



**HAL**  
open science

## L'équilibrage des coupes géologiques. Buts, méthodes et applications.

Jean-Pierre Gratier

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Gratier. L'équilibrage des coupes géologiques. Buts, méthodes et applications.. Gratier J.P. (Coord.). Géosciences-Rennes, 174 p., 1988, Mémoires et Documents du centre Armoricaïn d'Etude structurale des Socles n°20. insu-00648843

**HAL Id: insu-00648843**

**<https://insu.hal.science/insu-00648843>**

Submitted on 6 Dec 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**J. P. GRATIER (coordinateur)**

ISSN 0755-978X

ISBN 2-905532-19-X

# **l'équilibrage des coupes géologiques**

BUTS, METHODES ET APPLICATIONS.

**MEMOIRES ET DOCUMENTS**

*du Centre Armoricaïn*

*d'Etude Structurale*

*des Socles*

n° 20

Rennes 1988



**MEMOIRES ET DOCUMENTS  
DU  
CENTRE ARMORICAIN D'ETUDE STRUCTURALE DES SOCLES**

**N° 20**

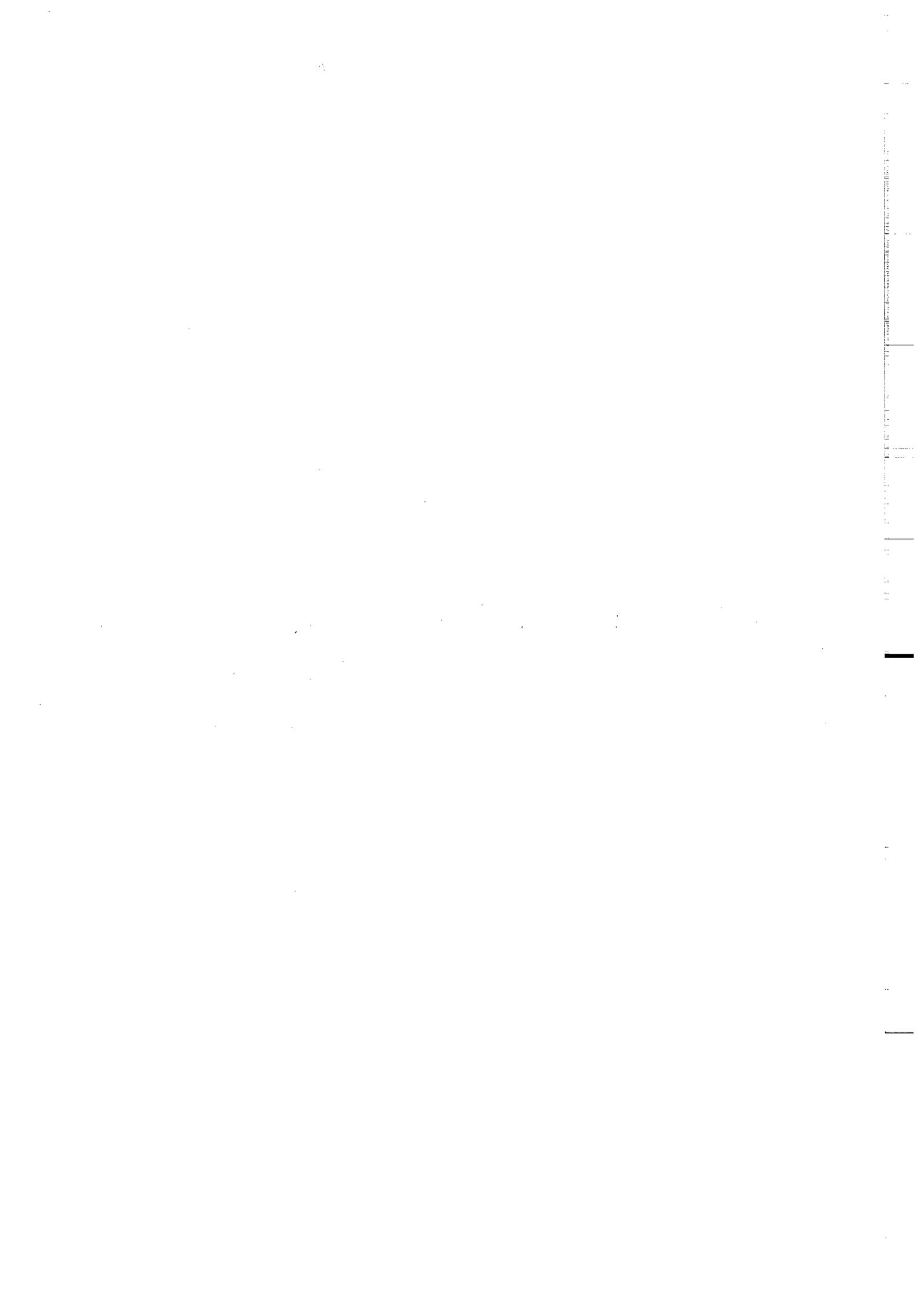
**J.P. GRATIER**

**L'équilibrage des coupes géologiques.  
Buts, méthodes et applications.**

**Atelier du Groupe d'Etudes Tectoniques  
le 8 Avril 1987 à Rennes.**

**Centre Armoricaïn d'Etude Structurale des Socles  
LP CNRS n°4661  
Université de Rennes I  
Campus de Beaulieu  
35042 - RENNES Cédex  
(France)**

**1988**



**ISSN : 0755-978-X**

**ISBN : 2-905532-19-X**

**Atelier du Groupe d'Etudes Tectoniques  
le 8 Avril 1987 à Rennes.**

**J.P. GRATTIER coordinateur (1987)**

**L'équilibrage des coupes géologiques. Buts, méthodes et applications.**

**Mém. Docum. Centre Arm. Et. Struct. Socles, Rennes 20, 165 p.**



## INTRODUCTION

Des ateliers du GET ont pu être tenus à Rennes le 7 et 8 avril 1987 grâce à l'amabilité de nos collègues de cette université que nous remercions de leur accueil. A la suite de ces ateliers, l'un sur les modèles analogiques l'autre sur l'équilibrage des coupes géologiques, les conférenciers ont bien voulu écrire des articles à vocation pédagogique sur ces deux thèmes. Le présent livret réuni une douzaine d'articles sur les buts et les méthodes d'équilibrage des structures géologiques, avec plusieurs applications qui permettent de discuter de la méthode et de ses perspectives.

Les buts et la méthodologie générale de construction des coupes équilibrées sont introduits par G. Ménard, qui donne notamment les hypothèses de base, la démarche à suivre, les domaines et les limites d'application de cette méthode.

Des exercices d'application sont ensuite proposés, sur des exemples concrets. Ainsi J.L. Mugnier donne d'abord, de manière très détaillée, toutes les étapes de la construction d'une coupe équilibrée, ainsi que toutes les informations et observations à collecter pour une telle approche. L'importance des différents paramètres sur lesquels on peut jouer pour équilibrer une coupe et celle du choix d'un modèle de déformation sont ensuite soulignées dans deux exercices de G. Ménard. L'importance de la géométrie des failles est enfin discuté par J.L. Faure et M. Séguret pour l'équilibrage des coupes en distension.

Des applications de cette méthode à plusieurs régions permettent ensuite une discussion sur les problèmes pratiques posés par la construction de ces coupes équilibrées, sur des exemples très variés, comme ceux des Rocheuses Canadiennes et de l'Ardenne (F. Meillier), de la Provence (C. Tempier), de l'Avant Pays Andin (Bolivie) et des Pyrénées (J. Deramond et al.), et même pour un test d'application, au dépliage de structures expérimentales (S. Triboulet & J.F. Ballard).

