

Mastère spécialisé DMS

Design des Matériaux et des Structures

Description des cours

1 Cours du bloc B1

1.1 Mécanique des Milieux Continus (M. Mazière)

La mécanique des milieux continus constitue une base indispensable pour la modélisation du comportement des matériaux, et le calcul de structures linéaire et non-linéaire. Le cours est organisé de manière à permettre aux élèves de résoudre analytiquement un problème aux limites simple, mais aussi de comprendre les éléments (variables, équations, méthodes,...) nécessaires à la résolution de problèmes plus complexes. Ainsi les grandeurs cinématiques et statiques de type tenseurs des déformations et des contraintes sont présentées de manière exhaustive afin de permettre l'écriture de lois de comportement diverses. L'exemple du comportement élastique linéaire est ensuite étudié en détail. Enfin la formulation du problème aux limites est présentée afin de permettre la résolution des problèmes classiques de la MMC (traction, flexion, torsion, tube sous pression,...), et de servir de base au cours sur les éléments finis.

L'enseignement est dispensé sous forme des 6 cours accompagnés de travaux dirigés suivants :

1. Transformations du milieu continu
2. Equations de bilan
3. Le tenseur des contraintes
4. Les lois de comportement
5. Thermoélasticité linéarisée
6. Formulation du problème aux limites

1.2 Métallurgie physique : rappels et compléments (V. Esin, L. Nazé)

L'objectif de cet enseignement est de rappeler et de compléter les connaissances de base en métallurgie physique qui sont indispensables pour les cours d'approfondissement (Bloc B2) et de spécialisation (Bloc B3). Il s'agira donc essentiellement de notions de cristallographie, de thermodynamique des transformations de phase, de théorie de la diffusion à l'état solide et de théorie des dislocations. L'enseignement est dispensé sous forme de cours, travaux dirigés, et de séances de travaux pratiques. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Structures cristallines :
Rappels et compléments de cristallographie – Structures : des solutions solides aux composés définis – Défauts cristallins : lacunes, dislocations et joints de grain.
2. Diagrammes de phases :
Notions de constituant, phase, solubilité – Transformations eutectique, péritectique, eutectoïde, péritectoïde – Détermination de la composition d'équilibre des phases, règle du bras de levier.
3. Diffusion à l'état solide :
Équations de Fick – Théorie atomique de la diffusion – Mécanisme lacunaire.
4. Dislocations :
Éléments de la théorie des dislocations : dislocation, mouvement, observation, propriétés élastiques des dislocations – Dislocations dans la structure cubique à faces centrées (dislocations partielles, faute d'empilement) – Dislocations dans la structure hexagonale compacte, dans la structure cubique centrée – Dislocations dans les structures ordonnées, parois d'antiphase – Microstructures de dislocations.

1.3 Méthodes numériques (D. Ryckelynck, S. Joannes)

Le cours de méthodes numériques a pour objectif de faire découvrir les méthodes les plus employées en mécanique des matériaux et des structures, afin de bien savoir les utiliser. Bien utiliser une méthode numérique consiste d'une part à produire des résultats de calcul, les interpréter, mais aussi connaître les erreurs d'approximation induites par ces méthodes.

Chaque séance de cours d'une heure trente sera suivie d'une séance d'exercices en salle informatisée. Les exercices comporteront en général une partie théorique et une partie pratique de calcul et de programmation. L'examen final comportera lui aussi une partie théorique et une partie de calcul numérique en salle informatisée. Les travaux numériques seront réalisés avec les logiciels Matlab, Scilab ou un logiciel équivalent disposant d'une bibliothèque de méthodes numériques déjà programmées.

