UNIVERSITÉ LAVAL **Département de géologie**
Faculté des sciences et de génie **et de génie géologique**

Plan de cours pour GLG-2002 (anciennement GLG-10341) : DÉFORMATIONS DANS LA CROÛTE TERRESTRE

Trimestre :	Hiver
Temps consacré :	3-3-2-4
Horaire :	Lundi de 12h30-15h30 et Mardi de 8h30-11h30
Professeur :	Jean-Michel LEMIEUX, Local 3751, Pavillon Pouliot, Tel : 656-2131, poste 7679, jmlemieux@ggl.ulaval.ca
Assistant :	à déterminer
Site internet :	http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/dkirkwoo/
Cours préalable :	(GLG 1000 ET GLG 1001) OU GLG 1900 *(Planète Terre ET Géologie appliquée) OU Introduction aux sciences de la Terre*

I-PRÉSENTATION DU COURS

Historique

La géologie structurale est une discipline relativement récente dans l'histoire des sciences de la Terre et s'est avérée nécessaire à partir du moment où l'on admit que certains fossiles, bien que d'origine marine, affleuraient à plusieurs milliers de mètres d'altitude. On devait alors faire appel à des soulèvements des masses continentales pour offrir une explication à la présence de ces fossiles marins dans les séquences constitutives des falaises alpines. Ce n'est qu'à la fin du 19ième et au début du 20ième siècle que la géologie structurale se développa comme une discipline à part entière en sciences de la Terre.

À partir de ce moment, l'évolution de la pensée en géologie structurale suivra celle des autres sciences. Dès lors, les disciples de la **géologie structurale descriptive** s'attardèrent à décrire la morphologie et la géométrie des structures géologiques naturelles. Au début du 20ième siècle, l'approche physique ou **pétrophysique** prit naissance avec les premiers travaux théoriques et expérimentaux. On appliqua alors les lois de la physique et de la mécanique à la déformation des roches. Dans les années 60, stimulés par les progrès considérables effectués depuis la seconde guerre mondiale dans le domaine de la science des matériaux, les spécialistes en sciences de la Terre appliquèrent les mêmes concepts à l'étude de la déformation des minéraux et des roches. C'est par la **déformation expérimentale** qu'on a pu en apprendre davantage sur le comportement rhéologique des roches, sur l'évolution de la vitesse de déformation en fonction de divers paramètres connus (P, T) et sur les mécanismes de la déformation à l'échelle microscopique.

Depuis quarante ans, la géologie structurale a grandement bénéficié du nouveau cadre fourni par la théorie unificatrice de la **tectonique des plaques** donnant ainsi une vision beaucoup plus cohérente de l'évolution globale de la Terre. Le développement de **techniques quantitatives** a aussi contribué à éloigner la géologie

structurale des sciences uniquement descriptives par le biais de la recherche de données mesurables, et leur utilisation sur le terrain et en laboratoire. Le dernier né de l'approche expérimentale, la **modélisation analogique**, permet de simuler à une échelle plus réduite et dans des conditions de similitude, le comportement de la croûte océanique et continentale soumis à une déformation d'échelle crustale. Et finalement, l'apport plus récent de la **modélisation numérique**, permet aux spécialistes de simuler sur ordinateur une situation de déformation réelle (observée sur le terrain) dans le but de déterminer l'influence de certains paramètres physiques et chimiques sur la déformation.

La géologie structurale

L'analyse structurale de la déformation des corps rocheux passe par plusieurs étapes successives. La première étape de l'analyse structurale, soit **l'analyse descriptive**, consiste à caractériser la morphologie et la géométrie tridimensionnelle des structures géologiques et des fabriques dans les corps rocheux à partir d'observations de terrain. Vient ensuite **l'analyse cinématique** des structures géologiques qui passe par la caractérisation de la direction et du sens de déplacement de ces objets géologiques dans l'espace. Il peut être utile à ce stade de quantifier la déformation pour ensuite déterminer les différents stades d'une déformation progressive et caractériser comment l'objet géologique change de forme en passant d'un état initial non-déformé à un état final déformé. La troisième étape relève de **l'analyse dynamique** de la déformation et est basée sur l'étude des forces et des contraintes responsables des changements de forme et de localisation des objets géologiques dans l'espace. L'analyse dynamique s'appuie fortement sur les théories de la mécanique des roches et les lois de la physique. Finalement, l'analyse structurale ne saurait être complète sans aborder la chronologie des différents événements structuraux et les déplacements relatifs des unités dans une chaîne de montagnes.