Des perspectives d'avenir sont enfin dégagées dans les trois derniers articles. G. Ménard discute d'abord de l'application de la méthode à l'échelle de la croûte terrestre, L. Endignoux & J.L. Mugnier présente ensuite une modélisation informatique permettant de construire très rapidement des coupes équilibrées à partir de données imposées. J.P. Gratier propose enfin une extension de la méthode d'équilibrage au traitement et à la restauration, en carte, de couches plissées et faillées, qui implique également l'utilisation de programmes informatiques.

L'acquisition de données sur les structures profondes de la Terre est très onéreuse et on ne peut pas espérer disposer, avec les moyens géophysiques actuels, à la fois d'une bonne précision sur la situation et la géométrie des discontinuités profondes et d'une bonne continuité de ces données. Des interpolations entre des sites de données ponctuelles resteront, longtemps encore, nécessaire. La méthode de l'équilibrage des structures géologiques est, en ce sens, une méthode de traitement des données qui permet simplement de tester leur cohérence géométrique et de rechercher le meilleur compromis possible entre toutes ces données (surface et profondeur) et des hypothèses explicites clairement formulées. Comme toutes les méthodes de traitement de données, la fiabilité des résultats obtenus est donc directement dépendante de la qualité de l'acquisition de ces données. Le développement d'une telle méthode est lié à celui de l'exploration géophysique des structures profondes qui, au vu des lacunes existantes (particulièrement soulignées par les tentatives d'équilibrage), ne peut qu'être vivement encouragé.

J.P. GRATIER,  
Grenoble, déc. 87.

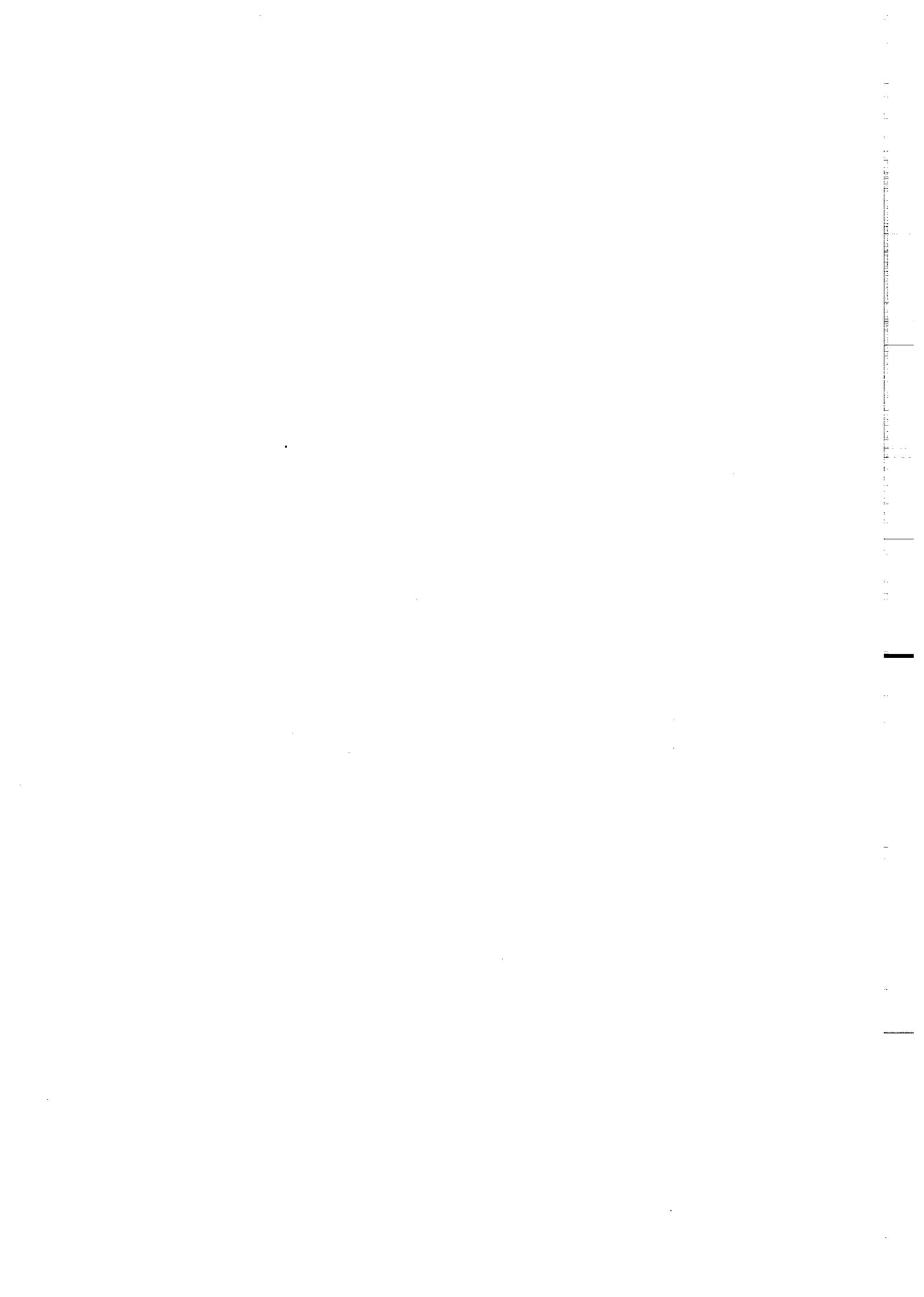


# L'EQUILIBRAGE DES COUPES GEOLOGIQUES

**Buts, méthodes, et applications**

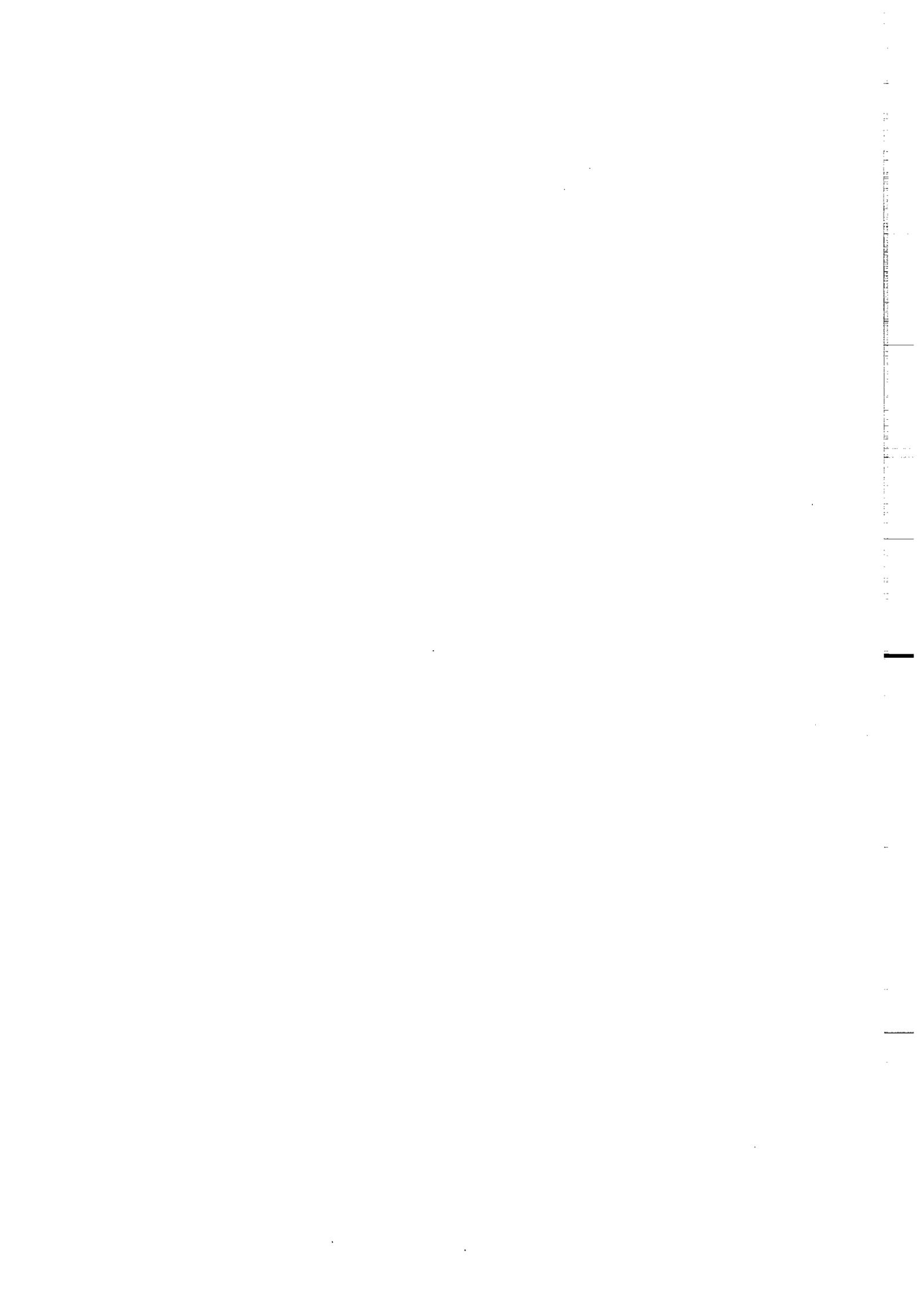
**Recueil d'articles** de G. Ménard, J.L. Mugnier, J.P. Gratier, L. Endignoux (Grenoble); F. Meilliez (Le Mans); S. Triboulet (Pau) & J.F. Ballard (Rennes); C. Tempier (Marseille); J.L. Faure & M. Séguret (Montpellier); J. Deramond *et al.* (Toulouse).