Nous commencerons par l'étude des méthodes d'interpolation utilisées pour la représentation de courbes et de champs. Nous discuterons des erreurs d'approximation par interpolation. Il s'agit de préparer le cours sur la méthode des éléments finis. Nous étudierons ensuite l'intégration numérique d'équations différentielles ordinaires, du premier et du second ordre. Nous discuterons de la stabilité des schémas numériques et de leur convergence. Nous approfondirons ensuite les schémas de type différences finies pour la résolution d'équations aux dérivées partielles et les schémas de quadrature pour le calcul numérique d'intégrales. Nous aborderons ensuite les méthodes de résolution de systèmes d'équations linéaires, en distinguant les méthodes directes et les méthodes itératives. Nous traiterons en particulier le cas de la minimisation de fonctions quadratique convexes. Puis nous traiterons le cas de la minimisation sous contrainte linéaire. Le calcul de valeurs propres, ou de valeurs singulières étant de très répandu dans les analyses de données, nous terminons ce cours par les méthodes numériques de type puissances itérées et Lanczos.

Il y aura 10 séances de cours sur les thèmes suivants :

1. Introduction à l'utilisation de logiciels de calcul numérique de type Matlab/Octave et Python, rappels sur le calcul matriciel (S. Joannes).
2. Méthodes d'interpolation polynomiales (S. Joannes).
3. Schémas d'intégration temporelle, pour les équations différentielles ordinaires du premier ordre : Runge Kutta, theta-méthode, ... (D. Ryckelynck).
4. Schéma d'intégration temporelle, pour les équations différentielles ordinaires du second ordre, Newmark, Galerkin discontinu, ... (D. Ryckelynck).
5. Méthode des différences finies (S. Joannes).
6. Méthodes de quadrature (S. Joannes).
7. Résolution de systèmes linéaires par décomposition matricielle, Cholesky, LU, Crout (D. Ryckelynck).
8. Méthodes itératives de résolution de systèmes linéaires : gradient conjugué, GMRES, préconditionneur (D. Ryckelynck).
9. Méthode de minimisation avec et sans contrainte linéaire (D. Ryckelynck).
10. Calcul de valeurs propres ou de valeurs singulières (S. Joannes).

2 Cours du bloc B2

2.1 Modèles de prévision de durée de vie (F. Azzouz, L.Laiarinandrasana, V. Maurel, H. Proudhon)

Ce cours d'approfondissement porte sur la modélisation de la durée de vie (DDV) des structures soumises à des sollicitations quasi-statiques complexes. Deux approches sont abordées : la durée de vie à l'amorçage d'une fissure macroscopique (cadre de la mécanique des milieux continus) et la durée de vie en tolérance au dommage par la propagation de fissure conduisant à la rupture complète (cadre de la mécanique de la rupture). Le cours s'attachera à rappeler dans un premier temps les principaux mécanismes physiques de l'endommagement. Le lien entre les spécificités des matériaux considérés, notamment le rôle de leur microstructure, et leur mode de rupture seront détaillés en s'appuyant sur des analyses fractographiques. La deuxième partie du cours est consacrée au développement des principales notions et modèles d'endommagement en amorçage. Elle sera suivie d'une présentation des concepts permettant de modéliser la ruine des matériaux à l'aide des outils fournis par la mécanique de la rupture et d'un exposé détaillant leur application aux méthodes de calcul par éléments finis.

L'enseignement est dispensé sous forme de cours, travaux dirigés, et de séances de travaux pratiques. Les principaux concepts présentés dans le cours sont les suivants :

1. Mécanismes physiques de l'endommagement :
Rupture ductile et par clivage – Endommagement de fatigue – Endommagement de fluage.

