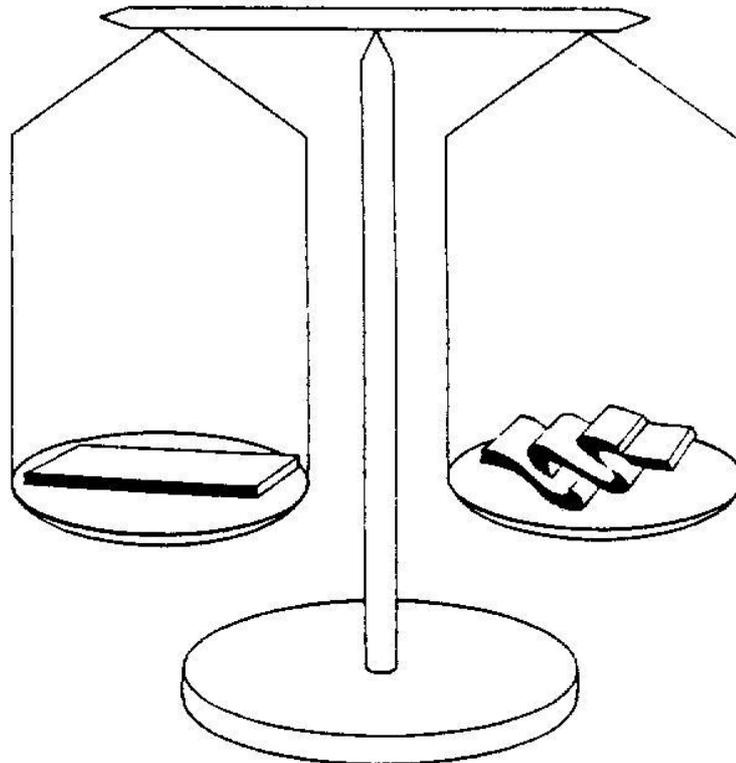


Master « Géosciences et Applications au Développement Durable » 2012/2013

Module M1 : techniques de cartographie et tectonophysique.

Introduction à la technique des coupes équilibrées

(Christian Hoepffner)



(Ramsay & Huber, 1987)

INTRODUCTION

L'objectif de ce module est essentiellement l'apprentissage de techniques et/ou de méthodes d'analyse structurale. Il y aura donc peu de cours théorique et surtout des exercices pratiques.

Dans l'enseignement de la Licence, la tectonique était surtout **descriptive**. Dans ce module de Master on cherchera à développer plutôt l'aspect quantitatif des déformations. La **tectonophysique** n'est qu'une approche physicienne de la tectonique qui privilégie les mesures, les calculs, les expériences, l'élaboration de modèles.

L'objectif de la tectonique, une fois réalisée la description des structures en 3D, est de proposer un modèle expliquant le passage de l'état initial (non-déformé) à l'état final (déformation finie observée). Cette **cinématique** permet d'introduire une 4^{ème} dimension, le temps, c'est l'**évolution géologique** de l'objet étudié.

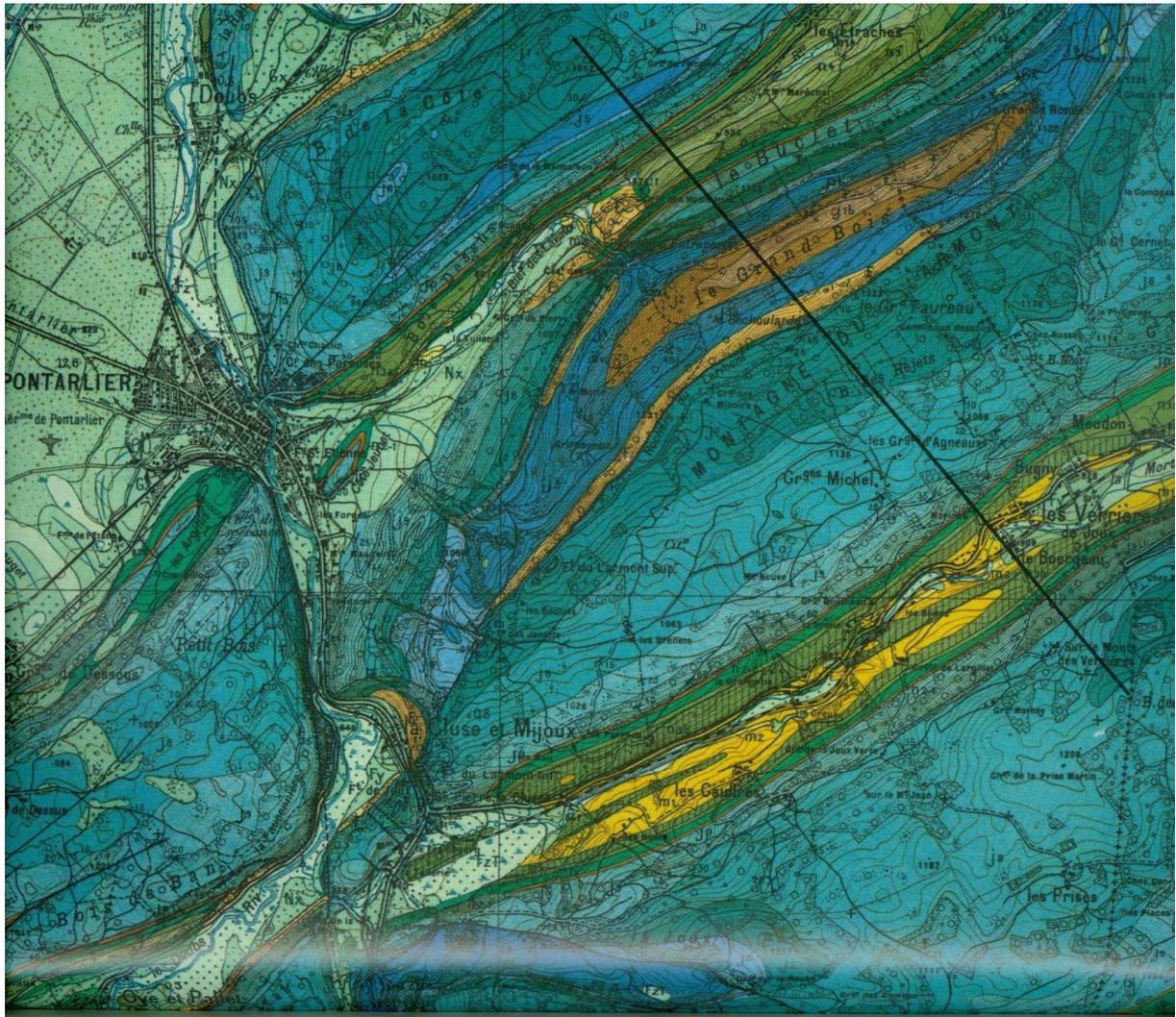
Cette reconstitution en 4D sera appliquée ici à des structures d'échelle cartographique, c'est-à-dire des structures observables sur les cartes géologiques de différentes échelles, depuis le 1/5000^{ème} jusqu'au 1/100000^{ème} pour les plus courantes.