Les données structurales ponctuellement déterminées doivent être intégrées ensembles et leur cohérence examinée dans le but d'émettre des hypothèses sur le développement des différents environnements géodynamiques. L'étude de la déformation des roches et de la géologie structurale s'intègre donc à l'ensemble des autres disciplines des sciences de la Terre pour formuler des modèles et schémas d'évolution tectonique des chaînes de montagne.

II-LES OBJECTIFS DU COURS

Le cours de Déformations dans la croûte terrestre est conçu de façon à amener les étudiants à utiliser les connaissances théoriques acquises pour les appliquer à la résolution de différents problèmes pratiques et études de cas.

Les objectifs du cours sont :

OBJECTIF 1 : *faire connaître à l'étudiant les mécanismes et processus de la déformation des corps rocheux.*

OBJECTIF 2 : *faire acquérir à l'étudiant les notions de base de morphologie et d'analyse géométrique des éléments structuraux (fractures, failles et plis).*

OBJECTIF 3 : *rendre l'étudiant apte à analyser la cinématique d'une déformation d'un corps rocheux par l'observation des structures planaires et linéaires et d'indicateurs cinématiques, et à quantifier la déformation à l'aide de marqueurs déformés.*

OBJECTIF 4 : *rendre l'étudiant apte à intégrer et utiliser les connaissances théoriques dans la résolution de différents problèmes pratiques d'analyse structurale des corps rocheux.*

OBJECTIF 5 : *rendre l'étudiant apte à intégrer et utiliser les données structurales ponctuelles pour émettre des hypothèses sur le développement et l'évolution des éléments structuraux pour un domaine structural donné.*

OBJECTIF 6 : *rendre l'étudiant apte à analyser des données structurales ponctuelles pour en déduire l'orientation des éléments structuraux prépondérants, expliquer la signification de la répartition spatiale locale et régionale de ces éléments géologiques et poser une interprétation quand au cadre dynamique responsable de leur développement. (non évalué)*

III - LE CONTENU DU COURS

Le contenu des cours dispensé pendant le trimestre d'hiver s'articule autour des objectifs d'apprentissage spécifiques. Le contenu et les objectifs sont présentés sur le site internet du cours de Déformations dans la croûte terrestre (www2.ggl.ulaval.ca/personnel/dkirkwoo/). Les différents sujets théoriques et pratiques abordés en classe sont détaillés dans le calendrier des rencontres et sous forme de courtes notions théoriques sur le site internet.

IV-LES MODES D'APPRENTISSAGE

L'enseignement dans le cadre du cours de *Déformations dans la croûte terrestre* est bimodal. Selon la formule pédagogique, certains apprentissages se font en salle sous l'encadrement du professeur et/ou d'un formateur. Dans le but de permettre un apprentissage le plus autonome possible, certains apprentissages peuvent se faire à distance. La majorité du matériel pédagogique du cours est disponible et accessible en ligne sur le site internet logé à l'adresse suivante : www2.ggl.ulaval.ca/personnel/dkirkwoo/.

Les apprentissages comportent des exposés magistraux entrecoupés d'activités de groupe encadrées en salle et, hors classe, de lectures pertinentes dans le volume de référence, et d'activités d'assimilation des notions théoriques et techniques pratiques et tutoriels. Entre 4 et 6 heures d'activités d'apprentissage en salle en présence de la professeure et/ou d'un formateur sont prévues par semaine. Pour atteindre les objectifs du cours, en plus d'assister au cours en salle, l'étudiant doit consacrer un minimum de 3 heures par semaine aux activités de formation à distance en consultant le site internet du cours de Géologie structurale (www2.ggl.ulaval.ca/personnel/dkirkwoo) pour effectuer les lectures obligatoires,

assimiler les notions théoriques, réaliser les exercices courts, tutoriels et exercices pratiques ainsi que répondre aux questions synthèses.