**Atelier du GET, 8 avril 1987, organisé par J.P. Gratier**



## SOMMAIRE

- Pages 1 : Introduction, J.P. Gratier
- 5 à 25 : Méthodologie générale de construction des coupes équilibrées, G. Ménard.
- 27 à 60 : Les étapes de la construction d'une coupe équilibrée, exemple et discussion, J.L.Mugnier.
- 61 à 75 : Exemples d'équilibrage de coupes géologiques :  
exercice n° 1 : paramètres sur lesquels jouer pour équilibrer une coupe, G. Ménard.
- 77 à 84 : Exercice n° 2 : modèle d'anticlinal de rampe et cisaillement couche sur couche associé, G. Ménard.
- 85 à 92 : Importance des modèles de failles dans l'équilibrage des coupes en distension, J.L. Faure et M. Séguret.
- 93 à 107 : La tectonique pelliculaire et ses limites en pratique : exemple des Rocheuses Canadiennes et de l'Ardenne, F. Meilliez.
- 107 à 111 : Quelques problèmes posés par la construction de coupes équilibrées dans une région géologiquement très étudiée, le cas de la provence, C. Tempier.
- 113 à 118 : Reflexions sur la construction de coupes équilibrées dans les zones en raccourcissement, J. Deramond, P. Baby, G. Crouzet, M. Specht.
- 119 à 125 : Etude des techniques de restitution de coupes géologiques à partir de modèles expérimentaux, S. Triboulet & J.F. Ballard
- 125 à 134 : Coupes équilibrées crustales, G. Ménard.
- 135 à 143 : Modélisation 2D informatique et cinématique des chevauchements : exemple d'application à la structure du Pine Mountain, L. Endignoux et J.L. Mugnier.
- 145 à 158 : L'équilibrage et la restauration, en carte, de couches plissées et faillées, J.P. Gratier.



## METHODOLOGIE GENERALE DE CONSTRUCTION DES COUPES EQUILIBREES

par Gilles MENARD

L.G.I.T., Observatoire de l'Université de Grenoble,  
I.R.I.G.M., BP 68 St Martin d'Hères

### AVERTISSEMENT

Ce chapitre sur les coupes équilibrées est conçu pour les gens connaissant déjà les principes de construction d'une coupe géologique. La manière d'utiliser les signes de pendage, les épaisseurs de formations et la lecture de la carte géologique n'est pas rappelée ici.

## I - DEFINITION ET HYPOTHESES DE BASE

### A. DEFINITION

Une coupe équilibrée est une coupe interprétative d'une structure géologique actuelle telle qu'il existe un chemin cinématique possible entre l'état avant déformation et l'état actuel.

Le contrôle de l'existence d'un chemin cinématique possible de la déformation s'effectue en construisant parallèlement à la coupe interprétative actuelle une coupe reconstitutive avant déformation (Figure 1).

- Remarque 1 : le terme "coupe équilibrée" proposé par J.L. Mugnier (1984) pour traduire l'expression anglo-saxonne "balanced cross-section" sera utilisé ici de préférence à la traduction littérale "coupe balancée" qui nous semble moins heureuse.

- Remarque 2 : le terme "coupe équilibrée" s'applique à la coupe interprétative de l'état actuel et non pas à la coupe restituée à l'état initial.

- Remarque 3 : une coupe équilibrée contient implicitement, outre l'interprétation de la structure actuelle, un état avant déformation et un chemin cinématique. Il est capital d'appréhender ces trois éléments de manière globale et de raisonner de manière interactive sur les trois.