L'image 3D est obtenue :

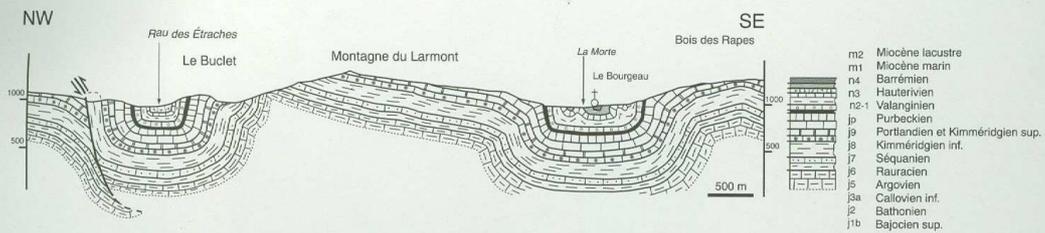
A partir de **la carte** (2D dans le plan horizontal). Les informations sont relativement précises du fait que la carte reproduit la totalité visible des structures.

A partir de **la coupe** (2D dans le plan vertical). Les infos disponibles dans le plan vertical sont le plus souvent partielles. En général elles proviennent de la carte (« V » dans les vallées, signes de pendage, épaisseurs des couches dans la légende, etc...). La construction de la coupe comporte donc de nombreuses incertitudes.

L'image obtenue est donc finalement une image 2.5D plutôt que 3D.



Structure plissée de style jurassien. Pontarlier 1/50 000

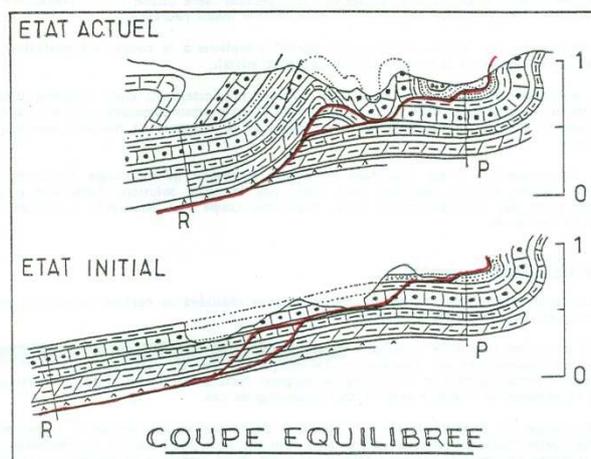
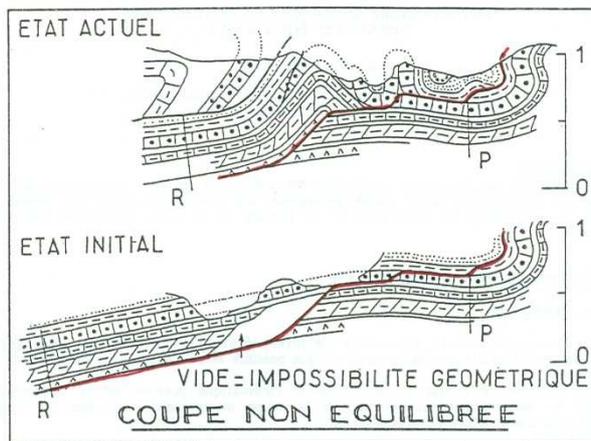
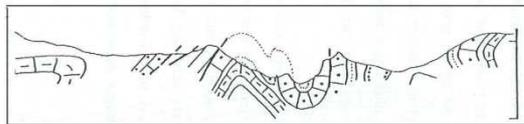


Carte et coupe géologique « classique » (Sorel & Vergely, 1999)

Pour accéder à la 4^{ème} dimension (le temps), on va utiliser la technique des coupes équilibrées.

