l'examen (environ 25%) . • La pondération des notes indiquées ci avant sera appliquée sauf en cas d'échec profond dans une des rubriques. Plus précisément, si une note est égale ou inférieure à 6/20 dans une des rubriques, le poids de la rubrique en question est majoré de moitié tandis que le poids des autres rubriques est minoré de façon proportionnelle. Pour le cas de plusieurs notes égales ou inférieures à 6/20, cette majoration n'est effectuée que sur une note, la plus faible. <p>L'évaluation orale et écrite se fera en mode présentiel autant que possible et sur TEAMS si ce n'est pas possible pour de raisons sanitaires.</p>
<p>Méthodes d'enseignement</p>	<p>L'enseignement sera dispensé de manière privilégiée en présentiel mais il pourra également comporter certaines leçons et séances d'exercices organisées en distanciel. Si la situation sanitaire l'exige, le cours sera organisé en co-modal.</p> <p>Le cours sera constitué de</p> <ul style="list-style-type: none"> • 13 séances ex-cathedra, dont certains éléments seront préparés en classes inversées ; • des séances d'exercices encadrées par des assistants. Dans certains cas, ces séances pourront être accompagnées d'une démonstration expérimentale ; • d'un travail de modélisation via un outil de simulation numérique par éléments finis commercial. Ce travail n'impliquera pas de développements informatiques, mais la formulation d'hypothèses de modélisations, le choix de modèles constitutifs et descriptifs de la dégradation des matériaux, l'utilisation d'un code existant, le dépouillement des résultats des simulations, leur analyse critique par rapport à des solutions analytiques. Le travail portera sur une étude de cas impliquant plusieurs des mécanismes/phénomènes abordés dans le cours.
<p>Contenu</p>	<p>I. Introduction : mise en contexte – défis technologiques et environnementaux – méthodologie globale pour aborder une problématique d'analyse de durée de vie - nouvelles solutions matériaux</p> <p>II. Mécanismes et modèles physico-, électro- chimiques et mécaniques de base, ce compris les couplages : rappels des bases de la diffusion, des transformations de phase, de l'oxydation, d'électrochimie, de mécanique utiles pour le cours, et formulation des lois couplées (diffusion sous contrainte, électromigration, transformation de phase assistée mécaniquement, etc)</p> <p>III. Plasticité-fluage : lois de plasticité et de fluage, génération de défauts propices à favoriser le vieillissement, modification de la résistance à l'écoulement plastique par vieillissement via solvants, etc</p> <p>IV. Contraintes internes : en volume ou dans les revêtements, origines mécaniques, chimiques, physico chimique ou autres, effets, modélisation et solutions pour diminuer les effets nocifs sur la durée de vie</p> <p>V. Rupture statique et fatigue : Phénomènes physiques et description mécanique de la fatigue, applications à des cas technologiquement importants pour la durabilité : revêtements, fatigue thermique, ruptures oxydatives, fragilisation à l'hydrogène, et autres, et solutions pour retarder ces phénomènes</p> <p>VI. Tribologie : bases de mécanique des contacts, du frottement, des phénomènes d'usure et d'abrasion et solutions proposées pour augmenter la durée de vie, tribochimie et autres phénomènes d'usure couplés</p>

	<p>VII. Vieillissement par irradiation : application à l'irradiation neutronique pour la fission et à la fusion par rapport aux problèmes de sécurité/tenue des installations nucléaires et de la gestion des déchets ; application aux polymères et le vieillissement par UV</p> <p>VIII. Autres sujets de mécano-chimie : en fonction du temps disponible seront abordés des sujets comme la corrosion sous contrainte ; l'électromigration</p> <p>Durant le cours, sont abordés à la fois la description des phénomènes, leur modélisation mathématique, les méthodes de mesure et l'impact technologique.</p>
Ressources en ligne	https://moodleucl.uclouvain.be/course/view.php?id=14985&lang=en
Bibliographie	Lecture notes, prepared by the professors, are written in English. Un syllabus rédigé en anglais par les enseignants.
Autres infos	Tout le cours est enseigné en anglais. Une formation de base en mécanique des matériaux est requise comme préalable.
Faculté ou entité en charge:	FYKI

Programmes / formations proposant cette unité d'enseignement (UE)				
Intitulé du programme	Sigle	Crédits	Prérequis	Acquis d'apprentissage
Master [120] : ingénieur civil mécanicien	MECA2M	5		
Master [120] : ingénieur civil physicien	FYAP2M	5		
Master [120] : ingénieur civil en chimie et science des matériaux	KIMA2M	5		
Master [120] : ingénieur civil électromécanicien	ELME2M	5		
Master [120] : ingénieur civil des constructions	GCE2M	5		