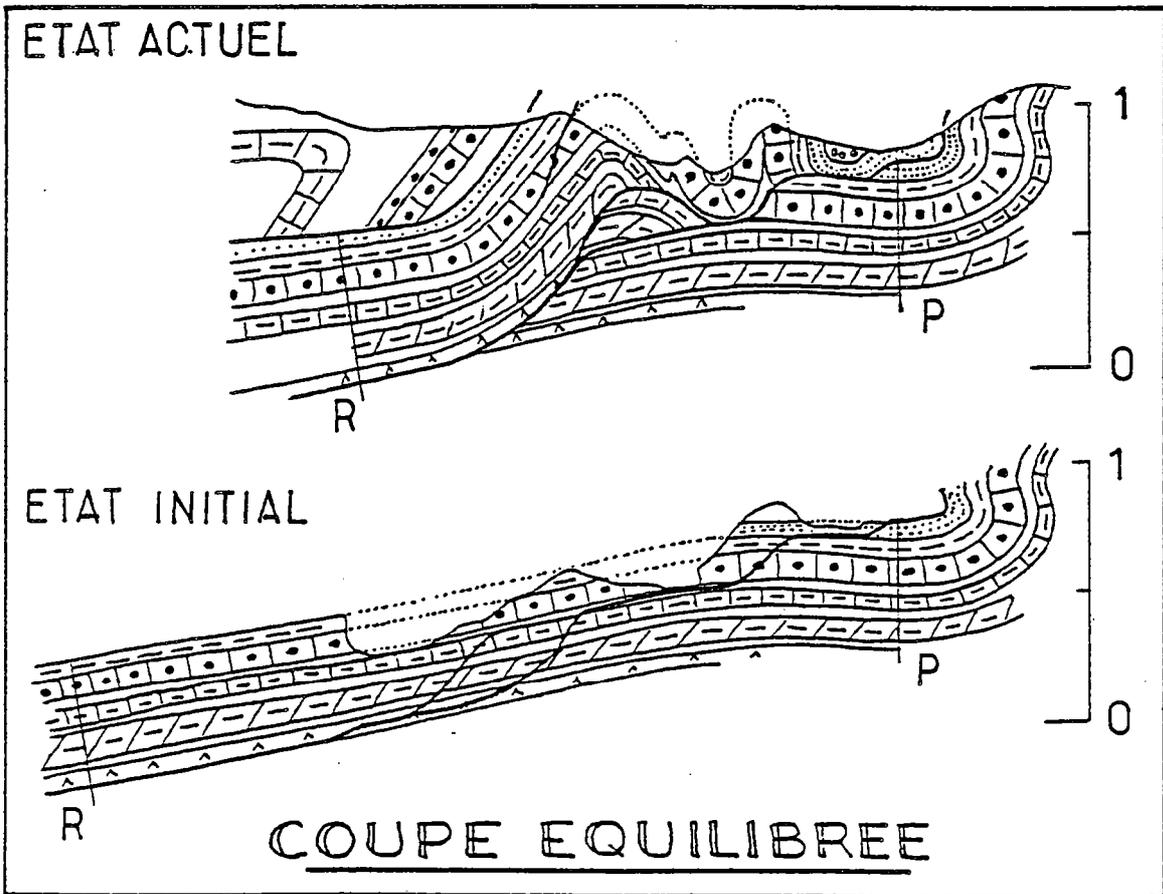
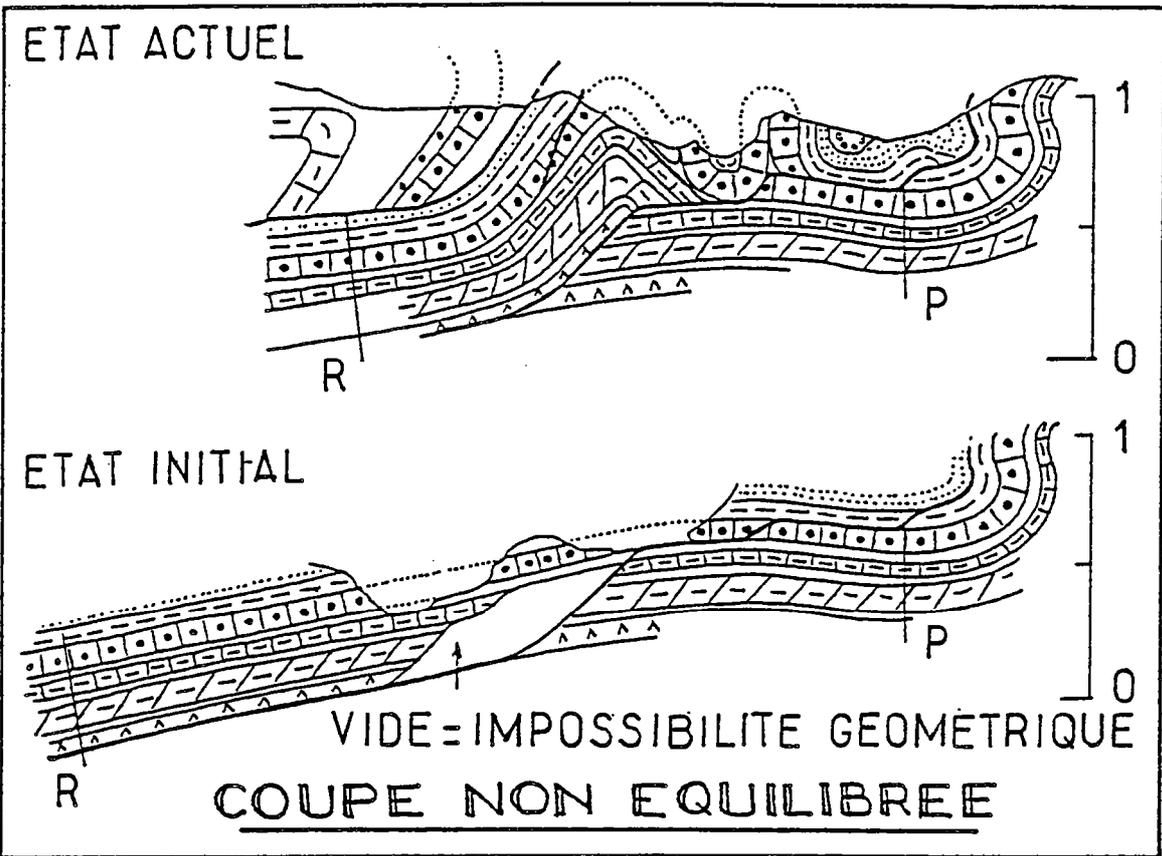
- Remarque 4 : il est important de garder à l'esprit qu'une coupe équilibrée ne représente qu'une solution possible, mais n'est pas la seule solution. Ainsi une coupe équilibrée n'est pas nécessairement juste, mais une coupe non équilibrée à toutes les chances d'être fautive.

### B. HYPOTHESES DE BASE

La construction d'une coupe équilibrée suppose réalisées un certain nombre d'hypothèses qu'il est bon de garder à l'esprit.

1) La coupe doit être construite parallèlement à la direction de raccourcissement (tectonique compressive) ou d'extension (tectonique extensive), direction qui n'est pas forcément perpendiculaire aux structures de surface. Notons que cette direction n'est pas facile à déterminer de manière précise dans beaucoup de cas.

Remarque : il importe de rester vigilant et de ne pas vouloir équilibrer à tout prix n'importe quelle coupe plaquée sur une section sismique sans s'être assuré au préalable que cette hypothèse est vérifiée (on peut tolérer un écart d'une vingtaine de degrés par rapport à la direction de transport).



**FIGURE 1 : NOTION DE COUPE EQUILIBREE**

2) On suppose qu'il y a conservation des volumes de roche lors de la déformation, condition qui est en général vérifiée dès lors que l'on a affaire à des roches ayant déjà subi la diagenèse avant leur déformation.

3) On suppose qu'il n'y a pas de déformation perpendiculaire au plan de coupe (état de déformation plane).

La combinaison des hypothèses 2 et 3 implique qu'il y a conservation des surfaces dans le plan de coupe durant la déformation.

Cette propriété, lorsqu'elle s'applique à des niveaux géologiques qui gardent une épaisseur constante, se traduit par la conservation des longueurs dans le plan de coupe durant la déformation.

- Remarque 1 : La conservation des longueurs dans les coupes équilibrées prend deux significations distinctes : la première est celle précédemment évoquée, à savoir la conservation de la longueur d'une couche (ou d'un ensemble de couches) entre l'état initial et l'état après déformation ; la seconde traduit le fait que les longueurs de deux niveaux situés à des profondeurs différentes doivent être identiques.

- Remarque 2 : C'est l'application de cette dernière propriété (identité des longueurs entre des niveaux compétents situés à des profondeurs différentes) qui permet dans la plupart des cas de mettre en évidence l'existence de structures cachées que les observations de surface et les données de subsurface seules ne permettraient pas de prévoir (cf. exercice n°1).

### C. RESTITUTION A L'ETAT INITIAL

Cette opération, qu'on peut assimiler à la construction de coupe rétrotectonique, permet de contrôler que la coupe interprétative que l'on a construite est bien équilibrée (cf. Figure 1).

Elle nécessite de se définir une ligne fixe située dans l'avant-pays non déformé (pin-line des auteurs anglo-saxons).

Elle nécessite en outre de quantifier les mouvements verticaux qui ont accompagné la déformation. Si dans le cas des coupes en séries sédimentaires le problème ne se pose pas dans la mesure où l'on peut presque toujours remettre certains niveaux à l'horizontale, dans le cas de coupes à une échelle plus importante (à l'échelle de la croûte par exemple) il peut être nécessaire de faire appel à des données spécifiques permettant de contrôler ces mouvements verticaux (mouvements de surrection en particulier).