Le but de cette technique est de dessiner une **coupe interprétative d'une structure géologique la plus complète possible en profondeur**. Cette coupe doit pouvoir être « dépliée », l'objet déformé doit pouvoir être ramené dans son état initial (on dit « restauré »). Le processus cinématique de passage de l'état initial à l'état final doit être réaliste, cohérent avec les données théoriques sur la déformation (translation+rotation+distorsion obéissent à des règles géométriques et peuvent être formulées en termes mathématiques). La coupe « équilibrée » obtenue est une solution mais ce n'est pas forcément la seule.

Coupe géologique non interprétée,
dessinée d'après les données de surface



Notion de coupe équilibrée (Ménard, in Gratier éd.,1988)

En théorie, il est possible de dessiner des coupes équilibrées dans toutes les régions déformées quel que soit le niveau structural. En pratique, c'est surtout dans le niveau structural supérieur -moyen, donc dans les zones externes des chaînes de montagnes que l'application de la méthode est la plus satisfaisante. Il est en effet assez simple de « déplier » des plis isopaques formés par flexion ou d'annuler le rejet de failles. Par contre, dans les plis anisopaques, synschisteux, synmétamorphiques, il est plus difficile de prendre en compte le raccourcissement lié à l'aplatissement.

De ces remarques générales d'introduction on retiendra deux points importants :

1) une coupe équilibrée est une solution possible, elle n'est pas forcément juste mais une coupe non équilibrée est certainement fautive.

2) une coupe équilibrée est l'association de 3 éléments d'égale importance :

Un état initial

Un chemin cinématique crédible

Un état final

Le 2^{ème} élément, la cinématique, c'est-à-dire le modèle tectonique qui explique le passage de 1 à 3 est très important. C'est sur lui que repose le dessin final de la coupe.

CONSTRUCTION DE COUPES EQUILIBREES EN REGIME COMPRESSIF ET EN ZONES EXTERNES

Règles à respecter (si possible)

- 1) La coupe doit être parallèle à la direction de déplacement
- 2) Il doit y avoir conservation du volume des roches pendant la déformation
- 3) La déformation doit être « plane », c'est-à-dire qu'il n'y a pas de déformation perpendiculaire au plan de la coupe (voir les différents types d'ellipsoïdes de déformation dans le diagramme de Flinn, cours de tectonique de S3).

La combinaison de ces trois règles implique qu'il y a conservation des surfaces dans le plan de la coupe pendant la déformation.

METHODES D'EQUILIBRAGE

En fait il n'y a pas de méthode unique pour réaliser une coupe équilibrée. Plusieurs méthodes ont été élaborées par les géologues, elles sont essentiellement manuelles et reposent sur le respect des règles énoncées plus haut.

Ces méthodes cherchent à construire en même temps l'état initial et l'état déformé. Elles reposent sur le choix d'un mode de déformation obéissant à des règles géométriques éventuellement exprimables sous une forme mathématique et permettant alors une modélisation.

Données disponibles

Les données de surface sont sur la carte géologique : pendage des couches, pendage des failles, épaisseurs des couches. Si ces données sont insuffisantes, elles peuvent être complétées par un travail sur le terrain.

Des données de subsurface sont parfois disponibles : forages, profils sismiques. Elles fournissent des indications importantes sur les structures en profondeur.

Choix de la géométrie initiale

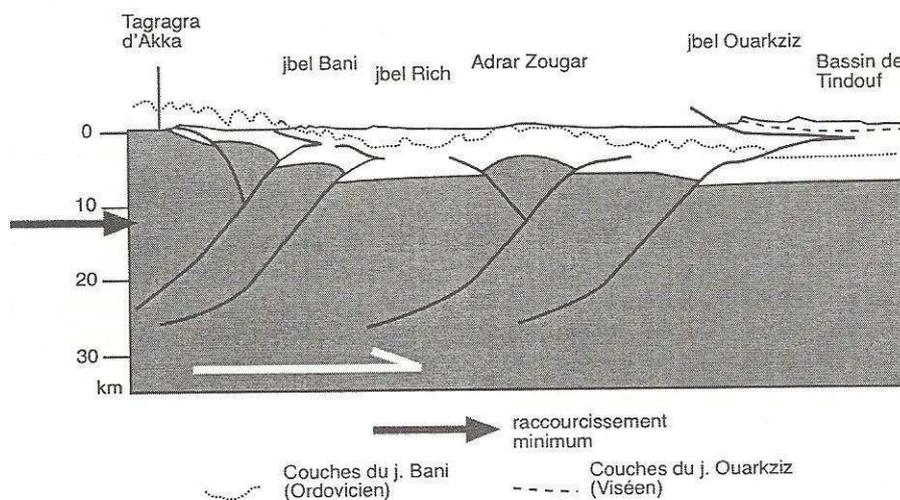
La règle générale est d'admettre que les couches étaient horizontales, c'est l'étape du dépôt sédimentaire. Il peut y avoir des complications à ce schéma : variations d'épaisseur, présence de failles antérieures au raccourcissement (blocs basculés).

