

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Matériaux Fonctionnels (MF), Matériaux de Structure (MS), Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : **Mécanique des Milieux Continus : élasticité linéaire** (19.5h CM, 19.5h TD, 3h TP)

Nature: UE

Semestre : 1

Crédits ECTS : 4

Coefficient : 4

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Principes physiques :*

- Lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie).
- 1^e principe et théorème de l'énergie cinétique.
- 2^e principe de la thermodynamique. Inégalité de Clausius-Duhem.

2. *Contraintes :*

- Efforts intérieurs, vecteur contrainte et tenseur des contraintes.
- Propriétés du vecteur contrainte et du tenseur des contraintes.
- Directions principales, contraintes principales, invariants des contraintes.
- Décomposition déviatorique et sphérique du tenseur des contraintes.
- Contraintes équivalentes.

3. *Déformations :*

- Tenseur gradient de déplacement, tenseur des déformations.
- Équations de compatibilité.
- Directions principales, déformations principales, invariants des déformations.
- Décomposition déviatorique et sphérique du tenseur de déformation.
- Déformations équivalentes.

4. *Équilibre et lois de comportement :*

- Loi de comportement élastique, linéaire et isotrope.
- Équations d'équilibre en élasticité linéaire : équations de Navier, de Beltrami.
- Problème plan, fonctions d'Airy.
- Critères de la limite élastique pour le dimensionnement des structures. Introduction à l'inélasticité.

5. *Aspects expérimentaux :*

- Mesure des déformations, extensométrie, et jauges de déformations.

Travaux Dirigés : Résolution analytique de problèmes types : cylindre, tube, sphère sous pression. Torsion d'un cylindre.

Travaux Pratiques : Extensométrie, photoélasticité, mesures de champs par corrélation d'images.

Pré-requis :

- Principe Fondamental de la Statique et son application pour différents types d'efforts (ponctuels, linéiques, surfaciques, etc).
- Bases mathématiques : systèmes de coordonnées, calcul intégral/différentiel, géométrie différentielle (paramétrage de courbes, surfaces et volumes et calcul de leurs propriétés telles que courbure, vecteur normal).

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Modéliser un solide sous chargement mécanique, c'est-à-dire écrire le problème mathématique dont la résolution donne la réponse du solide sous chargement.
- Quantifier sous chargement mécanique les efforts intérieurs, la déformation, et l'énergie de déformation.
- Dimensionner une structure en utilisant les critères de la limite élastique.

Modalité de contrôle des connaissances : (3P1+3P2+TP)/7.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : .

Bibliographie :

1. J. Salençon. *De l'élasto-plasticité au calcul à la rupture*. Éditions de l'École Polytechnique, 2002
2. Patrick Royis. *Mécanique des milieux continus : cours, exercices et problèmes*, volume 1. ENTPÉ, 2005
3. F. Sidoroff. *Mécanique des milieux continus*. <https://ce1.archives-ouvertes.fr/ce1-00530377>, 2010

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : Poutres et Plaques (19.5h CM, 15h TD, 6h TP)

Nature: UE
Semestre : 1
Crédits ECTS : 4
Coefficient : 4
Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Poutres :*

- Sollicitations élémentaires, traction/cisaillement, modules d'Young et de Coulomb.
- Hypothèses de la théorie des poutres.
- Équilibre mécanique, efforts de cohésion, et conditions aux limites.
- Traction, flexion (Bernouilli, Timoshenko), torsion.
- Poutres hyperstatiques, treillis.
- Instabilité/flambage : théorie d'Euler.

2. *Plaques :*

- Hypothèses de Kirchhoff-Love et Reissner-Mindlin.
- Équilibre mécanique, efforts de cohésion, et conditions aux limites.
- Déformée selon la théorie de Kirchhoff-Love, plaques épaisses et minces, membranes.

Pré-requis :

- Principe Fondamental de la Statique (PFS) et son application pour différents types d'efforts (ponctuels, linéiques, surfaciques, etc).
- Bases mathématiques : systèmes de coordonnées, calcul intégral/différentiel, géométrie différentielle (paramétrage de courbes, surfaces et volumes et calcul de leurs propriétés telles que courbure, vecteur normal).