2. Durée de vie à l'amorçage :
Introduction à la mécanique de l'endommagement et à la fatigue HCF – Notions liées aux mesures du dommage – Notion de contrainte effective – Limite de fatigue et effets de contrainte moyenne – La fatigue HCF.
3. Fatigue oligocyclique :
Courbe cyclique et critère de Manson-Coffin – Courbe de Wöhler – Influence de la contrainte moyenne en LCF – Cumul des dommages (linéaire et non linéaire).
4. Fatigue multiaxiale :
Essais multiaxiaux – Les critères utilisés.
5. Effets du temps et de la température :
Fluage – Fatigue à haute température – Influence de l'oxydation – Modèle d'interaction fatigue-fluage.
6. Mécanique linéaire de la rupture (MLR), élasticité linéaire :
Concentrateurs de contrainte, coefficient de concentration de contrainte K_t – Domaine d'utilisation de la MLR – Facteur d'intensité des contraintes K , taux de restitution d'énergie G – Singularité des contraintes en pointe de fissure – Critère de rupture fragile associé : Tenacité K_c ou G_c .
7. Mécanique non linéaire de la rupture (MLNR), plasticité :
Concentrateurs de contrainte, mécanique des éprouvettes entaillées – Domaine d'utilisation de la MLNR, zone plastique, small scale yielding – Intégrale J de Rice – Champ de contrainte de Hutchinson-Rice-Rosengren HRR – Critère de rupture ductile : tenacité et courbe R ($J-\Delta a$).
8. Mécanique de la rupture en viscoplasticité et fluage :
Similitude en la MLNR en plasticité et en viscoplasticité (fluage secondaire) – Intégrale C^* – Champ de contrainte de Riedel et Rice RR – Critères de rupture : $Ti-C^*$ approche en amorçage ou $da/dt-C^*$ approche en propagation.
9. Propagation de fissures de fatigue :
Propagation de fissures de fatigue cadre de la MLR – Chargement d'amplitude variable, chargement multiaxial – Critères de bifurcation – Fermeture de fissure (rôle de la plasticité et de la rugosité du front de fissure) – Interactions avec la microstructure en propagation de fissure – Influence des défauts (porosité, particules intermétalliques, rugosité) – Fissures courtes.
10. Modélisation de la propagation de fissures de fatigue :
Simulation de la fissuration par méthode XFEM et maillage conforme – Modèles cohésifs appliqués à la fatigue.

2.2 Méthode des éléments finis (F. Feyel, C. Rey)

Ce cours regroupe une introduction à la méthode des éléments finis pour l'analyse des structures, et des applications pour l'analyse non linéaire. Il est prévu de ne pas introduire de théorie complexe, et de permettre aux étudiants une prise en main concrète

de la méthode des éléments finis avec mise en situation et programmation dans un code Matlab/Octave. Les principaux thèmes qui seront étudiés sont les suivants :

1. Rappels sur l'élasticité linéaire – Principe de minimum – Méthode de Galerkin.
2. Maillage – Interpolation – Notion d'élément fini isoparamétrique.
3. Matrices et seconds membre élémentaires – Assemblage.
4. Intégration numérique – Prise en compte des conditions aux limites – Solveur (direct, itérative) – Post-traitement – Estimation d'erreur.
5. Thermoélasticité avec effets thermiques instationnaires – Intégration d'équations linéaires d'ordre 1 en temps (approche explicite et implicite, stabilité).
6. Analyse dynamique des solides élastiques : analyse modale, intégration d'équations linéaires d'ordre 2 en temps (schéma de Newmark).
7. Rappel de la formulation des problèmes d'élastoplasticité (hypothèse des petites perturbations).
8. Traitement des aspects locaux : intégration numérique implicite du comportement, algorithme de retour radial.
9. Traitement des aspects globaux : algorithme incrémental implicite, algorithme de type Newton, opérateur tangent cohérent.

2.3 Métallurgie physique des alliages (Loïc Nazé, Vladimir Esin et Cécilie Duhamel)

Ce cours d'approfondissement en métallurgie physique porte d'une part sur les transformations de phase et les modifications de microstructure dans les alliages métalliques et d'autre part sur les mécanismes de la déformation plastique dans ces alliages. Il s'agit ici de présenter les concepts permettant d'interpréter le rôle que tiennent les différents éléments caractéristiques de la microstructure d'un alliage métallique dans son durcissement, et de déterminer les conditions d'élaboration et de traitement qui définissent ces caractéristiques de la microstructure. Les aspects corrosion et oxydation à haute température, essentiel dans le comportement mécanique à haute température sont également abordés.