Choix du modèle tectonique

Le choix du modèle est fondamental puisqu'il va déterminer l'interprétation et le dessin de la structure en profondeur sur la coupe. Dans les zones externes des chaînes de montagnes, la géologie s'organise généralement en un empilement de couches sédimentaires reposant sur un substratum. C'est le dispositif classique « socle-couverture ».

Soumis à une déformation en compression cet ensemble peut avoir 2 types de comportements :

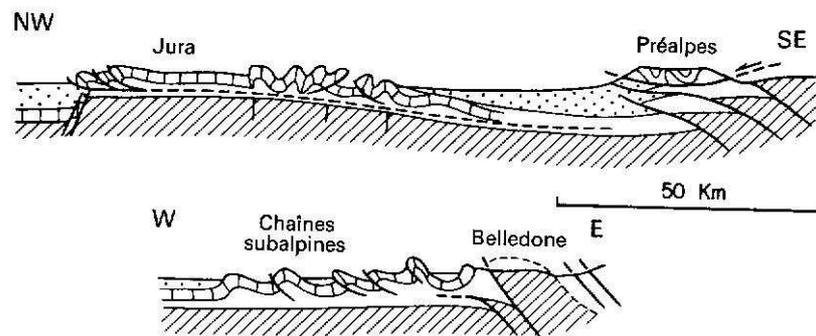
Socle et couverture se déforment ensemble, la couverture reste solidaire du socle. On parle de **tectonique de socle** ou en anglais *thick-skin tectonics*.



Tectonique de socle dans la chaîne hercynienne de l'Anti-Atlas

(in Piqué et al., 2007)

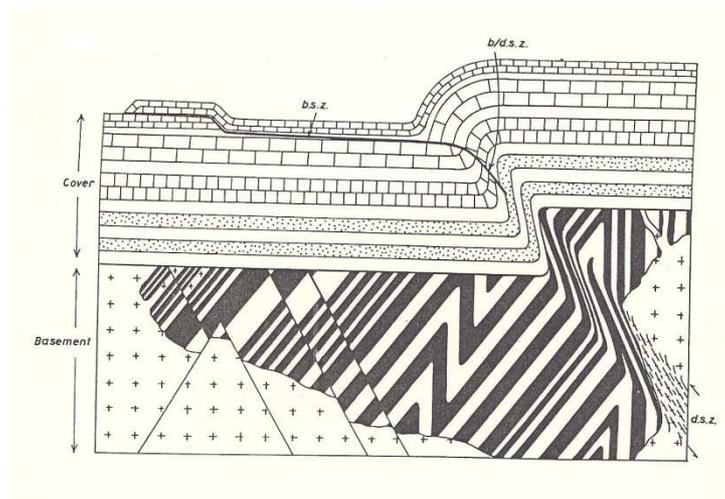
La couverture se déforme indépendamment du socle, on dit qu'elle se décolle du socle. On parle de **tectonique de couverture** ou tectonique pelliculaire ou en anglais *thin-skin tectonics*.



Tectonique de couverture dans les zones externes des Alpes occidentales (in Mattauer, 1973)

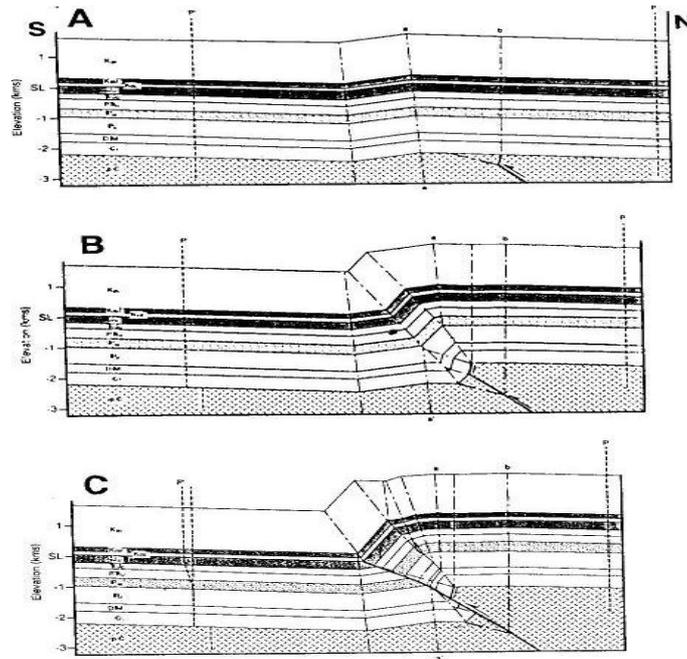
Ces deux types de comportement se traduisent dans les couches sédimentaires par des plis qui peuvent se réduire à quelques cas simples.

- **Dans la tectonique de socle** les couches s'adaptent à la déformation fragile ou ductile du socle, on parle de « plis forcés ».



Pli « forcé » dans la couverture sédimentaire.