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Identifier un problème pouvant être résolu avec une théorie des poutres ou plaques.
- Caractériser une poutre/plaque (fibre neutre, plan neutre, efforts de cohésion, etc).
- Différencier les différents types de sollicitations (traction, torsion, cisaillement, etc).
- Utiliser la théorie des poutres pour résoudre des problèmes mécaniques iso- et hyper- statiques (obtention des efforts de cohésion, du champ de contrainte, de la déformée, de la flèche, etc).
- Utiliser la théorie des plaques pour résoudre des problèmes simples (plaque rectangulaire ou circulaire).

Modalité de contrôle des connaissances : (2P1+3P2+TP)/6.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : .

Bibliographie :

1. J.-J. Marigo. Plasticité et Rupture. <https://hal.archives-ouvertes.fr/ce1-01374813>, 2016
2. A. Delaplace. *Mécanique des structures : Résistance des matériaux*. Dunod, 2008
3. J.-M. Berthelot. *Mécanique des Matériaux et Structures Composites*. ISMANS, Le Mans, France, 2013
4. P. Agati, F. Lerouge, and M. Rossetto. *Résistance des matériaux*. Paris: Dunod, 2004

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Matériaux de Structure (MS), Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : Plasticité (19.5h CM, 19.5h TD, 3h TP)

Nature: UE

Semestre : 2

Crédits ECTS : 4

Coefficient : 4

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Introduction :*

- Phénomènes physiques à l'origine de la plasticité suivant les matériaux (cristallins : mouvement des dislocations le long des plans cristallographiques, amorphes, etc).
- Applications (glissements de terrains, etc).
- Observation expérimentale de la plasticité (rupture inclinée, striction, courbe de traction, Hall Petch, etc).

2. *Cas unidimensionnel :*

- Déformation plastique.
- Modèles rhéologiques.
- Fonction seuil et conditions de Kuhn-Tucker.
- Plasticité parfaite, écrouissage isotrope et cinématique.
- Notions sur la viscoplasticité / fluage.
- Potentiel plastique (énergie libre, dissipation).

3. *Généralisation au cas multi-dimensionnel :*

- Rappel sur cercle de Mohr, déviateur des contraintes, invariants.
- Contrainte équivalente (Von Mises et Tresca).
- Déformation plastique cumulée.
- Cas des modèles associés (loi de normalité, multiplicateur plastique).
- Quelques modèles classiques : Prandtl-Reuss, Drucker-Prager (sol), Hill (anisotrope), Tsai (composites).

4. *Identification et implémentation :*

- Identification d'une fonction seuil à partir des résultats expérimentaux.
- Algorithme de retour-radial.

5. *Plasticité cristalline :* Plan de glissement, systèmes de glissements, facteur de Schmid.

Travaux Dirigés : Poutre en traction, flexion, torsion. Treillis, contraintes résiduelles sur bi-matériaux, etc.

Travaux Pratiques : Résolution numérique (Newton Raphson eg. avec plasticité parfaite). Uniquement pour MSM (à voir pour MS).

Pré-requis : Mécanique des Milieux Continus, Poutres et Plaques, Structures et Propriétés des Matériaux, équations différentielles.

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Classifier les différents modèles de plasticité (associés/non associés, isotrope/cinématique, parfait/durcissant/adoucissant, etc).
- Résoudre analytiquement des problèmes mécaniques simple ayant un comportement plastique (poutres, cas homogènes, etc).
- Résoudre numériquement un écoulement plastique.
- Utiliser les modèles de plasticité classiques.

Modalité de contrôle des connaissances : (3P1+3P2+TP)/7.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : .

Bibliographie :

1. J. Lemaitre and J.-L. Chaboche. *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, 1988
2. R. de Borst, M.A. Crisfield, J.J.C. Remmers, and C.V. Verhoosel. *Nonlinear finite element analysis of solids and structures*. John Wiley & Sons, 2012
3. P. Suquet. Plasticité et Rupture. <https://docplayer.fr/9254611-Rupture-et-plasticite-pierre-suquet.html>

Ressources pédagogiques :

1. F. Cazes. *Comportement des matériaux*. Notes de cours master PSM, 2018-2019

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : **Grandes Déformations** (15h CM, 15h TD, 6h TP)

Nature: UE

Semestre : 2

Crédits ECTS : 3

Coefficient : 3

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Géométrie et déformation :*
 - Description matérielle et spatiale du mouvement.
 - Gradient de transformation, décomposition polaire.
 - Mesures des déformations (directions principales, variation des longueurs et des angles).
 - Hypothèse des petites perturbations.
 - Vitesses de déformations (optionnel).
2. *Lois de conservation en grandes déformations :*
 - Conservation de la masse.
 - Mesures des contraintes (contraintes de Cauchy, de Kirchhoff et de Piola-Kirchhoff).
 - Fonction seuil et conditions de Kuhn-Tucker.
 - Vitesses de contraintes et dérivées objectives (optionnel).
 - Équations de conservations de quantité de mouvement, équations d'équilibre.
3. *Hyper-élasticité :*
 - Potentiel élastique, lois constitutives, isotropie et les conséquences.
 - Hyper-élasticité isotrope en description Eulérienne et en déformations principales
 - Matériaux hyper-élastiques isotropes incompressibles.
 - Exemples des matériaux hyper-élastiques isotropes.
4. *Résolution analytique des problèmes d'élasticité non-linéaire :*
 - Tenseurs de déformation et bases locales
 - Torsion d'un arbre.
 - Gonflement et traction d'un tube.
 - Compression d'une sphère creuse.

TP expérimental : Mesures des déformations en transformations finies (essai de gonflement, striction, cisaillement). *TP numérique :* Programmation dans un logiciel éléments-finis pour un problème résolu analytiquement. Comparaison avec la solution analytique et avec la solution en petites déformations.

Pré-requis :

- Bases de la mécanique des milieux continus dans le cadre élastique linéaire.
- Tenseur des contraintes et vecteur des contraintes.
- Équations de bilan/conservation en formulations locale et globale.

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Modéliser les déformations d'un solide subissant des grandes transformations.
- Modélise le comportement mécanique de solides élastiques subissant des transformations finies.

Modalité de contrôle des connaissances : (2P1+2P2+TP)/5.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : .

Bibliographie :

1. J. Salençon. Mécanique des milieux continus. tome i, concepts généraux. *Les éditions de l'Ecole Polytechnique*, 2002
2. Patrick Royis. *Mécanique des milieux continus : cours, exercices et problèmes*, volume 1. ENTPE, 2005

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : Structures Hétérogènes (12h CM, 12h TD, 6h TP)

Nature: UE

Semestre : 2

Crédits ECTS : 3

Coefficient : 3

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Introduction aux matériaux composites :*
 - Composition
 - Désignation des stratifiés.
 - Sandwichs.
2. Élasticité anisotrope (un pli).
3. *Multi-couches :*
 - Plaque stratifiée en contrainte plane.
 - Critères de dégradation (rupture fibres, délaminage, etc).
4. *Base Homogénéisation analytique :*
 - Représentation,
 - Localisation,
 - Homogénéisation.
 - Condition aux limites périodiques (cinématiquement, statique, mixtes).
5. Cadre énergétique pour l'obtention des bornes supérieures et inférieures de Voigt et Reuss.
6. Homogénéisation des matériaux hétérogènes (Eshelby).

Pré-requis : Mécanique des Milieux Continus.

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Caractériser les matériaux stratifiés.
- Calculer les champs mécaniques dans un pli et dans un stratifié (contrainte plane).
- Faire des calculs simples d'homogénéisation sur stratifiés.

Modalité de contrôle des connaissances : (2P+CC+TP)/4.

Note éliminatoire : Note < 7.

	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
1 ^{ère} session :						
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : .

Bibliographie :

1. D. François. *Élasticité et plasticité*. Hermes, Lavoisier, 2009
2. R. de Borst, M.A. Crisfield, J.J.C. Remmers, and C.V. Verhoosel. *Nonlinear finite element analysis of solids and structures*. John Wiley & Sons, 2012
3. J-M. Berthelot. *Mécanique des Matériaux et Structures Composites*. ISMANS, Le Mans, France, 2013

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : **Dynamique du Solide** (19.5h CM, 19.5h TD, 6h TP)

Nature: UE

Semestre : 2

Crédits ECTS : 4

Coefficient : 4

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Vibrations :*

- Vibration propre, mode propre.
- Vibration forcée, décomposition modale.
- Phénomène de résonance.
- Amortissement.
- Applications aux cordes et aux poutres en traction/flexion/torsion.