- Remarque 1 : Le jugement critique du géologue doit porter aussi bien sur cet état restitué avant déformation que sur la coupe interprétative de l'état actuel (cf. Figure 1).

- Remarque 2 : Dans le cas de cinématique complexe, on peut être conduit à restituer plusieurs étapes de déformation intermédiaires entre l'état actuel et l'état initial.

### D. CONSEQUENCES SUR LA DEMARCHE A SUIVRE

Il ressort de la définition et des remarques précédentes que la construction des coupes équilibrées doit être un travail interactif sur trois éléments :

- l'état initial
- la structure actuelle
- le chemin cinématique permettant le passage de l'un à l'autre.

Ce travail conduit à l'élaboration d'un modèle caractérisé par :

- le fait qu'il n'est pas unique

- le fait qu'il peut évoluer au fur et à mesure que l'on acquiert de nouvelles données.

Si les trois éléments précédents interviennent de manière sensiblement équivalente dans l'élaboration du modèle, ils ne sont toutefois pas tous autant contraints.

La structure actuelle est en générale la mieux contrainte par un certain nombre de données de surface et de subsurface. Par contre la géométrie initiale ainsi que le chemin cinématique sont déterminés en grande partie à partir d'hypothèses ou de modèles souvent non explicitement formulés, voire parfois dont le géologue n'a pas même conscience.

La construction de coupes équilibrées doit donc conduire le géologue à formuler explicitement quelles sont les contraintes sur ses modèles ainsi que toutes les hypothèses qu'il y introduit.

## E. DOMAINE D'APPLICATION

Le domaine d'application des coupes équilibrées découle directement des hypothèses qui sont à la base de leur construction.

Ainsi on n'a pas le droit d'équilibrer une coupe lorsqu'on n'est pas dans la direction de raccourcissement (ou d'extension) principale : par exemple vouloir équilibrer dans la même région des coupes se coupant selon un angle important est une aberration.

Par contre, la non conservation des surfaces au cours de la déformation, si elle rend l'équilibrage des coupes difficile, n'interdit pas en toute rigueur leur construction. Il faut alors être capable de quantifier le changement de surface qui accompagne la déformation. Cela se présente dans les cas où la déformation n'est pas plane (par exemple lorsqu'il y a extension perpendiculaire au plan de coupe) où lorsqu'il y a changement de volume durant la déformation (par diagenèse ou du fait de la tectonique). Si l'on peut estimer la variation de surface accompagnant une déformation, on peut tenir compte lorsqu'on restitue l'état initial.

D'un point de vue pratique, dans les cas où l'on a le droit de construire une coupe équilibrée (direction adéquate, pas de changement de surface ou changement de surface connu) la construction sera plus rigoureuse dans les cas suivants :

a - lorsque les déplacements sur les discontinuités sont très importants par rapport à la déformation interne : une structure dans laquelle le raccourcissement est absorbé par des chevauchements pourra être équilibrée de manière bien plus rigoureuse qu'une structure dans laquelle le raccourcissement est absorbé par des plis faillés.

b - lorsque les séries contiennent plusieurs niveaux de roches compétentes pour lesquels l'hypothèse de conservation des longueurs est acceptable. Par contre, des séries constituées de roches incompétentes (marnes) auront toutes les chances de subir une déformation interne intense et inhomogène ce qui rend l'équilibrage très mal contraint. De manière plus générale, toute structure ayant subi une déformation interne intense et inhomogène, quelle que soit sa lithologie, se prêtera très mal à un équilibrage rigoureux (cas, en particulier, des séries ayant subi un métamorphisme pendant la déformation).

Remarque : la non isopacité des couches n'est pas un facteur qui empêche l'équilibrage des coupes ; mais c'est un facteur qui rend la solution moins contrainte.

Pour récapituler, c'est dans le cas de structures présentant d'importants chevauchements affectant des séries qui comportent plusieurs niveaux compétent que la construction des coupes équilibrées est la plus performante (performante dans la mesure où l'équilibrage permet de mettre en évidence des parties cachées de la structure).

## II - DETERMINATION DES CONTRAINTES GEOMETRIQUES

Le terme "contrainte", nous le rappelons, est utilisé au sens de contrainte sur un modèle. Les contraintes géométriques sont fournies par un certain nombre de données.

#### A. DONNEES DE SURFACE

Ces données peuvent être dans le meilleur des cas une coupe géologique complète au voisinage de la surface ou bien un certain nombre de pendages de couches, certaines valeurs d'épaisseur de formations ou encore la position (et éventuellement le pendage) de certaines failles.

#### B. DONNEES DE SUBSURFACE

Ces données peuvent être fournies soit par forages (position et pendage de certaines couches en profondeur) soit par sismique sous forme d'horizons continus ou non.

#### C. MISE EN FORME DE CES DONNEES

Dans certains cas ces données ne peuvent pas être utilisées de manière brute.

Les données de surface en particulier peuvent nécessiter un lissage des variations de courte longueur d'onde (plissottements par exemple) afin de raisonner sur des éléments comparables quant à leur longueur d'onde avec les données sismiques.

Les données sismiques nécessitent souvent d'être hiérarchisées en fonction de leur degré de fiabilité. En particulier, il est important de bien distinguer les marqueurs dont l'existence est sûre de même que leur attribution géologique (parce que corrélables à la surface ou rencontrés en forage) des marqueurs sismiques dont l'existence est sûre mais dont la signification géologique est hypothétique.

De manière analogue, il arrive fréquemment que certains éléments tels les failles aient une existence certaine mais une position imprécise et une géométrie franchement hypothétique.

### III - FORMULATION DES HYPOTHESES SUR LA GEOMETRIE INITIALE

Il s'agit de prendre conscience d'éléments qui sont implicitement contenus dans la coupe, et de les formuler de préférence avant de construire la coupe. Ces éléments sont relatifs à un certain nombre de problèmes concernant la géométrie initiale des formations.

#### A. LES VARIATIONS D'ÉPAISSEUR

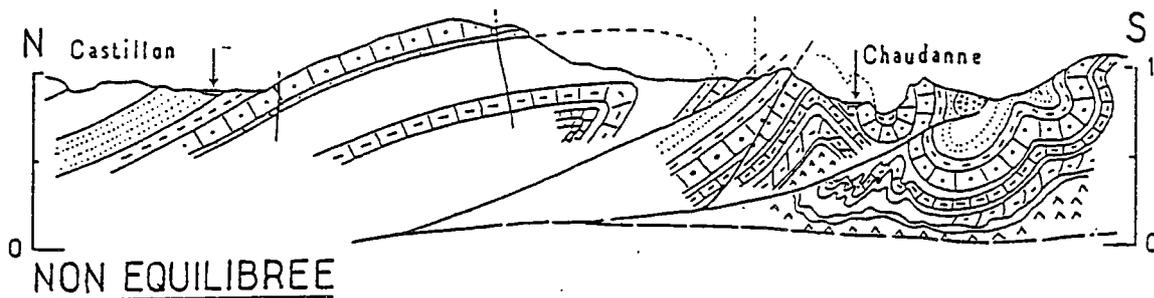
Un problème fréquent est celui des variations d'épaisseur de certaines formations observées sur une coupe (entre les deux flancs d'un synclinal ou de part et d'autre d'une faille par exemple) et pour lesquelles se pose la question de la manière dont elles s'effectuent.

Ces variations peuvent se produire de manière très régulière, de manière assez rapide à l'occasion de flexure, ou de manière très rapide à l'occasion de faille, tous ces cas correspondent à des conditions particulières de la sédimentation.