Déformation ductile du socle (Ramsay & Huber ; 1987)



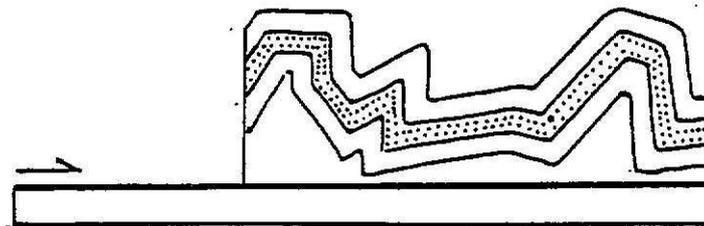
Modélisation de l'évolution d'un pli forcé (Narr & Suppe, 1994)

Déformation fragile du socle

- Dans la tectonique de couverture on distingue :

1) Les plis disharmoniques.

Longtemps considérés comme le modèle classique de la tectonique de couverture. Il n'y a pas de déterminisme strict entre ces plis et les structures en profondeur si ce n'est l'existence d'un niveau majeur de décollement.



Plissement disharmonique

2) Les plis de rampe

Cette catégorie de déformation correspond à des associations entre plis et chevauchement très souvent observées dans les zones externes des chaînes de montagnes et que l'on désigne par l'expression « ceintures de plis et chevauchements » (folds and thrusts belt). On admet que :

Pli et chevauchement ne sont pas indépendants

Les chevauchements ou failles inverses se propagent les uns après les autres de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne (séquence conforme) ou, plus rarement, de l'extérieur vers l'intérieur (séquence contraire). Les successions de chevauchements régulièrement espacés et de pendage identique constituent des imbrications ou des écailles.

Cette propagation se fait selon des surfaces de chevauchement où l'on distingue des « paliers » ou « plats » et des « rampes ».

2 cas simples sont distingués :

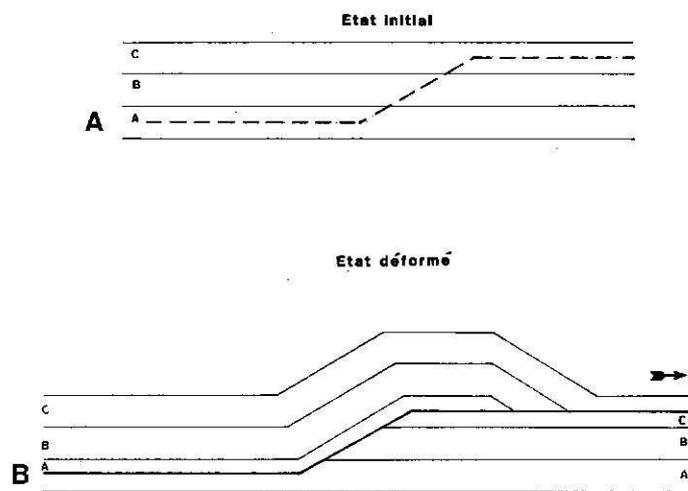
2-1) les plis passifs de rampe

Le chevauchement existe avant le déplacement, c'est une fracturation précoce qui se répartit en :

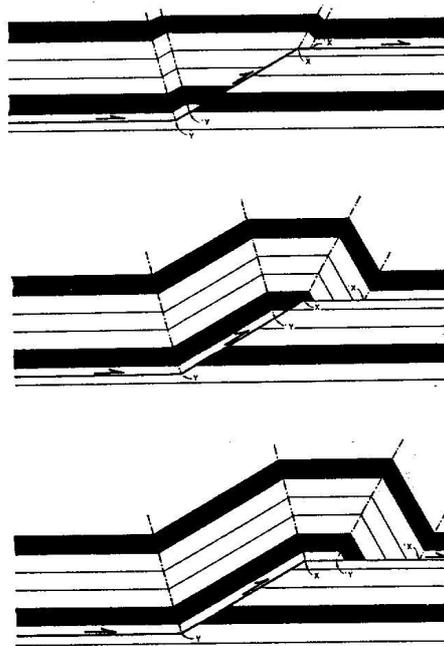
Fractures parallèles aux couches (S₀), ce sont les paliers ou plats

Fractures recoupant les couches, ce sont les rampes

Paliers et rampes se relaient en « marches d'escalier ». Le compartiment supérieur se déplace en se plissant passivement aux points d'intersections entre paliers et rampes.



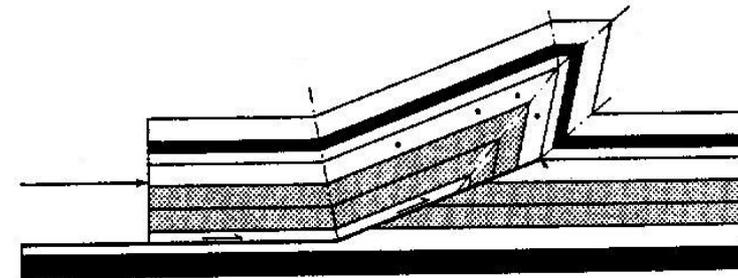
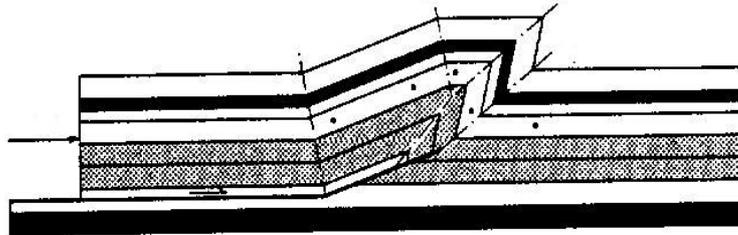
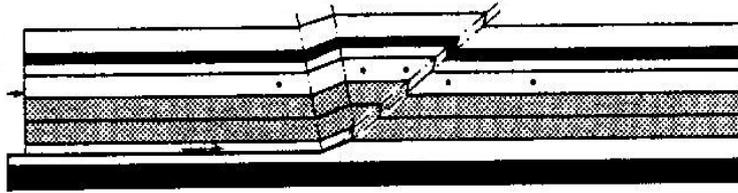
Principe du pli passif de rampe