2. *Onde de choc :*

- Saut de vitesse.
- Conditions de compatibilité.
- Problème dynamique, équations du mouvement.
- Célérité des ondes.
- Application aux poutres.

3. *Algorithmes de résolution numérique :*

- Euler.
- Newmark.

Pré-requis : Théorie des poutres, Équations différentielles, Oscillateurs

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Reconnaître un problème de vibration et de chocs.
- Calculer les modes propres d'une poutre, et sa réponse à une sollicitation périodique.
- Caractériser la propagation d'une onde de choc dans une poutre.

Modalité de contrôle des connaissances : (2P1+3P2+TP)/6.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : .

Bibliographie :

1. S. Drapier. *Dynamique des Solides et des Structures*. Mines de Saint-Étienne, 2016
2. J.-J. Marigo. *Plasticité et Rupture*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01374813>, 2016

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : **Éléments-Finis 1 : introduction** (15h CM, 9h TD, 9h TP)

Nature: UE
Semestre : 3
Crédits ECTS : 3
Coefficient : 3
Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Introduction* : Panorama des méthodes existantes (éléments finis, collocation, volumes finis).
2. *Bases théoriques* :
 - Mise en équations du problème EF (Discrétisation du déplacement, Formulation Faible (Principe des Puissances Virtuelles, Intégration numérique).
 - Gestion des conditions aux limites, multiplicateur de Lagrange, pénalisation.
3. *Implémentation numérique* :
 - Codes de calculs existants.
 - Structure d'un code EF (assemblage, solveur direct ou itératif, bibliothèques disponibles).
4. *Propriétés des éléments-finis* :
 - Inventaire des éléments existants (tri3, tri6, qua4, ...).
 - Validation d'un élément par patch test et propriétés de convergence (linéaire, quadratique).
 - Problèmes fréquemment rencontrés (mauvais conditionnement, singularités, verrouillage, modes à énergie nulle, ...).

Pré-requis : Loi de Hooke, équilibre local, Principe des Puissances Virtuelles (PPV).

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Écrire un système d'équations correspondant à la résolution d'un problème EF en élasticité linéaire.
- Avoir connaissance des principaux langages et codes de calculs disponibles.
- Connaître les étapes de la résolution numérique d'un problème EF (assemblage, ...).
- Choisir un élément-fini pour une application donnée.
- Reconnaître certains problèmes courants (verrouillage, ...).

Modalité de contrôle des connaissances : (2P+CC+TP)/4.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : J. Li.

Bibliographie :

1. R. de Borst, M.A. Crisfield, J.J.C. Remmers, and C.V. Verhoosel. *Nonlinear finite element analysis of solids and structures*. John Wiley & Sons, 2012
2. T.-J.-R. Hughes. *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Dover Publications, New York, 2000

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : **Éléments-Finis 2 : mécanique non-linéaire (15h CM, 9h TD, 6h TP)**

Nature: UE

Semestre : 3

Crédits ECTS : 3

Coefficient : 3

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Gestion numérique des non-linéarités :*

- Notion de linéarisation, d'interpolation, et d'extrapolation.
- Algorithmes implicites et explicites, résidu, erreur, et tolérance.
- Algorithmes d'Euler et de Newton-Raphson.
- Notions de stabilité, de convergence, et de robustesse.

2. *Application aux lois de comportement de matériaux :*

- Cas de l'endommagement sur un cas simple (par exemple : Mazars).
- Cas de la plasticité sur un cas simple (return-mapping et plasticité avec critère de Von Mises).
- Implémentation numérique : UMAT, générateurs de codes (MFront, ...), codes ouverts.

3. *Dynamique :*

- Algorithme de Newmark (version explicite et implicite).
- Cas explicite et implicite, implémentation, choix des éléments finis en dynamique.
- Logiciels de calculs dynamiques et leurs caractéristiques : Abaqus Standard/Explicit, LS-Dyna, Euro-plexus. . .