L'enseignement est dispensé sous forme de cours, travaux dirigés, et de séances de travaux pratiques. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Transformations de phases.
2. Germination - croissance - grossissement, équation de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov.
3. Solidification, ségrégation.
4. Transformation à l'état solide, précipitation, transformations martensitique et bainitique.
5. Déformation plastique.
6. Mécanismes de déformation dans les alliages métalliques.

7. Mécanismes de durcissement.
8. Déformation à chaud.
9. Restauration et recristallisation.
10. Traitements thermiques et thermomécaniques.
11. Oxydation-Corrosion :
Corrosion des alliages métalliques – Oxydation à chaud des alliages métalliques.

2.4 Plasticité (G. Cailletaud, H. Proudhon, F. Azzouz)

La représentation précise des relations entre les efforts appliqués et les déformations est un point incontournable dans la chaîne de prévision de durée de vie des structures critiques que les ingénieurs ont à concevoir. A l'intérieur du vaste domaine de la Mécanique des Matériaux Solides, le but de ce cours est donc de couvrir un domaine qui va de la collecte des résultats expérimentaux jusqu'à l'utilisation des modèles en calcul de structures. On présente avant tout les bases de l'écriture des modèles de comportement non linéaire traditionnels, en plasticité et en viscoplasticité. Cette partie retient un formalisme générique, qui peut s'appliquer à toutes sortes de matériaux. Une deuxième partie permet de donner un éclairage sur des comportements particuliers, pour l'approche desquels il est nécessaire de se pencher sur les relations microstructure-propriétés. Les applications sont alors entre autres dans le domaine de l'aéronautique, de l'automobile et de l'énergie. Une troisième partie est consacrée à l'utilisation pratique des modèles, qui nécessite d'une part la greffe des équations dans un code de calcul et d'autre part l'identification des paramètres matériau. L'enseignement est dispensé sous forme de cours, travaux dirigés, et de séances de travaux pratiques. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Caractérisation expérimentale, grandes classes de comportements.
2. Rhéologie des modèles à un potentiel, plasticité, viscoplasticité.
3. Critères dépendant ou non de la pression hydrostatique.
4. Règles d'écoulement avec et sans écrouissage.
5. Modèles à critères multiples.
6. Applications industrielles (appareils sous pression, retour élastique, grenailage,...).
7. Plasticité cristalline, monocristaux et polycristaux.
8. Modèles dédiés (rochet, effet de mémoire, effet PLC).
9. Intégration numérique de modèles de comportement.
10. Construction de bases de données, stratégies d'identification.

3 Cours du bloc B3

3.1 Alliages métalliques «haute température» pour l'industrie aéronautique et automobile (L. Nazé, V. Esin, V. Maurel, C. Duhamel)

Cet enseignement de métallurgie spécialisée présente les spécificités, en termes d'élaboration, de microstructure, de propriétés mécaniques et de comportement en service, d'un certain nombre de classes d'alliages «hautes températures» pour les motorisations aéronautiques et automobiles. Ces alliages sont en effet utilisés pour la réalisation de pièces de moteurs portées, en fonctionnement, à une température à laquelle divers phénomènes métallurgiques peuvent affecter significativement le comportement mécanique du matériau. Ces phénomènes sont, par exemple, le fluage au-delà de 650°C dans les superalliages à base de Nickel pour disque de turbine, ou l'évolution, entre l'ambiante et 300°C, de la taille ou de la nature des précipités durcissants dans les alliages d'Aluminium de fonderie pour culasse de moteur Diesel.

Divers aspects de la métallurgie des différentes classes d'alliages considérées (superalliages à base de Nickel, alliages à base de Titane, aciers à haute résistances, alliages d'Aluminium de fonderie...) sont abordés en fonction de leur impact sur leur comportement mécanique à haute température. Les phénomènes mis en jeu au cours de l'élaboration, du traitement, de la mise en forme ou de l'utilisation en fonctionnement de ces alliages sont analysés sur la base des concepts de la métallurgie physique présentés dans les enseignements traitant de ce sujet en blocs B1 et B2.