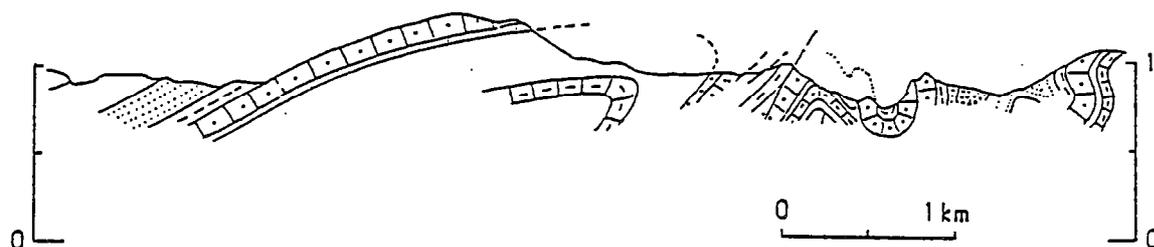
Elles peuvent également être dues à l'érosion.

À l'échelle crustale le même problème se pose notamment dans les régions où une tectonique compressive a réactivé d'anciennes structures acquises lors de phénomènes extensifs (amincissement crustal lié au phénomène de rifting).

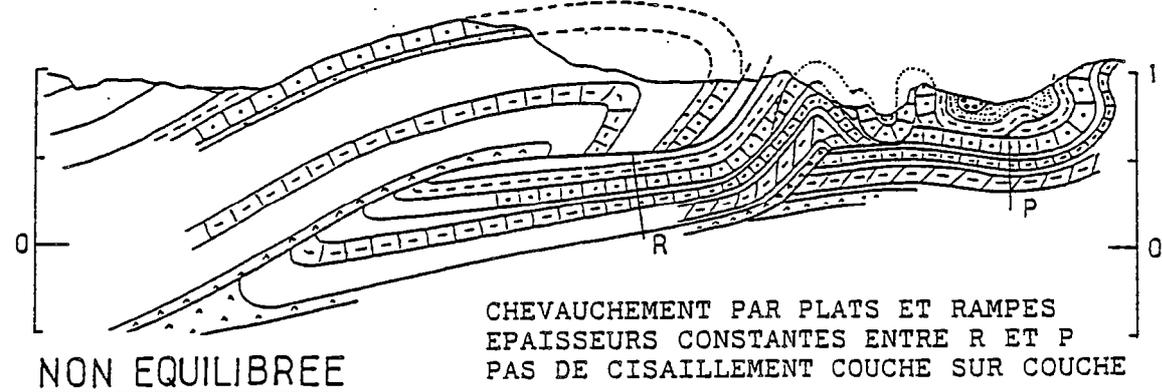
1 COUPE GEOLOGIQUE "CLASSIQUE"



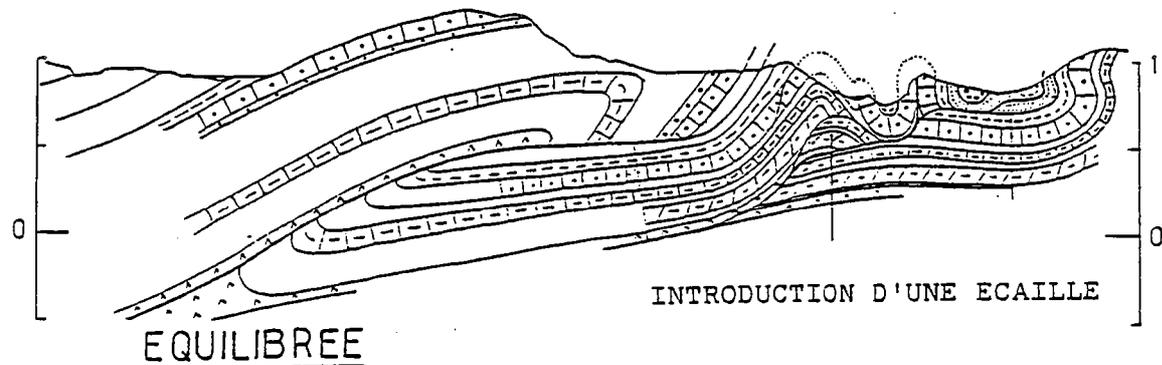
2 PARTIE SUPERFICIELLE DE LA COUPE



3 INTERPRETATION A PARTIR D'UNE HYPOTHESE STRUCTURALE



4 MODIFICATION DE LA COUPE



**FIGURE 2 : IMPORTANCE RELATIVE DE L'HYPOTHESE STRUCTURALE ET DE L'EQUILIBRAGE**

## B. HORIZONTALITE DES FORMATIONS

Lors de la remise à l'état avant déformation à une certaine époque, on peut être conduit à envisager des cas où les dépôts n'étaient pas horizontaux : il faudra alors tâcher de connaître la paléobathymétrie et prendre en compte tous les éléments permettant de mettre en évidence une paléopente.

Il faut noter toutefois que le fait d'intégrer ces éléments au modèle n'intervient qu'à un stade déjà assez avancé de l'interprétation. Dans la plupart des cas on se contente de remettre les niveaux à l'horizontale, ce qui au moins dans un premier temps est largement suffisant.

## C. FAILLES ANTERIEURES A LA DEFORMATION

Ce problème (problème de l'héritage tectonique) est particulièrement important d'une part dans la mesure où il peut compliquer notablement l'état avant déformation (par rapport aux schémas simples auxquels on se réfère pour les bassins sédimentaires, et d'autre part dans la mesure où ces structures héritées contrôlent en les compliquant souvent les déformations ultérieures pour lesquelles on équilibre la coupe.

Il importe de formuler clairement quelles sont les structures que l'on considère comme héritées sur une coupe (paléo failles normales ; blocs basculés, failles décrochantes recoupant obliquement le plan de coupe ...) et si on les considère comme passives ou actives dans les déformations ultérieures.

## IV - FORMULATION DES HYPOTHESES SUR LA CINEMATIQUE

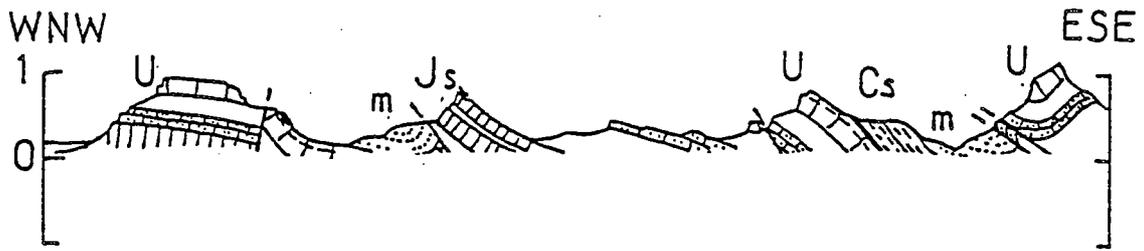
Il s'agit ici de définir les hypothèses structurales qui guident l'interprétation, ces hypothèses portant sur les déplacements (horizontaux et verticaux), sur la déformation interne, sur l'évolution de ces paramètres et sur leurs relations.