Pré-requis : Éléments-finis 1 (notion de formulation faible, de matrice de rigidité, d'assemblage, ...).

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Classifier les algorithmes de résolution et connaître leurs conditions d'application.
- Concevoir un algorithme correspondant à la résolution d'un problème EF en non-linéaire.
- Programmer la résolution numérique d'un problème en utilisant un algorithme explicite ou implicite.
- Choisir un logiciel, son paramétrage, et un élément-fini pour une application donnée.

Modalité de contrôle des connaissances : (2P+CC+TP)/4.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : I. Ionescu.

Bibliographie :

1. O.-C. Zienkiewicz, R.-L. Taylor, and J.-Z. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, volume 1. 2005
2. T.-J.-R. Hughes. *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Dover Publications, New York, 2000

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : Rupture (19.5h CM, 12h TD, 9h TP)

Nature: UE

Semestre : 3

Crédits ECTS : 3

Coefficient : 3

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Introduction* : Phénomène de la rupture par fissuration, rupture fragile, rupture ductile, mécanismes microscopiques de la rupture.
2. *Analyse du champ de contraintes autour d'une pointe de fissure* :
 - Problème plan, problème anti-plan, résolution en utilisant la fonction d'Airy, champ de contraintes au voisinage d'une pointe de fissure sous chargement en modes I/II/III, facteur d'intensité de contraintes K , critère d'Irwin, critères de rupture en mode mixte.
 - Facultatif : Rupture ductile, solution HRR.
3. *Approche de Griffith* :
 - Bilan énergétique, taux de restitution d'énergie, critère de Griffith G , calcul du taux de restitution d'énergie, méthode de raideur, méthode de souplesse, relations entre K et G , intégrale-J, critères basés sur l'intégrale-J.
4. *Approche cohésive* :
 - Modèle de Barenblatt,
 - Modèle de Dugdale.
5. *Calcul de K et de G* :
 - Fonctions complexes, calcul de K par le formalisme de Muskhelichvili.
 - Facultatif : méthode de corrélation de frontière.

TP numériques :

1. Introduction d'une fissure dans un géométrie en utilisant 2 méthodes : dédoublement des nœuds et X-FEM. Vérification du champ de déplacement analytique exact et asymptotique, ainsi que du calcul de l'intégrale J.
2. Éléments cohésifs : propagation du fissure de type cohésive entre les éléments du maillages en quasi-statique sur un cas simple (propagation stable).
3. Propagation d'une fissure en utilisant la méthode X-FEM.

Pré-requis : Fonctions d'Airy, problème plan

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Énoncer les propriétés des différents modèles de rupture en termes de loi de comportement et de loi de propagation.
- Choisir une modélisation pour un problème donné.
- Approximer analytiquement les champs solution du problème mécanique et en déduire le caractéristiques de la propagation des fissures.
- Identifier les paramètres des modèles de rupture sur la base de résultats expérimentaux.

Modalité de contrôle des connaissances : (2P1 + 3P2 + TP)/6.

Note éliminatoire : Note < 7.

	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
1 ^{ère} session :						
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : J. Li.

Bibliographie :

1. J.-B. Leblond. *Mécanique de la rupture fragile et ductile*. Lavoisier, 2003

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Matériaux de Structure (MS) : 3 ECTS, Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM) : 3 ECTS, Ingénierie Biomédicale et Biomatériaux (I2B) : 1 ECTS..

Intitulé de l'unité d'enseignement : Endommagement, Fatigue (15h+3h CM, 9h+3h TD, 6h TP)