Modélisation de l'évolution cinématique du pli passif de rampe (Suppe, 1983)

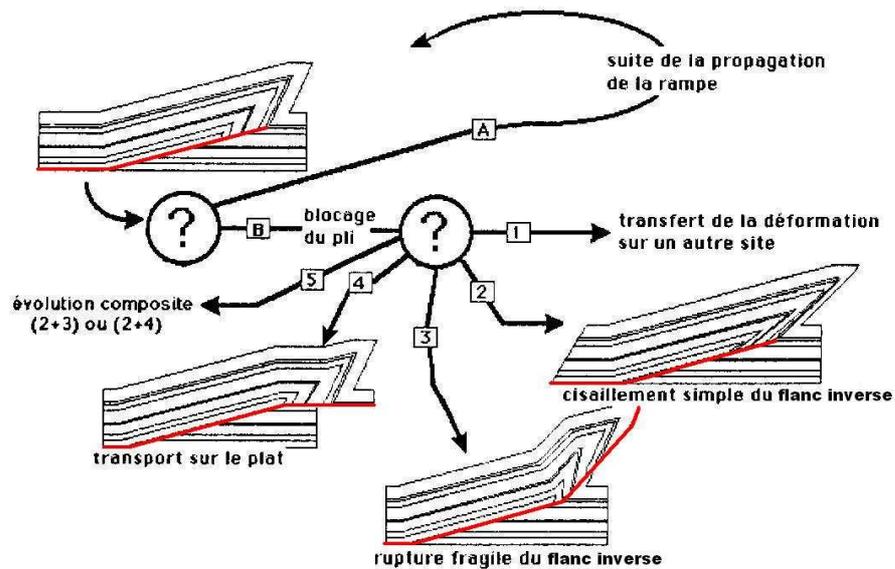
2-2) *les plis de propagation de rampe*

La rampe (chevauchement) apparaît et se propage dans la pile de couches sédimentaires en même temps que le plissement.



Modélisation de l'évolution cinématique du pli de propagation (Suppe & Medwedeff, 1990)

En cas de blocage de la propagation du pli, plusieurs évolutions sont possibles : cisaillement ductile du flanc inverse, rupture fragile du flanc inverse, déplacement sur un nouveau palier (plat).



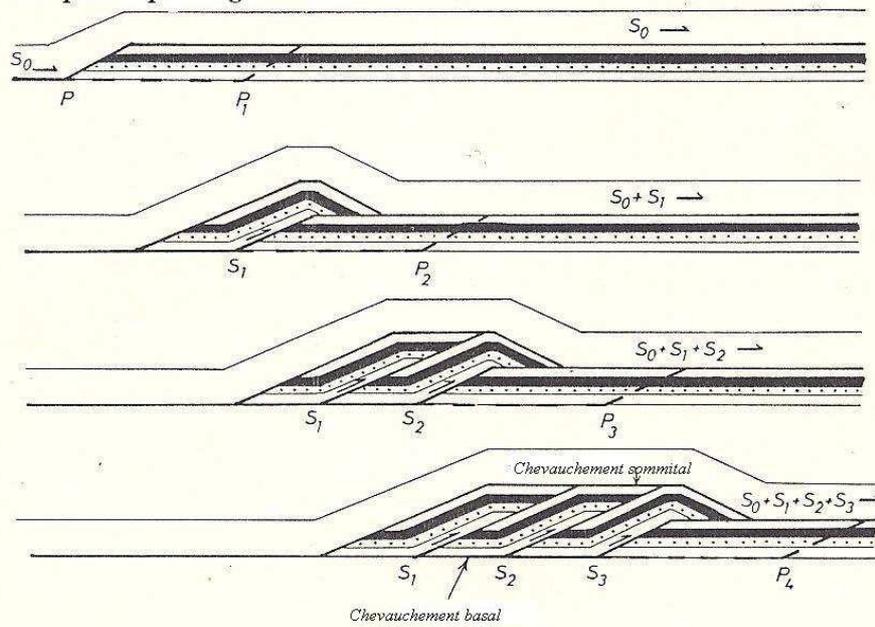
Evolution possible du pli de propagation (Mercier, 1992)

Ces deux types de plis de rampes peuvent être modélisés, le point commun de ces deux modèles est que les plis sont anguleux, correspondant à des « kink-bands ». Cet aspect particulier des plis amène à dessiner des coupes dont le style diffère un peu des coupes classiques où on a plutôt tendance à dessiner des plis arrondis.