1. Les périodes consacrées aux notions théoriques

Une période fixe le lundi après-midi de 12h30 à 15h30 est réservée pour la présentation et l'assimilation de notions théoriques dont 2 heures sont réservées pour les exposés magistraux du professeur ainsi que la réalisation d'exercices pratiques, de discussions sur les lectures obligatoires, d'essais de synthèse et de travail en équipe. La troisième heure en salle est consacrée à répondre aux questions spécifiques des étudiants sur les travaux à compléter à distance. Ces différentes activités serviront à vérifier et consolider les connaissances acquises et à développer l'esprit d'analyse et de synthèse.

2. Les périodes consacrées aux travaux pratiques

Une période fixe, le mardi matin de 8h30 à 11h30, est consacrée aux apprentissages pratiques de techniques spécifiques à la géologie structurale, à l'assimilation de notions plus complexes, à la mise en pratique des notions théoriques sous la forme d'exercices longs, de problèmes et d'études de cas, ainsi qu'à l'analyse et l'intégration de données structurales dans le but d'émettre des hypothèses sur l'évolution d'un domaine structural donné. La première partie de la séance pratique en salle est généralement réservée à revoir les techniques de base nécessaires à la réalisation des travaux pratiques. Elle est suivie d'une période d'environ 2 heures pour la réalisation des exercices et problèmes, en présence d'un formateur qui assurera l'encadrement.

Au cours de la session, les étudiants auront à réaliser trois (3) *Études de cas* portant sur l'analyse de données structurales réelles dans le but de répondre à un problème géologique précis et concret. Pour chacun de ces cas, les étudiants devront remettre un rapport individuel. Des précisions sur le contenu et la facture des rapports seront données ultérieurement. Pour les exercices d'observation et de description de structures planaires et linéaires à l'aide des échantillons de la collection de Géologie structurale, de courts rapports devront être remis.

V-SITE INTERNET

Tout au long du trimestre, les étudiants pourront consulter à distance le site internet du cours de *Déformations dans la croûte terrestre* (http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/dkirkwoo) pour y trouver des notions complémentaires aux apprentissages en salle. L'horaire des activités d'apprentissage en salle est également disponible sur le site internet. Les étudiants devront consulter le site régulièrement pour connaître le travail à faire hors classe avant et après les cours en salle. Des documents pédagogiques pour chaque module du cours seront mis à la disposition des étudiants et téléchargeables sur le site. Pour les périodes de travaux pratiques du mardi, des protocoles de réalisation des travaux seront

également mis à la disposition des étudiants et téléchargeables sur le site. Les documents seront disponibles quelques jours avant la période de cours et l'étudiant aura la responsabilité de télécharger, imprimer et apporter les documents avec lui en salle. **Ces documents ne seront pas distribués en classe, sauf pour les documents de la première semaine de cours.**

Le site internet est divisé en modules pour lesquelles vous y trouverez les objectifs spécifiques, quelques notions théoriques, des exercices courts, des exercices pratiques, des photos et des questions synthèses touchant aux notions importantes de la matière au programme. Les étudiants pourront effectuer certaines activités d'apprentissage à distance, comme les exercices courts par exemple, et consulter la banque de photographies.

VI-ÉVALUATION DE L'APPRENTISSAGE

L'évaluation dans le cadre du cours *Déformations dans la croûte terrestre* s'inspire de la politique d'évaluation des apprentissages adoptée par l'université Laval (Déc. 1996). Les critères d'évaluation du cours sont liés à l'atteinte des 6 objectifs globaux énumérés précédemment. L'étudiant est évalué en fonction de son niveau d'atteinte des objectifs, et cela, peu importe sa position relative par rapport à ses confrères de classe (interprétation critériée des résultats). Chaque objectif comptera pour un pourcentage de la note finale. La cote finale est déterminée selon le barème suivant:

Cote			Légende
A+ [87.50-100]	**A** [83.00-87.49]	**A-** [80.00-82.99]	Réussite
B+ [77.00-79.99]	**B** [74.00-76.99]	**B-** [70.00-73.99]	Réussite
C+ [67.00-69.99]	**C** [64.00-66.99]	**C-** [60.00-63.99]	Réussite
D+ [57.00-59.99]	**D** [50.00-56.99]	-	Réussite
E [0.00-49.99]	-	-	Échec
X	-	-	Abandon sans échec

tandis que la signification des cotes est la suivante :

Cote	Pourcentage	Légende
A+	de 87,5% à 100%	Exceptionnel
A, A-	de 80% à 87,49%	Excellent
B+, B, B-	de 70% à 79.99%	Très bon
C+, C, C-	de 60% à 69.99%	Bon
D+, D	de 50% à 59.99%	Passable
E	de 0 à 49.99%	Insuffisant

Les étudiants seront évalués sous différentes formes pendant le trimestre, soit à partir des exercices et travaux faits en classe, les rapports des études de cas, ainsi que par le biais de trois (3) examens, soit un examen partiel qui couvrira la matière

théoriques des 4 premiers modules du cours un deuxième examen partiel couvrant les modules 5, 6 et 7 et un dernier examen partiel à la fin du trimestre qui portera sur la matière des 3 derniers modules.