Nature: UE
Semestre : 3
Crédits ECTS : 2+1
Coefficient : 1
Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Introduction* : (1 séance + I2B) Phénomène d'endommagement, causes microscopiques - Essais mécaniques (dégradation du module élastique) + dissymétrie traction & compression, différence en fonction des matériaux (béton, verres, polymères, métaux, composites).
2. *Rappels* : MMC, modèles.
3. *Endommagement fragile* :
 - Endommagement isotrope : Notion de déformation équivalente, variable d'endommagement isotrope, taux de restitution de l'énergie élastique. Surface seuil dans l'espace des déformations principales.
 - Modèle de Katchanov : calcul de l'endommagement D à partir de la propagation de micro-fissures. Construction des surfaces de charge (1D ou 2D).
 - Modèle de Mazars.
 - Identification expérimentale.
4. *Endommagement ductile* :
 - Élasto-plastique endommageable : (Lemaitre & Chaboche, Gurson).
 - Identification expérimentale.
5. *Problèmes numériques et modèles non-locaux (si le temps le permet)* :

TP numériques :

- MSM : 1 TP endommagement ductile (Gurson, Johnson Cook, etc/element deletion, stabilité, viscosité, etc) & 1 TP endommagement fragile (« plasticity concrete »).
- MS : Initiation Abaqus & exercice simple autour de l'endommagement (introduction des besoins pour les TPs numérique de dynamique des structures).

Fatigue : 3h cours + 3h TD :

- Séance 1 : Définition de la fatigue et des différents domaines de fatigue. Courbes de Wöhler et dimensionnement en fatigue.
- Séance 2 : Mécanismes physiques (amorçage/propagation/rupture). Loi de Paris et dimensionnement en propagation de fissure.

Pré-requis : Éléments-finis 1 (notion de formulation faible, de matrice de rigidité, d'assemblage, ...).

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Choisir un modèle approprié pour un matériau et une sollicitation donnée.
- Comprendre les équations constitutives du modèle.
- Identifier les paramètres du matériau.
- Résoudre analytiquement un problème simple.
- Choisir une méthode numérique pour la résolution du problème.

Modalité de contrôle des connaissances : (P1+P2)/2.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : R. Abdelmoula.

Bibliographie :

1. J. Lemaitre and J.-L. Chaboche. *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, 1988
2. R. de Borst, M.A. Crisfield, J.J.C. Remmers, and C.V. Verhoosel. *Nonlinear finite element analysis of solids and structures*. John Wiley & Sons, 2012
3. Abaqus User's guide. Vol. III: Materials. V6.14. *Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA*, 2014

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : Codes de Calculs Industriels (6h CM, 84h TP)

Nature: UE

Semestre : 3

Crédits ECTS : 10

Coefficient : 8

Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement : Utilisation de logiciels de simulation éléments-finis pour la mécanique (eg. Abaqus, Ansys, Cast3m, Salome-Meca, Comsol, etc). On utilisera principalement les interfaces graphiques des différents logiciels mais on commencera aussi à apprendre langages de script pour la mise en donnée et le post-traitement : Python, Gibiane, etc.

1. *Initiation :*

- Modules usuels pour la définition d'un calcul élastique (choix de la géométrie, du modèle, du matériau, de la discrétisation spatiale/temporelle).
- Réalisation d'assemblages.
- Partitionnement du domaine.
- Post-traitement : affichage de champ, tracé de courbes.

2. *Utilisation avancée :*

- *Poutres :* Solides élancés en traction, flexion, torsion avec modèles de Bernoulli et Timoshenko. Treillis.
- *Plaques :* Solides minces avec modèles de Kirchhoff-Love et Reissner-Mindlin.
- *Plasticité :* Plasticité parfaite. Modèle de Prandtl-Reuss.
- *Contact :* Avec ou sans frottement. Méthode de pénalisation ou avec multiplicateur de Lagrange. Notion de maillage compatible.
- *Matériaux composites :* Conditions aux limites périodiques.
- *Dynamique :* Implicite, explicite.
- *Vibrations :* Fréquences propres, modes propres.
- *Thermique et thermomécanique :* Conduction thermique, dilatation thermique.

Pré-requis : Bases de la méthode des éléments-finis.

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Maîtriser les outils de création géométrique : esquisse, contraintes, cotes, symétrie, extrusion- révolution, etc.
- Connaître les propriétés des différents éléments-finis (compatibilité, degrés de liberté, méthode d'intégration, fonctions de forme, convergence).
- Choisir les éléments appropriés 3D, plaque, ou poutre afin d'éviter les problèmes classiques (verrouillage, mode à énergie nulle).
- Raffinement les maillages pour optimiser le temps de calcul et la convergence.
- Simuler des problèmes non-linéaires faisant intervenir de contact, la plasticité, la rupture, etc, en quasi-statique ou en dynamique.
- S'informer en utilisant la documentation des logiciels.
- Effectuer la mise en donnée ainsi que le post-traitement en se basant sur l'interface graphique ou un langage de script.