### A. CHOIX DU STYLE TECTONIQUE

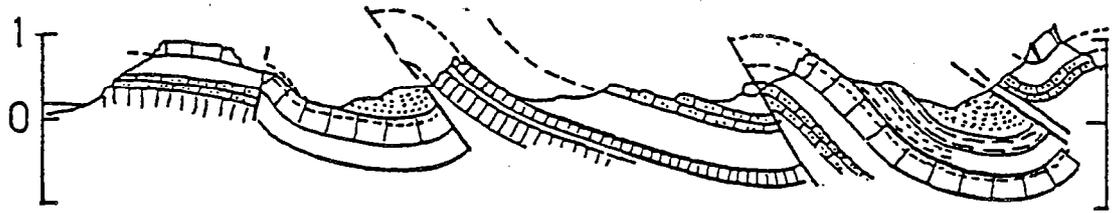
Il s'agit de définir le type de modèle tectonique que l'on utilise, en fonction en particulier de la géométrie des surfaces de discontinuité. Le choix de ce modèle est particulièrement crucial dans la mesure où d'une part il conditionne l'interprétation des parties cachées de la structure (Figure 2) et d'autre part il oriente également la vision que l'on peut avoir des structures de surface (Figure 3).

La Figure 2 montre une coupe géologique "classique" (coupe 1) dont on a extrait la partie superficielle considérée comme donnée de départ pour une réinterprétation (coupe 2). La coupe 3 montre une interprétation à partir d'une hypothèse structurale (pli faillé affectant une zone de flexure dans la partie gauche de la coupe ; chevauchement par plats et rampes dans la partie droite de la coupe) : cette coupe n'est toutefois pas équilibrée (cf. Figure 1 en haut). La coupe 4 montre une modification de la coupe 3 par introduction d'une écaille (structure en duplex) qui permet de l'équilibrer. Le but de cette figure est de montrer qu'il y a plus de différence dans l'interprétation de la partie profonde de la structure entre les stades 1 et 3 (différence d'hypothèse structurale) qu'entre les stades 3 et 4 (passage d'une coupe non équilibrée à une coupe équilibrée en conservant la même hypothèse structurale de base).

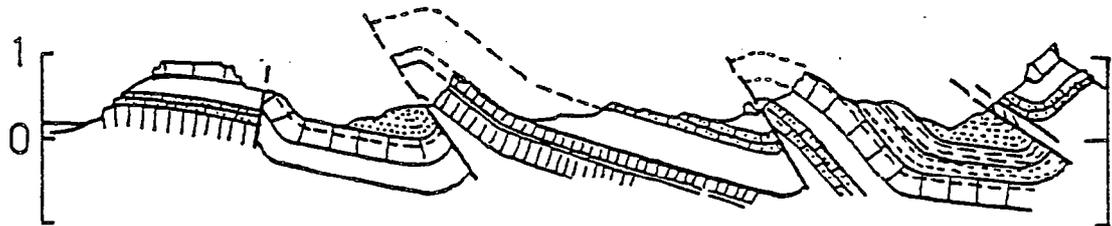
La Figure 3 montre comment la manière de saisir une structure dépend des modèles tectoniques que l'on a en tête (consciemment ou non). La coupe 1 peut être perçue aussi bien comme une suite de plis avec des variations de courbure (coupe 2) (modèle de plissement souple sous-jacent) que comme une suite de segments reliés par des plis (coupe 3) (modèle en kink (coupe 4) associé à des chevauchements en plats et rampes sous-jacents). Compte tenu de l'importance de ces modèles dans l'interprétation des structures, il nous paraît utile de faire un bref rappel des principaux modèles auxquels on se réfère.



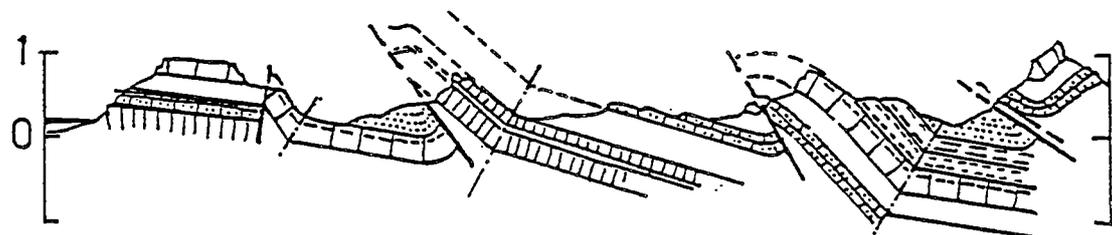
1 COUPE DE LA CLUSE DE L'ISERE (D'APRES GIDON)



2 PERCEPTION EN PLIS AVEC UNE COURBURE VARIABLE



3 PERCEPTION EN SEGMENTS RELIES PAR DES PLIS



4 MODELE EN KINKS SOUS-JACENT A LA COUPE 3

**FIGURE 3 : PERCEPTION D'UNE STRUCTURE  
SELON LE MODELE SOUS-JACENT**

En tectonique compressive (Figure 4) quatre types de modèles se rencontrent le plus souvent :

1) Le modèle de chevauchement en plats et rampes dans lequel la surface de chevauchement est une succession de segments parallèles à la stratification (plats) alternant avec des segments recoupant la stratification (rampes). Dans ce modèle, les plis associés au chevauchement sont dûs au fait que la série chevauchante doit se mouler sur les changements de pendage de la surface de chevauchement. Dans ce modèle les paramètres à déterminer sont :

- la géométrie de la surface de chevauchement (profondeur et longueur des plats, profondeur des rampes et angle qu'elles font avec la stratification).
- la valeur du déplacement du compartiment chevauchant.

2) Le modèle de chevauchement en faille listrique dans lequel la surface de chevauchement est une faible courbe devenant plate en profondeur. Dans ce modèle, les paramètres à déterminer sont :

- la géométrie de la faille (en particulier la profondeur à laquelle elle devient plate).
- la valeur du déplacement.

3) Le modèle de plissement en plis par flexion dans lequel la série décollée au-dessus d'un certain niveau se plisse (flambage) en conservant une épaisseur sensiblement constante. Dans ce modèle, les paramètres sont :

- la profondeur du niveau de décollement (liée à la longueur d'onde des plis).
- le raccourcissement.

Remarque : Nous ne parlerons pas des plis avec aplatissement qui se rencontrent dans des domaines structuraux où il est irréaliste de vouloir équilibrer des coupes.

4) Le modèle d'une faille en profondeur s'amortissant en un pli en surface, modèle dans lequel contrairement aux modèles 1 et 2 le déplacement ne reste pas constant le long de la faille. Si dans les modèles précédents une approche géométrique était suffisante pour cerner le problème, dans le cas présent il est nécessaire de faire intervenir les propriétés mécaniques du matériau pour connaître la manière dont s'amortit le déplacement. C'est pour cela que ce type de modèle n'a été que peu étudié et quantifié jusqu'ici.

En tectonique extensive (Figure 5) deux types de modèles sont utilisés :

1) Le modèle des blocs basculés dans lequel des blocs rigides situés au-dessus d'un milieu ductile subissent une rotation. Dans ce modèle le problème est d'ajuster au mieux les contacts entre blocs afin de minimiser les vides et les recouvrements.

2) Les modèles avec faille listrique dans lesquels le déplacement d'un bloc déformable le long d'une faille courbe devenant plate en profondeur s'accompagne d'une accommodation du bloc à la géométrie de la faille.

Différentes variantes de ce type de modèle existent selon la manière dont on déforme le bloc effondré pour qu'il accomode la forme de la faille.

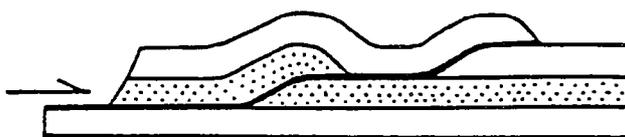
Dans ce type de modèle, les paramètres à déterminer sont :

- la géométrie de la faille et en particulier la profondeur à laquelle elle s'applatit.
- la valeur du déplacement sur la faille.