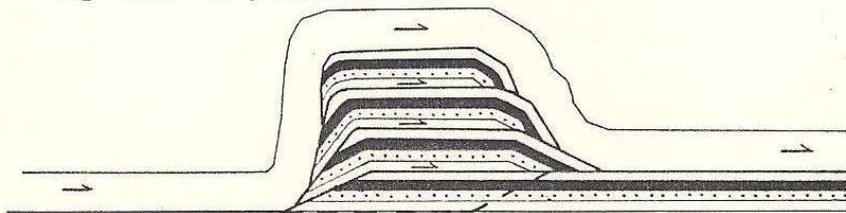
3) Les duplex.

Lorsqu'une succession d'écaillés (ou d'imbications) empilées les unes sur les autres est située entre une surface de chevauchement basal (floor thrust) et une surface de chevauchement sommital (roof thrust) on parle de disposition en « duplex ». Entre les deux surfaces de chevauchement, les failles inverses limitant les écaillés ont une forme +/- sigmoïdale. Selon le rapport entre la longueur des écaillés et la quantité de déplacement de chacune d'elles on distingue trois types de duplex (cf fig. ci-dessous).

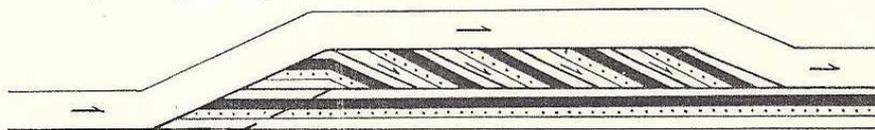
A. Duplex à pendage interne



B. Empilement antiforme d'écaillés



C. Duplex à pendage externe



Différents types de duplex (Ramsay & Huber, 1987)

EXERCICES

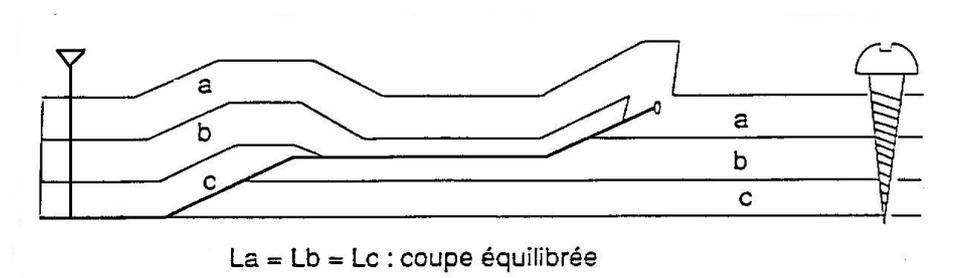
Vérification de l'état d'équilibre d'une coupe

Le but est de vérifier si la coupe est équilibrée ou non.

Mesure de la longueur des couches

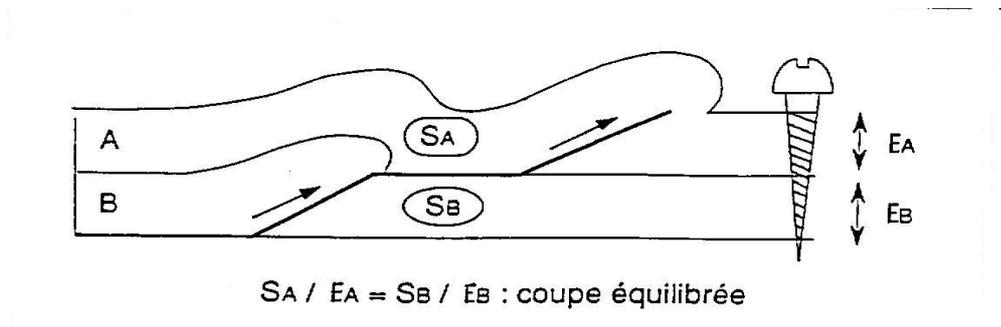
L'hypothèse de conservation du volume durant la déformation suppose que dans la coupe les surfaces sont conservées. Les surfaces sont difficiles à mesurer et on choisit donc plutôt de mesurer les longueurs des couches. Pour que cette mesure soit valable l'épaisseur des couches doit rester constante. Il faut donc choisir des **couches compétentes** déformées en **plis isopaques**.

En pratique on place des repères fixes de part et d'autre de la structure (**pin lines**). La plus importante des ces pin lines est dans la partie de la coupe supposée avoir échappé à la déformation. On mesure ensuite la longueur L de plusieurs couches superposées. Si ces longueurs sont égales la coupe est équilibrée.



Mesure de la surface

Si les plis sont anisopaques (couches incompetentes), les épaisseurs varient ainsi que les longueurs. On peut dans ce cas mesurer la surface S du banc plissé ainsi que son épaisseur E dans la partie non déformée de la coupe (pin-line). Si le rapport S/E est le même dans toutes les couches, la coupe est équilibrée.