L'enseignement est dispensé sous forme de cours et de travaux dirigés. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Superalliages à base de Nickel pour aubes et disques de turbines aéronautiques :
Élaboration («coulés-forgés», métallurgie des poudres, monocristaux) – Phases précipitées et transformations – Traitements thermiques – Microstructures – Déformation plastique à haute température et propriétés en fluage, caractéristiques en fatigue et propagation de fissure en fatigue, oxydation à haute température.
2. Systèmes Barrières Thermiques pour aubes de turbine :
Nature des systèmes superalliage–sous-couche–barrière thermique – Comportement en service, modifications microstructurales – Oxydation en conditions de cyclage thermique.
3. Alliages à base de Titane pour compresseur de turbomachine aéronautique :
Classes d'alliages et applications – Compositions et rôles des éléments d'alliage – Phases précipitées – Traitements thermiques – Microstructures – Déformation plastique, propriétés mécaniques, «dwell effect».
4. Alliages à composés intermétalliques ordonnés :
Cristallographie des composés ordonnés et propriétés associées – Alliages à base Gamma-TiAl.

5. Aciers à haute résistance pour applications à haute température :
Rappels sur les fontes, les aciers et les aciers inoxydables – Aciers Maraging, microstructure et propriétés.
6. Alliages d'Aluminium de fonderie pour culasse de moteurs Diesel :
Éléments d'alliages et phases précipitées, séquences de précipitation – Traitements thermiques – Vieillessement en service et évolution des propriétés mécaniques.

3.2 Mécanique de contact et les bases de la tribologie (V. A. Yastrebov, H. Proudhon)

Le fonctionnement de certains systèmes industriels est assuré par le transfert des efforts entre des pièces *via* des contacts et le frottement associé. L'analyse de ces systèmes demande donc la maîtrise de la mécanique de contact et de la tribologie ainsi que la compréhension de la physique des phénomènes interfaciques. Ce cours a pour but de présenter les bases de ces domaines en allant des phénomènes physiques qui conditionnent à petite échelle les interactions entre des corps (rugosité, adhésion, frottement, lubrification, usure, troisième corps) à l'analyse des déformations et des contraintes pour des matériaux élastiques et elastoplastiques en passant par la formulation des modèles mathématiques et des lois constitutives des interfaces. En premier lieu, le contact sans frottement entre des surfaces lisses (contact hertzien) va être étudié en commençant par des problèmes classiques de Boussinesq, Cerutti et en terminant par celui de Hertz, sa généralisation et ses multiples applications. En deuxième lieu, le frottement et des matériaux non linéaires vont être pris en considération. En outre, les problèmes couplés vont être abordés tels que l'étanchéité, les contacts électrique et thermique. À part des solutions analytiques, les méthodes numériques (éléments finis et éléments de frontières) permettant de résoudre une grande variété de problèmes de contact vont être présentées. Au cours des travaux pratiques les étudiants vont utiliser ces méthodes pour résoudre des problèmes industriels pour lesquels la prise en compte du contact et du frottement est indispensable.

En résumé, ce cours vise à former les étudiants à l'analyse des problèmes de contact-frottement par des méthodes analytiques et numériques ainsi qu'à la physique sous-jacente. L'enseignement est dispensé sous forme de cours, travaux dirigés, et de séances de travaux pratiques. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Physique du contact et du frottement.
2. Cinétique et statique d'un point de contact.
3. Contact de Hertz et au-delà.
4. Problèmes couplés multiphysiques.
5. Autres phénomènes mécaniques/tribologiques.
6. Méthodes numérique pour le contact.

3.3 Matériaux hétérogènes (S. Cantournet, F. Willot, J. Dirrenberger, S. Joannes, B. Figliuzzi)

De nombreux matériaux d'usage industriel (composites, métaux, polymères, ..), sont hétérogènes du point de vue de la Mécanique. Ils sont composés de constituants élémentaires (matrice et renforts pour les composites, grains pour les polycristaux, distributions) possédant un comportement mécanique différent du comportement effectif dont le comportement mécanique local varie dans l'espace. La réponse à grande échelle du matériau (propriétés effectives) dépend de la réponse locale mais également de la géométrie et de la distribution spatiale des phases. Des outils morphologiques appropriés aux matériaux aléatoires sont mis en œuvre dans ce cadre. Ceci entraîne que tout chargement macroscopique homogène au contour d'une telle microstructure induit une distribution de contrainte et de déformation hétérogène dans le matériau.