La note finale de l'étudiant est établie en se servant des critères d'évaluation suivants pour chacun des objectifs du cours:

OBJECTIF 1 (22.5% de la note finale): *faire connaître à l'étudiant les mécanismes et processus de la déformation des corps rocheux.* L'atteinte de cet objectif sera évaluée à l'aide de l'examen partiel I. L'examen partiel I aura lieu mardi le 9 février 2010 de 8h30 à 11h30.

OBJECTIF 2 (22.5% de la note finale): *faire acquérir à l'étudiant les notions de base de morphologie et d'analyse géométrique des éléments structuraux.* L'atteinte de cet objectif sera évaluée à l'aide du second examen partiel qui aura lieu mardi le 23 mars 2010 de 8h30 à 11h30.

OBJECTIF 3 (25% de la note finale): *rendre l'étudiant apte à analyser la cinématique d'une déformation par l'observation des structures planaires et linéaires, de marqueurs de la déformation et d'indicateurs cinématiques.* L'atteinte de cet objectif sera évaluée à l'aide des rapports d'observations aux Exercices pratiques 8 et 9 (5% chacun) qui seront à remettre à la fin de la période de laboratoire, ainsi qu'à l'aide du troisième examen partiel (15%) qui aura lieu lundi le 26 avril 2010 de 12h30 à 15h30.

OBJECTIF 4 (15% de la note finale): *rendre l'étudiant apte à intégrer et utiliser les connaissances théoriques dans la résolution de différents problèmes pratiques d'analyse structurale.* L'atteinte de cet objectif sera évaluée à l'aide des rapports des Études de cas #1 (6%) et #2 (9%).

OBJECTIF 5 (15% de la note finale): *rendre l'étudiant apte à intégrer et utiliser les données structurales ponctuellement déterminées pour émettre des hypothèses sur le développement et l'évolution des éléments structuraux pour un domaine structural donné.* L'atteinte de cet objectif sera évaluée à l'aide du rapport de l'Étude de cas #3 (15%).

Remise des travaux et qualité du français

Les travaux remis en retard seront pénalisés de 10% de la note par journée de retard. Un pourcentage de la note finale des rapports de laboratoire sera attribué à la qualité du français.

VII-BIBIOGRAPHIE, LIVRES DE RÉFÉRENCES

Le livre de référence obligatoire pour le cours est:

Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996. Structural geology of rocks and regions, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, 776 p.

Vous pouvez vous procurer ce livre à la librairie Zone au comptoir du Pouliot (3ième étage) . Il est également disponible pour consultation seulement à la réserve de la bibliothèque scientifique du 1er cycle au Pavillon Alexandre Vachon.

À chaque semaine, les étudiants devront lire à l'avance le chapitre pertinent à la matière qui sera couverte en classe. Les aspects les plus importants seront repris en classe et accompagnés d'explications détaillées.

Voici une liste exhaustive des autres volumes utiles au cours et disponibles aux bibliothèques du pavillon Vachon. La plupart des volumes français sont généralement plutôt descriptifs et consacrent très peu de pages aux mécanismes et processus de la déformation.

Bles, J.L. et Feuga, B., 1981. La fracturation des roches, Collection "Manuels et méthodes" No 1, Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 121p.

Ce volume est consacré à la fracturation des roches et les méthodes d'étude et d'interprétation de la fracturation. Pas très porté sur les processus et mécanismes.

Choukroune, P., 1995. Déformations et déplacements dans la croûte terrestre, Masson, Paris, 226p.

