

École Polytechnique de Montréal
Département de génie mécanique

MEC8470 – ÉLÉMENTS FINIS EN MÉCANIQUE DU SOLIDE
(4 - 2 - 3), 3 crédits
Hiver 2020

OBJECTIFS

Une fois le cours d'éléments finis en mécanique du solide MEC8470 complété, vous serez en mesure de réaliser vos propres analyses sur des vrais problèmes d'ingénierie. Vous apprendrez à simplifier et idéaliser un problème réel en un (ou plusieurs) cas de chargement qui se résout avec un logiciel d'éléments finis commercial comme ANSYS ou NASTRAN. À la fin du cours, vous serez en mesure de modéliser et d'analyser le comportement, en régime statique et dynamique, des structures constituées de poutres, plaques et solides. Ce cours vous donnera le bagage nécessaire pour poser un regard critique sur des résultats d'analyses éléments finis. « Garbage in, garbage out », qu'est-ce que ça veut dire? Pour vous, le logiciel d'éléments finis ne sera plus une « black box ». Vous comprendrez qu'il s'agit de matrices de rigidité, de conditions aux rives, de valeurs propres, etc.

Préalables : MEC2405 et MEC2435

Qualités BCAPG (Bureau Canadien d'Accréditation des Programmes de Génie)

1 Connaissance en génie	2 Analyse de problèmes	3 Investigation	4 Conception	5 Utilisation d'outils d'ing.	6 Travail ind. et équipe	7 Communication	8 Professionalisme	9 Impacts environn.	10 Déontologie	11 Économie et gestion de projets	12 Apprentissage continu
CA	CA			CA	AP						

Enseignement hebdomadaire : 4 heures de cours magistraux et 2 heures de travaux pratiques

HORAIRE

		Heure	Local
Cours	Mardi	12h45 à 14h35	B-418 (sujet à changement)
	Mercredi	12h45 à 14h35	M-1510
Mini-quiz	Voir calendrier	12h45 à 13h45	B-418
Laboratoire informatique	Vendredi (Gr. 01)	12h45 à 14h35	L-6657
	Vendredi (Gr. 02)	12h45 à 14h35	L-6615

CALENDRIER Se référer à la dernière page du document

PROFESSEURS

Chargé de cours : Sam Eskandarian, Ph.D., P.Eng. – sam.eskandarian@polymtl.ca
Coordonnateur : Frédérick Gosselin, Doc., Ing. – frederick.gosselin@polymtl.ca – A115.2
Responsables laboratoires : Wassime Siguerdidjane – wassime.siguerdidjane@polymtl.ca
 Olivier Lampron – olivier.lampron@polymtl.ca
Assistants de laboratoire: Simon Breumier – simon.breumier@polymtl.ca
 Clément Vella – clement.vella@polymtl.ca

PROGRAMME DU COURS

Note : Ce programme est donné à titre indicatif uniquement. Le professeur s'engage à couvrir la matière listée plus bas. Il se réserve toutefois le droit de modifier l'ordre de présentation dans le but d'harmoniser les cours magistraux avec les laboratoires.

Partie 1

Notions pratiques pour la modélisation de structures à l'aide d'un logiciel d'éléments finis

Cours #1 et #2

Revue du plan de cours et explication du déroulement de la session. Introduction à la méthode des éléments finis avec l'élément de barreau droit. Système de coordonnées et système d'unités consistants. Nœuds et degrés de liberté. Conditions cinématiques aux appuis et aux plans de symétrie. Modélisation d'une structure constituée de poutres (Bouclier anti-radiation, TP 1). Introduction au logiciel MSC-Nastran. Structure du fichier de données.

Cours #3

Définition des nœuds (GRID). Éléments finis de poutre : système de coordonnées local, propriétés, connexion aux nœuds (PBAR, CBAR). Augmentation de la rigidité en torsion de la structure du bouclier anti-radiation (TP 1).

Cours #4 et #5

Propriétés des matériaux (MAT1). Fonction de contrainte entre les degrés de liberté (MPC). Degrés de liberté fixes (SPC1). Chargement d'un modèle (GRAV, FORCE, MOMENT). **Mini-quiz no. 1**

Cours #6 et #7

Plans de symétrie et d'antisymétrie. Combinaison de charges (LOAD) et de cas de chargement (SUBCASE). Calcul des contraintes maximales dans les éléments poutres selon le critère de Tresca. Éléments rigides (RBE2) et éléments de surface de type panneau de cisaillement (PSHEAR, CSHEAR). Application au modèle du bouclier anti-radiation (TP 1).

Cours #8 et #9

Éléments finis de plaques (PSHELL, CTRIA, CQUAD). Modélisation des panneaux sandwich. Calcul des contraintes maximales dans les plaques et les panneaux de cisaillement selon le critère de Von Mises. Problèmes de conditionnement numérique de la matrice de rigidité d'une structure : origines et détection. **Mini-quiz no. 2.**

Partie 2

Méthode des éléments finis, notions théoriques

Cours #10 et #11

Méthode de résolution approximative : solution d'essai, critère d'optimisation, estimation de l'erreur. Méthode des résidus pondérés et méthode variationnelle de Ritz. Introduction au programme d'É.F. ANSYS. Modélisation d'un système de fermeture d'une presse à injection (TP 2).