La simulation multi-échelle a pour objectif de comprendre le lien existant entre les mécanismes physiques à l'échelle locale mis en jeu lors de la déformation et la micro-structure du matériau et son évolution. Cette approche est basée sur l'analyse des hétérogénéités de champs à différentes échelles dans l'objectif d'estimer le comportement effectif du matériau en appliquant des méthodes d'homogénéisation en champ moyen. Cette méthode de simulation a été particulièrement développée pour modéliser la plasticité cristalline à l'échelle des agrégats. Ces techniques impliquent des techniques de maillage, la sélection de méthodes d'identification du volume élémentaire représentatif, des méthodes multi-échelles par éléments finis et par transformée de Fourier. Du point de vue mathématique, les équations prennent la forme d'EDP linéaires ou non linéaires dont les coefficients oscillent rapidement. Les méthodes numériques font appel à une description sophistiquée de la structure par maillage ou encore à des méthodes spectrales et sont appliquées à des volumes élémentaires représentatifs.

L'enseignement est dispensé sous forme de cours, travaux dirigés, et de séances de travaux pratiques. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Homogénéisation analytique (représentation, localisation, homogénéisation) :
Volume élémentaire représentatif – Propriétés élastiques effectives.
2. Théorèmes de l'énergie :
Théorème de l'énergie potentielle : borne supérieure de Voigt – Théorème de l'énergie complémentaire : borne inférieure de Reuss.
3. Modèle d'Eshelby (renfort dans une matrice) , autocohérent (polycristaux, matrice polymère), Mori-Tanaka.
4. Génération de microstructures – Critères morphologiques.
5. Méthode FFT-VER.
6. Homogénéisation numérique par éléments finis, structure périodiques, aléatoires.

3.4 Modèles et méthodes numériques pour le couplage mécanique et physico-chimie (B. Appolaire, V. Esin, S. Forest, V. A. Yastrebov)

La simulation numérique du comportement mécanique des matériaux sous conditions extrêmes de chargement et d'environnement fait aujourd'hui appel à de nombreuses méthodes numériques discrètes et continues. La prévision du vieillissement des matériaux et des structures requiert la prise en compte des couplages entre l'élasticité, la plasticité, la viscoplasticité, la diffusion d'éléments chimiques constitutifs ou poisons et les changements de phases. Les théories mises en jeu sont la thermodynamique des milieux continus incluant la mécanique non linéaire des matériaux. Elle seront rappelées en insistant sur une formulation commune entre la méthode des champs de phases, la théorie de la diffusion chimique et la viscoplasticité et l'endommagement des matériaux. Le cours a pour objectif de présenter au niveau doctoral une initiation aux modèles continus ou discrets sous-jacents et à leur mise en œuvre dans des codes variés incluant la dynamique moléculaire et des dislocations, simulations par éléments finis et méthodes spectrales des couplages mécanique et diffusion ainsi que le calcul de diagrammes de phases (CALPHAD). Au cours des travaux pratiques, les étudiants vont apprendre à utiliser ces méthodes pour traiter des problèmes physiques de diffusion, changement de phase, couplage thermomécanique, etc.

L'enseignement est dispensé sous forme de cours, travaux dirigés, et de séances de travaux pratiques. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Couplage mécanique diffusion.
2. Mécanique et changement de phase.
3. Dynamique moléculaire.
4. Dynamique discrète de dislocations.
5. Eléments finis.
6. Champs de phases.
7. Calcul de diagrammes de phases.