Ce livre est très bien fait mais malheureusement le traitement des éléments structuraux et des mécanismes de déformation est orienté plutôt vers l'analyse de la tectonique régionale. Par contre il représente une excellente combinaison de géologie structurale et tectonique dans un même volume. D'ailleurs ce volume suit la méthode de travail de l'école de tectonique développée à l'Université de Rennes *où Pierre Choukroune oeuvre depuis 1977. Cette méthode se base sur l'étude ponctuelle de la déformation des roches dans le but de mieux définir les modifications de forme qui ont affectées la croûte terrestre. L'école de géologie structurale de Rennes est une des plus importante et influente en France présentement.*

Gidon, M., 1987. Les structures tectoniques, Collection "Manuels et méthodes" No 15, Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 206p.

Ce livre est entièrement descriptif et il est donc destiné à être consulté plutôt que lu. Il représente ni plus ni moins un index alphabétique dans lequel on peut retrouver des paragraphes relatifs aux termes usités avec, dans bien des cas, les équivalents anglais des vocables tectoniques.

Goguel, J., 1983. Étude mécanique des déformations géologiques. Collection "Manuels et méthodes" No 6, Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 193p.

L'objectif de ce livre est l'application de la mécanique à l'étude des déformations géologiques. Plus utile aux mécaniciens qui s'intéressant à la déformation des roches qu'aux géologues.

Hatcher, R.D. 1995. Structural geology, principles, concepts and problems, 2nd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 525 p.

Très bon livre de géologie structurale, semblable à celui de Davis et Reynolds. Style "textbook" américain, c'est-à-dire très pédagogique. Les chapitres sur les failles sont très complets, peut être même un peu trop. Par contre, le chapitre sur les zones de cisaillement est inadéquat pour des géologues canadiens oeuvrant dans les cratons et provinces tectoniques plus anciens.

Bien qu'écrit il y a trente ans, ce livre est très bien surtout en ce qui a trait aux chapitres sur le développement des foliations, des plis et des failles. Par contre, puisque qu'il a été écrit il y a quelques années, les développements récents en géologie structurale pendant les années 80 n'y figurent pas, i.e. les zones de cisaillement, les indicateurs cinématiques et le traitement quantitatif de la déformation.

Mercier, J. et Vergely, P., 1992. Tectonique, Collection "Géosciences", Dunod, Paris, 214 p.

Ce livre présente, sous une forme succincte, les notions essentielles de la géologie structurale. Le traitement de ces notions se fonde souvent sur une approche plutôt physique et/ou mécanistique d'où son intérêt pour la première partie du cours, soit celle qui traite du comportement mécanique des roches, des forces physiques, des contraintes (stress) et de la déformation (strain).

Nicolas, A., 1989. Principes de tectonique, Masson, Paris, 196p.

Nicolas est un des grands patrons de la géologie structurale en France. Ce volume reflète donc la méthodologie suivie par l'école de tectonique de l'Université de Montpellier*, dont Nicolas en fut le père, et qui a produit bon nombre de géologues structuraux de réputation internationale. Malheureusement ce volume est écrit dans un style un peu lourd et n'est pas très bien illustré; il est tout de même très complet.*

Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983. The techniques of modern structural geology, vol. 1: strain analysis, Academic Press, London, 307p.

Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1987. The techniques of modern structural geology, vol. 2: folds and fractures, Academic Press, London, 392p.

Ramsay, J.G. and Lisle R.J., 2000. The techniques of modern structural geology, Volume 3: Applications of continuum mechanics in structural geology, Academic Press, London.

Ces trois volumes représentent, à mon avis, ce qu'il y a de meilleur sur le marché en géologie structurale avancé. Bien que toutes les notions de base y soient traitées, le contenu de ces volumes est plutôt destiné à des étudiants de deuxième et troisième cycles. Le traitement mathématique y est assez poussé. La facture du volume favorise l'apprentissage autonome. Les notions théoriques sont d'abord présentées et l'assimilation de ces notions se fait à l'aide de questions pratiques, avec la réponse aux questions données en fin de chaque chapitre.

Malheureusement tous ces volumes ne traitent pas beaucoup de la déformation à des conditions de T-P plus élevées. À ce titre je vous recommande les volumes suivants:

Passchier, C.W., Myers, J.S., Kröner, A., 1990. Field geology of high-grade gneiss terrains. Springer-Verlag, 150p.

Hanmer, S. and Passchier, C., 1991. Shear sense indicators a review, Geological Survey of Canada, Paper 90-17, 72p.