Cours #12 et #13

Convergence des solutions numériques : méthodes "p" et "h". Méthode matricielle d'interpolation : fonctions d'interpolation (ou de forme). Méthode d'interpolation de Lagrange. Solutions à plusieurs éléments, obtention de la matrice de rigidité globale. Développement de la forme faible (forme intégrale) des équations différentielles par l'intégration par parties. **Examen de laboratoire.**

Cours #14 et #15

Conditions aux rives essentielles et naturelles. Convergence d'une solution : conditions, taux de convergence de la fonction d'essai et du flux, points de surconvergence. Développement des matrices d'un élément poutre-colonne sur fondation élastique. Modélisation d'une plate-forme d'un camion (TP 3). Application à la solution des colonnes droites (charge critique de flambement). **Mini-quiz no. 3**

Cours #16 et #17

Formulation des éléments isoparamétriques linéaires et quadratiques 1D, 2D et 3D. Éléments Lagrangiens et Serendip. Interpolation et dérivée des fonctions de forme par rapport aux coordonnées cartésiennes.

Cours #18 et #19

Transformation du système matriciel d'un élément: changements de coordonnées et de bases, Libération de degrés de liberté. Fonction de contrainte à points multiples. Éléments rigides. Symétrie réflexive et cyclique. **Mini-quiz no. 4**

Cours #20 et #21

Théorème de l'énergie potentielle stationnaire appliqué aux É.F. Calcul du potentiel des charges externes et de l'énergie de déformation. Éléments finis pour l'analyse des structures.

Cours #22, #23, #24 et #25

Problèmes dynamiques : Équation du mouvement, obtention des fréquences naturelles et des modes propres, condensation statique (Méthode de Guyan). Réponse d'un système dynamique : méthode de superposition des modes, traitement de l'amortissement, méthode d'intégration directe. **Mini-quiz no. 5.**

Cours #26

Revue de la matière couverte à l'examen final.

TRAVAUX PRATIQUES EN LABORATOIRE

Le cours MEC8470 comporte deux heures de travaux pratiques chaque semaine. Au cours du trimestre, nous aurons sept mini-projets. Pour réaliser ces travaux, instructions et théories préparatoires seront données en classe durant les heures du cours régulier et la présence lors de ces périodes préparatoires est indispensable.

Les travaux pratiques seront effectués en laboratoire par groupe de deux étudiants. La pondération de la note des travaux pratiques sera basée non seulement sur un examen de laboratoire et la correction des feuilles de résultats, mais aussi sur la présence, la ponctualité et la qualité du travail effectué au laboratoire. Selon l'appréciation du professeur, la note ne sera pas nécessairement la même pour les deux étudiants d'un groupe. Les travaux pratiques en laboratoire seront exécutés sur les ordinateurs PC à l'aide des logiciels MSC-Nastran et Ansys. Dans le cas de MSC-Nastran, la préparation des données et le dépouillement des résultats doivent être effectués à l'aide de logiciels de traitement de texte et des chiffriers.

Le laboratoire est une composante essentielle et obligatoire du cours. C'est pourquoi les mini-quiz (voir ÉVALUATION plus bas) porteront aussi sur la matière vue lors des séances de travaux pratiques.

LISTE DES TRAVAUX PRATIQUES

Note : Cette liste est donnée à titre indicatif. Il est possible que le professeur modifie la définition d'un travail pratique en cours de session.

TP 1 Bouclier anti-radiation. Logiciel MSC-Nastran. Durée 4 semaines.

Orientation d'une poutre dans l'espace. Connexions entre poutres et entre poutres et plaques. Éléments rigides. Exploitation des plans de symétrie : Chargements symétriques et anti-symétriques.

TP 2 Système de serrage d'une presse à injection. Logiciel Ansys, Durée 2 semaines.

Familiarisation avec l'interface graphique d'ANSYS. Utilisation d'un mailleur automatique.

TP 3 Plate-forme d'un camion. Logiciel ANSYS. Durée 2 semaines.

Comment modéliser qu'une partie d'une structure complexe.

TP4 Flambement localisé d'un raidisseur. Logiciel Ansys, Durée 1 semaine.

Détermination des charges critiques et des modes de flambement de plaques en compression. Effet de la dimension du modèle sur la réponse.

TP 5 Réservoir à parois épaisses. Logiciel Ansys, Durée 1 semaine.

Utilisation des éléments finis axisymétriques solides de type linéaire et quadratique. Effet du maillage sur la convergence.

TP 6 Assemblage à brides boulonnées. Logiciel Ansys, Durée 1 semaine.

Utilisation des éléments finis solides de type linéaire et quadratique. Modèle avec symétrie cyclique.

TP 7 Arbre muni de rotors. Logiciel Ansys, Durée 1 semaine

Détermination des principaux modes de vibration ainsi que des fréquences naturelles. Effet du matériau et des conditions aux rives sur la réponse.