3.5 Procédés industriels de fabrication et d'assemblage avec apport de matière à l'état fluide, poudre ou liquide. (V. Guipont, M.-H. Berger, A. Chesnaud)

L'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute, sa mise en forme, son revêtement ou son assemblage nécessitent le choix et la maîtrise d'un ou plusieurs procédés en relation avec les évolutions morphologiques, structurales, chimiques et microstructurales qu'ils induisent et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques ou physiques. Dans ce module, on s'attachera particulièrement aux procédés pour lesquels la matière est apportée à l'état fluide formé soit par des poudres en milieu sec ou humide soit par la matière en fusion. La transformation de la matière sera abordée, de l'élaboration

des matériaux précurseurs jusqu'à l'obtention de la pièce finale via différents procédés. La plupart d'entre eux requièrent des demi-produits pulvérulents, métalliques ou céramiques. Leurs propriétés d'écoulement et leur réactivité thermochimique doivent être optimisées par l'adaptation de caractéristiques telles que la granulométrie, la morphologie, l'état et la chimie de surface, ... Le choix du procédé se fera en fonction du volume à transformer (revêtement ou pièce massive), des températures requises, du niveau de complexité des formes recherchée, de la précision dimensionnelle. Les caractéristiques structurales, morphologiques des microstructures produites seront analysées au regard des propriétés mécaniques ou physiques à maîtriser.

Ce module traitera de différents procédés conventionnels ou innovants (fonderie, projection à chaud ou à froid, fabrication additive, enduction, ...). Le passage par un état liquide avec une solidification rapide, dirigée ou localisée sera abordé à travers différents procédés (laser, plasma, four, ...). On retrouve ces procédés dans différents domaines : aéronautique, transport, énergie, biomédical. Ils seront abordés à travers des cas d'étude concrets et au cours de démonstration sur site. Le module de spécialisation « Procédés » sera divisé en 10 séances (2 séances par jour), chaque séance constituant un thème plein. Trois séances seront consacrées à des visites de site de production ou au laboratoire en prolongation des séances d'enseignement sur les thèmes correspondants.

1. Introduction.
2. Elaboration et ingénierie des poudres (J.-F. Hochepped, A. Chesnaud).
3. Revêtements par projection de poudres (V. Guipont).
4. Construction de pièces par fabrication additive (J.-D. Bartout).
5. Visite des équipements de projection et fabrication additive du CDM (V. Guipont, J.-D. Bartout).
6. Fonderie des métaux et céramiques eutectiques pour le transport et l'énergie (Y. Bienvenu, M.-H. Berger).
7. Visite des installations de forgeage et fonderie de Safran Gennevilliers (Y. Bienvenu, Safran).
8. Elaboration de céramiques techniques pour l'énergie (A. Chesnaud).
9. Réparation et rechargement laser de pièces industrielles (C. Colin).
10. Composants et multimatériaux par assemblage, soudage, brasage (Y. Bienvenu).
11. Visite des installations d'assemblage de Safran Corbeil (Y. Bienvenu, Safran).

3.6 Réduction d'ordre de modèles et métamodèles en mécanique non linéaire (D. Ryckelynck, J. Cortial, A. Hamdouni, D. Am-sallem, J. Salomon)

La réduction d'ordre de modèle consiste à remplacer l'approximation éléments finis des champs inconnus par une approximation à moins d'inconnues, à l'aide de bases réduites.

Un des principaux objectifs de ce type de méthode est de réduire les temps de calcul. Cependant les modes des bases réduites peuvent aussi être une aide à la compréhension des résultats de simulation. Mis à part la représentation des champs, les modèles d'ordre réduit s'appuient sur les mêmes équations que les modèles éléments finis. Ainsi, les gains en temps de calcul peuvent ne pas être suffisant pour des simulations en temps réel.