Ex 1 : coupe du Jura (Buxdorf, 1915)

Ex 2 : affleurement de calcaires dans la carrière de Hénaux (Basse Normandie, France)

Ex 3 : coupe interprétée, supposée équilibrée (Ramsay et Huber, 1987)

Construction de coupes équilibrées

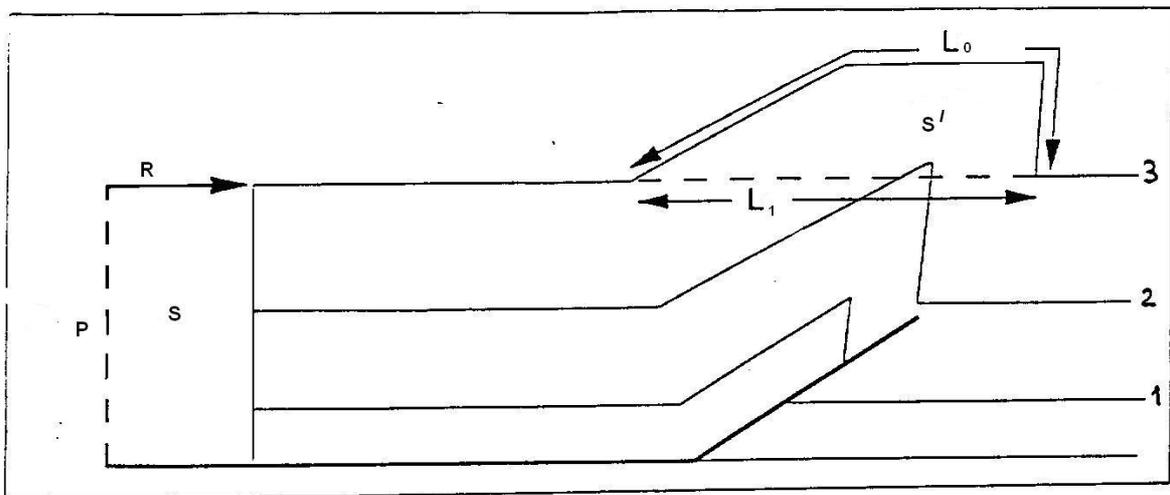
Recherche de la profondeur du niveau de décollement par la méthode de la surface en excès

Si on est dans le cas d'une tectonique de couverture, il faut essayer de déterminer la profondeur **P** du niveau de décollement au-dessus duquel apparaissent les systèmes de plis et de chevauchement. On applique en général la méthode de la surface en excès.

Principe : le volume déplacé à l'arrière de la structure est égal au volume du relief structural créé. En coupe on peut donc mesurer la surface S' correspondant à ce relief, ainsi que le raccourcissement R correspondant à la variation de longueur L_0-L_1 mesurée sur une couche repère.

Intérêt : la méthode s'applique à tous les modes de plissements

Condition : la mesure de la longueur d'une couche de référence (L_0) doit être très précise et nécessite de fixer une pin-line à l'avant de la structure.



Méthode de la surface en excès.

Principe : $S = S'$

R : raccourcissement = $L_0 - L_1$

$P = S'/R$

Ex 4 : coupe du Jura (Laubscher, 1962)

Ex 5 : coupe des Rocheuses canadiennes

Méthode des « kinks »

Ex 6 : anticlinal de Shantzechiao

Ex 7-8 : bordure Sud du Haut-Atlas occidental

CONCLUSION

En essayant de dessiner une coupe équilibrée on fait incontestablement des progrès par rapport à une coupe classique. Le dessin obtenu est plus précis, plus objectif et plus crédible. La démarche oblige le géologue à envisager de manière critique tous les problèmes que peut poser le dessin d'une coupe. Il faut cependant bien garder à l'esprit que « *le choix de méthodes pour construire des coupes qui se rapprocheront de la réalité ou pour restaurer des secteurs donnés dans leur état initial est toujours dépendant de l'environnement lithologique et tectonique et donc qu'il n'existe pas de méthode universelle applicable dans tous types de terrains. Il faut se méfier du géologue qui présente ses coupes comme **parfaitement équilibrées et donc irréprochables**, il est soit inexpérimenté, soit naïf, soit malhonnête ou les trois à la fois ...* » (Ramsay & Huber, 1987).

BIBLIOGRAPHIE

Gratier J.P. édit. (1988): l'équilibrage des coupes géologiques. Buts, méthodes et applications. Mém. & Doc. CAESS, Rennes, n°20, 165p.

Journal of Structural Geology (2012): "Chamberlin centennial": a critical assessment of Balance and Restoration Techniques and Interpretation, vol. 41, 1-110.

Mercier E. (1992): une évolution possible des chevauchements associés aux plis de propagation: le transport sur le plat (modélisation et exemple). Bull. Soc. Géol. France, 6, 713-720.

Narr W; & Suppe J. (1994): kinematics of basement-involved compressive structures. Am. Jour. Sci., 294, 802-860.

Ramsay J. & Huber M. (1987) : The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 2, s 24, faults and the construction of balanced cross sections, p 543-559. Academic Press.

Sorel D. et Vergely P. (1999) : initiation aux cartes et coupes géologiques. Dunod, 96 p.

Suppe & Medwedeff D. (1990): geometry and kinematics of fault-propagation folding. Eclogae geol. Helv. 83/3, 409-454.

Suppe J. (1983): geometry and kinematics of fault-bend folding. Am. Jour. Sci., 283, 684-721.

SITES WEB

<http://ysudreau.free.fr/These/00TitreThese.html>

Une thèse en français. Intéressante pour la terminologie et les exemples.

<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/>

La page de Rick Allmendinger contient des programmes à télécharger et des animations des modèles cinématiques de plis et chevauchements.