ÉVALUATION

- L'évaluation comporte trois volets : les travaux pratiques, cinq mini-quiz et l'examen final. La pondération de ces contrôles et les dates prévues des mini-quiz sont indiquées dans le tableau suivant:

Travaux pratiques :	15 %	feuilles de résultats
	20 %	examen de laboratoire
Mini-Quiz (5)	30 %	
Examen final	<u>35 %</u>	
Total	100%	

- Les mini-quiz ont lieu au B-418 durant la première heure de cours. Ils portent sur la matière vue en classe et sur les notions introduites lors des travaux pratiques. En cas d'absence à un mini-quiz, aucune reprise n'est possible. En contrepartie, seuls les quatre meilleurs mini-quiz de chaque étudiant seront retenus dans le calcul de sa moyenne. La moyenne doit être calculée sur un minimum de quatre mini-quiz. En cas d'absence à deux mini-quiz pour des motifs acceptés par le Registrariat, la pondération de l'examen final sera augmentée de 7.5 %. Si uniquement une absence est motivée alors la note 0 sera attribuée aux deux mini-quiz manqués.
- Les feuilles de résultats des laboratoires doivent être rendues au début de la période correspondant au laboratoire suivant (pour le rendu du dernier laboratoire, suivre les instructions de votre chargé de TP). Tout retard entrainera une pénalité.

CONDUITE EN CLASSE

Dans l'intérêt de tous, un climat calme et propice à l'apprentissage doit être maintenu en classe. La ponctualité et le respect d'autrui sont de mise. Aussi, vous êtes priés d'éteindre et de placer hors de vue tout objet pouvant nuire à l'attention du professeur ou des autres étudiants. Ceci inclut, sans s'y limiter, l'ordinateur portable, le téléphone cellulaire et autres outils de communication (SMS, etc.), les journaux et les balado-diffuseurs. Votre collaboration sera grandement appréciée par le professeur et les autres étudiants.

NOTE DE FIN DE SYLLABUS

Nous sommes tous des êtres humains. « Life happens » comme disent nos voisins. Si vous éprouvez des difficultés, n'hésitez pas à venir m'en parler. Comme prof, on ne sait pas toujours ce que vivent nos étudiants. Ça me fera plaisir de vous écouter et vous aider si je le peux.

RÉFÉRENCES

1. « Cours MEC8470 – Éléments Finis en Mécanique du Solide », notes de cours, 7^e édition, École Polytechnique de Montréal, 2008. (absolument nécessaire, version papier à COOPoly, version PDF disponible sur Moodle).
2. « Cours MEC8470 – Éléments Finis en Mécanique du Solide », Recueil de transparents, 1^e édition, École Polytechnique de Montréal, 2009. (absolument nécessaire, version papier à COOPoly, version PDF disponible sur Moodle).
3. « Résistance des matériaux », André Bazergui et al., Presses Internationales Polytechnique, 3^{ème} édition, 2002, ISBN 2-553-01034-6. (ou l'équivalent – nécessaire).
4. "Finite Element Analysis, from Concept to Applications", David S. Burnett, Addison-Wesley Publishing Company, 1987, ISBN 0-201-10806-2.
5. "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", Robert D. Cook and al., John Wiley and Sons, Inc., Fourth edition, 2001, ISBN 0-471-35605-0.
6. "MSC.Nastran 2001 - Getting Started with MSC.Nastran User's Guide", MSC.Software Corporation, Santa Ana, CA.
7. "MSC.Nastran 2001 - Linear Static Analysis User's Guide" MSC.Software Corporation, Santa Ana, CA.

8 janvier 2020

Frédéric Gosselin, Docteur en mécanique, Ing.

Professeur Agrégé

Département de génie mécanique

MEC 8470 - Hiver 2020

DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
5	6	7	8 Cours #1	9	10 TP1-0	11
12	13	14 Cours #2	15 Cours #3	16	17 TP1-1	18
19	20	21 Cours #4 Mini-quiz #1	22 Cours #5	23	24 TP1-2	25
26	27	28 Cours #6	29 Cours #7	30	31 TP1-3	1
2	3	4 Cours #8 Mini-quiz #2	5 Cours #9	6	7 TP1-4	8
9	10	11 Cours #10	12 Cours #11	13	14 TP2-1	15
16	17	18 Cours #12 Mini-quiz #3	19 Cours #13	20	21 TP2-2	22
23	24	25 Cours #14 Examen labo	26 Cours #15	27	28 TP3-1	29
R 1	E 2	L 3	A 4	C 5	H 6	E 7
8	9	10 Cours #16	11 Cours #17	12	13 TP3-2	14
15	16	17 Cours #18 Mini-quiz #4	18 Cours #19	19	20 TP4	21
22	23	24 Cours #20	25 Cours #21	26	27 TP5	28
29	30	31 Cours #22 Mini-quiz #5	1 Cours #23	2	3 TP6	4
5	6	7 Cours #24	8 Cours #25	9	10	11
12	13	14 Cours #26	15 Hor. Lundi	16 TP7 Hor. Vend.	17	18