Aussi nous proposons dans ce cours de présenter également quelques méthodes de construction de métamodèles ou de surfaces de réponse, dont les temps de simulation sont compatibles avec des applications temps réel. Nous présentons dans ce cours les résultats récents de la recherche dans les domaines de la réduction d'ordre des modèles et de la construction de métamodèles. La finalité de ces méthodes est de fournir des modèles simplifiés déduits de modèles à fort contenu physique. Dans les métamodèles les prévisions se font essentiellement par interpolation. Les méthodes de réduction d'ordre de modèle consistent quant à elles à appliquer les principes de la physique, en tenant compte du cas d'application pour construire la méthode d'approximation des champs. En mécanique non linéaire, il est important de réduire la complexité numérique induite par les équations de comportement. Les méthodes d'hyper-réduction le permettent en introduisant un sous-domaine pour y restreindre la formulation faible des équations d'ordre réduit et l'intégration des équations de comportement.

Nous proposons 11 séances de cours, 4 séances d'exercice et 6 séances de mini-projets numériques encadrés. Chaque séance sera d'une durée d'une heure trente. Les séances de cours auront les thèmes suivants :

1. Introduction et applications industrielles.
2. Rappels sur les bases modales en mécanique linéaire.
3. Réduction des équations différentielles à dépendance affine en paramètre.
4. Les méthodes de décomposition tensorielle, POD, aspects théoriques et méthodes numériques.
5. Les méthodes d'hyper-réduction.
6. Les méthodes *a priori*, la PGD et la certification de modèles d'ordre réduit en viscoplasticité .
7. Les méthodes géométriques.
8. L'interpolation de bases réduites.
9. Inégalités variationnelles réduites.
10. Les métamodèles et plans d'expérience numériques parcimonieux.
11. Séance professionnalisante, cas d'applications industriels .

3.7 Fatigue Mécano-Thermique pour applications à haute température (L. Rémy, A. Köster, V. Maurel)

Cet enseignement spécialisé porte sur l'analyse des conditions de sollicitations sur pièce relevant de la fatigue mécano-thermique et des modélisations pertinentes permettant d'estimer leur durée de vie. L'analyse de l'impact des conditions de chargement sur l'évolution du

matériau (oxydation, vieillissement. . .) est essentielle à la compréhension des mécanismes d'endommagement et de rupture. On présentera les méthodologies d'expertise et de calculs disponibles pour décrire respectivement les conditions de chargement et les modes de ruine qui en découlent. Cet enseignement s'appuiera sur la mise en œuvre d'essais de fatigue mécano-thermique, leur analyse et l'examen des évolutions microstructurales qui en découlent. Des exemples de modélisation seront présentés. Le cours développera en particulier les démarches expérimentales et la modélisation de la fissuration en conditions sévères (effet de viscoplasticité et d'oxydation dans des alliages notamment à base de nickel et des aciers inoxydables).

Cette partie de l'enseignement est complémentaire de l'enseignement de mécanique et modélisation prévue dans ce mastère ainsi que de la partie consacrée à la métallurgie, notamment dans les parties B2 du programme. L'enseignement est dispensé sous forme de cours et de travaux dirigés. Les principaux chapitres du cours sont les suivants :

1. Le phénomène de fatigue thermique et mécano-thermique :
Comportement cyclique et amorçage de fissures – Fatigue oligo-cyclique isotherme – Prise en compte des effets du temps (effet d'interaction avec le fluage et l'oxydation) – Fatigue thermique et fatigue anisotherme – Comportement cyclique et viscoplasticité – Estimation de la durée de vie à l'amorçage en fatigue mécano-thermique.
2. Les essais de fatigue mécano-thermique (FMT) et les essais à haute température :
Essais de comportement (fluage, fatigue-relaxation, fatigue anisotherme) – Mise en œuvre des essais de fissuration à haute température (techniques expérimentales et mesures de champ de température ou de déplacement à haute température) – Mécanique à hautes températures ou en conditions anisothermes : gradient thermiques/mécaniques, viscoplasticité, effet d'environnement.
3. Application à la propagation de fissure de fatigue à haute température :
Observations – Calculs thermiques et Calculs mécaniques en fatigue – Plasticité confinée et plasticité généralisée.
4. Etude de cas : modélisation de la durée de vie des revêtements barrières thermiques analyses des chargements en service – les principales évolutions microstructurales – modélisation de la fissuration d'interface par les modèles de zone cohésive – prévision de la durée de vie à l'écaillage.