Modalité de contrôle des connaissances : (P1+P2+TP1+TP2)/4.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : Y. Charles, F. Cazes, U. Salman.

Bibliographie :

1. Abaqus User's guide. Vol. 1 to V. V6.14. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA, 2014
2. B. Le Fichoux. *Présentation et Utilisation de Cast3M*. CEA, 2011
3. *SALOME : The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation*. SALOME TUTORIAL, USER'S GUIDE, 2013
4. *COMSOL Multiphysics User's Guide*. COMSOL, 1998?2012

Ressources pédagogiques :

Domaine : Science Technologies.

Mention du master : Sciences et Génie des Matériaux.

Spécialité : Modélisation et Simulation en Mécanique (MSM).

Intitulé de l'unité d'enseignement : Outils Avancés en Simulation Mécanique (30h TP)

Nature: UE
Semestre : 3
Crédits ECTS : 2
Coefficient : 2
Langue de l'enseignement : Français ou anglais

Descriptif de l'enseignement :

1. *Automatisation des calculs avec un langage de script :*
 - Utilisation d'un langage de script (eg. Python, Matlab, GIBIANE) pour la mise donnée les calculs éléments-finis.
 - Lancement de calculs multiples à l'intérieur de boucles pour l'automatisation des calculs.
2. *Implémentation de lois de comportement :*
 - Principe de l'implémentation de lois de comportements personnalisées sur la base de routines utilisateurs.
 - Identification des entrées et des sorties.
 - Mise en pratique avec l'écriture de routines utilisateur de type UMAT, MFRONT, etc.
3. *Utilisation de langages axés sur les formulations faibles :*
 - Initiation à l'utilisation d'un langage de script permettant d'implémenter une méthode des éléments-finis à partir de la formulation faible du problème étudié (eg. FreeFem++, FEniCs, AceFem).
4. *Conception Assistée par Ordinateurs (CAO) :* Utilisation de logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (eg. FreeCAD, Catia, Solidworks, etc).
 - (a) *Modélisation volumique avec formes canoniques (cylindre, parallélépipède, ...)* : esquisse iso-contrainte, pièces volumiques monovolume/multivolume, raccordement (congés, nervure...), paramétrisation et configuration de pièces, association d'attributs et propriétés matériaux à un volume.
 - (b) *Modélisation hybride (volumique et surfacique)* : opérations topologiques surfacique (intersection, coupe, réunion de surface, des conditions aux limites...) et opérations topologiques entre volume et surface (découpe, remplissage...).
 - (c) *Assemblage de pièces.*
 - (d) *Formats d'échanges CAO → code EF.*

Pré-requis :

- Méthode des éléments-finis en linéaire et en non-linéaire.
- Initiation aux logiciels éléments-finis.

Objectifs : Au terme de cet enseignement, l'étudiant devra savoir :

- Maîtriser l'utilisation des langages de script pour la définition des calculs éléments- finis.
- S'adapter à différentes associations de logiciels et langages de programmation.
- Automatiser le lancement des plusieurs calculs à la suite.
- Implémenter des lois comportement personnalisées.
- Utiliser les fonctions de bases des logiciels de CAO

Modalité de contrôle des connaissances : (P1+P2)/2.

Note éliminatoire : Note < 7.

1 ^{ère} session :	Contrôle continu		Contrôle terminal		Contrôle mixte	
	Nb de CC durant le semestre	Durée	Nature (oral/écrit)	Durée	Nature (oral/écrit)	Répartition entre CC et CT
RNE	0		écrit	2 h		
RSE	0		écrit	2 h		
2 ^{ème} session :						
RNE			écrit	2 h		
RSE			écrit	2 h		

Responsable de l'enseignement : Y. Charles, F. Cazes.

Bibliographie :

1. Abaqus User's guide. Vol. 1 to V. V6.14. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA, 2014
2. USER SUBROUTINES REFERENCE GUIDE. Abaqus 6.14. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA, 2014
3. F. Hecht, O. Pironneau, and K. Ohtsuka. *FreeFem++: Manual*. <http://www.freefem.org>, 2002

Ressources pédagogiques :

TP possibles :

- TP numérique corrélation d'image, utilisation de Gom Correlate.
- TP RDM Le Mans.
- TP deltalab + jauge.
- TP deltalab + corrélation d'images.
- TP photoélasticité.
- TP ultrasons.

Références

- [ALR04] P. Agati, F. Lerouge, and M. Rossetto. *Résistance des matériaux*. Paris : Dunod, 2004.
- [Ber13] J.-M. Berthelot. *Mécanique des Matériaux et Structures Composites*. ISMANS, Le Mans, France, 2013.
- [Caz19] F. Cazes. *Comportement des matériaux*. Notes de cours master PSM, 2018-2019.
- [com12] *COMSOL Multiphysics User's Guide*. COMSOL, 1998 ?2012.
- [dBCRV12] R. de Borst, M.A. Crisfield, J.J.C. Remmers, and C.V. Verhoosel. *Nonlinear finite element analysis of solids and structures*. John Wiley & Sons, 2012.
- [Del08] A. Delaplace. *Mécanique des structures : Résistance des matériaux*. Dunod, 2008.
- [Dra16] S. Drapier. *Dynamique des Solides et des Structures*. Mines de Saint-Étienne, 2016.
- [FAD⁺18] S. Forest, M. Amestoy, G. Damamme, V. Maurel, M. Mazière, and V. Yastrebov. *Mécanique des milieux continus*. Cours de l'École des Mines de Paris, 2017-2018.
- [Fra09] D. François. *Élasticité et plasticité*. Hermes, Lavoisier, 2009.
- [GUI14] USER SUBROUTINES REFERENCE GUIDE. Abaqus 6.14. *Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA*, 2014.
- [gVIM14] Abaqus User's guide. Vol. III : Materials. V6.14. *Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA*, 2014.
- [gVtV14] Abaqus User's guide. Vol. 1 to V. V6.14. *Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA*, 2014.
- [HPO02] F. Hecht, O. Pironneau, and K. Ohtsuka. *Freefem++ : Manual*. <http://www.freefem.org>, 2002.
- [Hug00] T.-J.-R. Hughes. *The finite element method : linear static and dynamic finite element analysis*. Dover Publications, New York, 2000.
- [LC88] J. Lemaitre and J.-L. Chaboche. *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, 1988.
- [Leb03] J.-B. Leblond. *Mécanique de la rupture fragile et ductile*. Lavoisier, 2003.
- [LF11] B. Le Fichoux. *Présentation et Utilisation de Cast3M*. CEA, 2011.
- [Mar16] J.-J. Marigo. Plasticité et Rupture. <https://hal.archives-ouvertes.fr/ce1-01374813>, 2016.
- [Roy05] Patrick Royis. *Mécanique des milieux continus : cours, exercices et problèmes*, volume 1. ENTPE, 2005.
- [Sal02a] J. Salençon. *De l'élasto-plasticité au calcul à la rupture*. Éditions de l'École Polytechnique, 2002.
- [Sal02b] J. Salençon. Mécanique des milieux continus. tome i, concepts généraux. *Les éditions de l'École Polytechnique*, 2002.
- [Sal02c] J. Salençon. Mécanique des milieux continus. tome ii, thermoélasticité. *Les éditions de l'École Polytechnique*, 2002.
- [sal13] *SALOME : The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation*. SALOME TUTORIAL, USER'S GUIDE, 2013.
- [Sid10] F. Sidoroff. Mécanique des milieux continus. <https://ce1.archives-ouvertes.fr/ce1-00530377>, 2010.
- [Suq] P. Suquet. Plasticité et Rupture. <https://docplayer.fr/9254611-Rupture-et-plasticite-pierre-suquet.html>.
- [ZTZ05] O.-C. Zienkiewicz, R.-L. Taylor, and J.-Z. Zhu. *The Finite Element Method : Its Basis and Fundamentals*, volume 1. 2005.