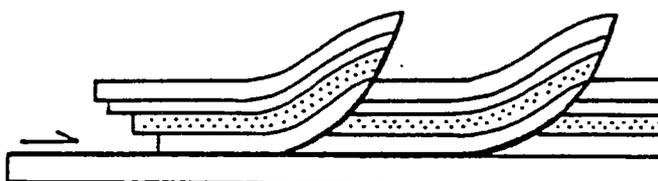
## B. EVOLUTION DE LA DEFORMATION

Il s'agit de définir la manière dont évolue la déformation aussi bien dans l'espace (dans le plan de la coupe et perpendiculairement) que dans le temps. Cette évolution est particulièrement importante dans la mesure où elle conditionne les étapes de la restitution.

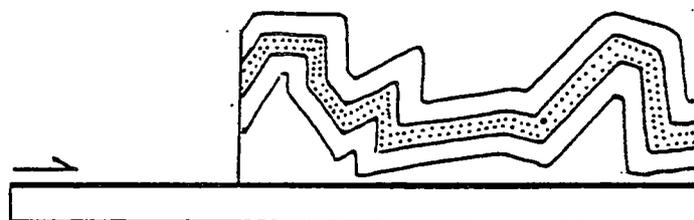
1. CHEVAUCHEMENTS PAR  
PLATS ET RAMPES  
(DAHLSTROM 1970)



2. FAILLES LISTRIQUES  
(DAHLSTROM 1970)

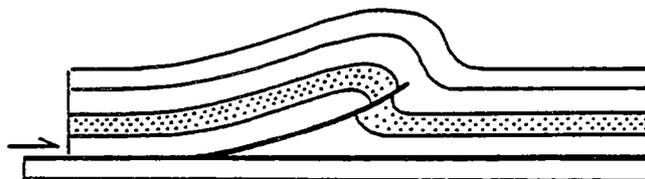


3. PLEIS ISOPAQUES

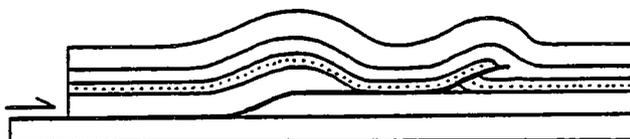


4. PLI EN SURFACE ET  
FAILLE EN PROFONDEUR

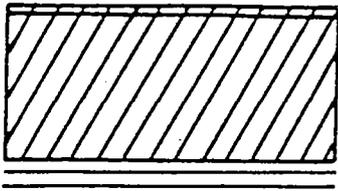
a. FAILLE LISTRIQUE



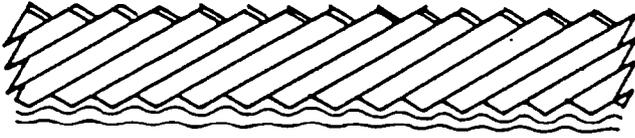
b. FAILLE AVEC PLATS  
ET RAMPES



**FIGURE 4 : MODELES ELEMENTAIRES DE DEFORMATION  
EN COMPRESSION**

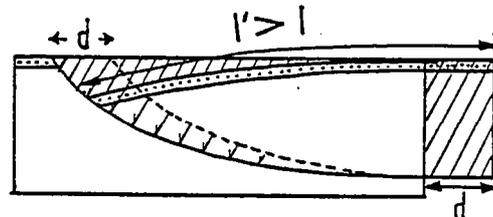
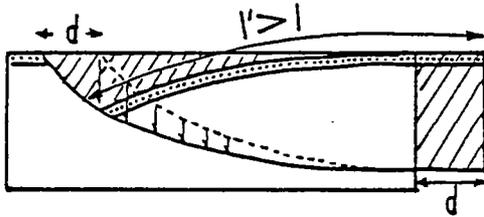
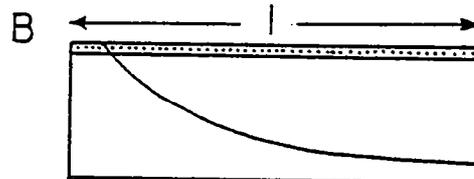
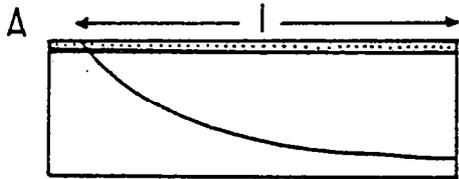


1. BLOCS BASCULES SANS DEFORMATION INTERNE

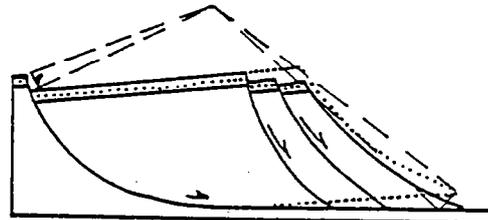
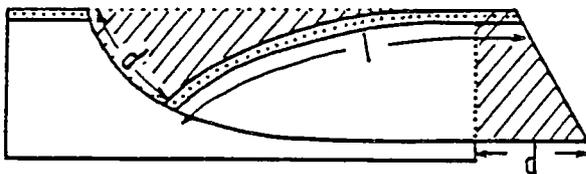
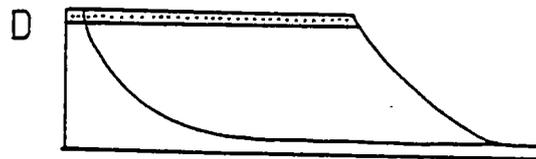
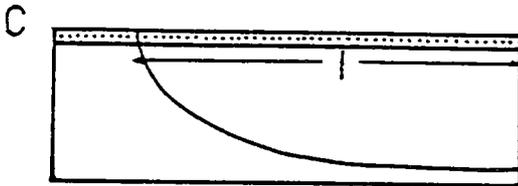


FAILLES RECTILIGNES - MILIEU FRAGILE SUR MILIEU DUCTILE (D'APRES THOMSON, 1960)

2. BLOCS BASCULES AVEC DEFORMATION INTERNE



FAILLE LISTRIQUE - DEPLACEMENT UNIFORME A L'ARRIERE DU BLOC DEFORMATION A L'AVANT DU BLOC PAR CISAILLEMENT SIMPLE VERTICAL (A-D'APRES GIBBS, 1983) OU INCLINE (B-D'APRES WHITE et al 1986).



FAILLE LISTRIQUE - DEPLACEMENT CONSTANT SUR LA FAILLE -  $l = cte$  (D'APRES HAMBLIN, 1965)

FAILLE CIRCULAIRE - DEFORMATION DE LA TETE DU BLOC (D'APRES MORETTI, 1987)

FIGURE 5 : MODELES ELEMENTAIRES DE DEFORMATION EN EXTENSION

### 1. Une seule déformation

C'est le cas le plus simple (cf. paragraphe précédent) pour lequel une fois définies la géométrie de la surface de décollement et la valeur du raccourcissement il ne reste qu'à préciser la durée de la déformation (ce qui permet de calculer sa vitesse).

### 2. Plusieurs déformations

C'est le cas le plus fréquent, cas où sur une même coupe coexistent plusieurs structures. Le problème est alors de définir comment ces différentes structures interfèrent.

Dans le cas des structures imbriquées, c'est-à-dire qui se relaient tout en se raccordant à la même surface de décollement (cf. Figure 4-2), deux questions se posent : d'une part quel est l'ordre d'apparition des différentes structures (relai vers l'avant ou vers l'arrière), d'autre part de quelle manière une structure donnée, dans son évolution propre, déforme-t-elle une ou des structures déjà formées (basculement, plissement) (cf. Figure 6-1) ?

Un cas plus complexe est celui des séquences dans le désordre ("out of sequence" des auteurs anglo-saxons) dans lesquelles un dispositif chevauchant recoupe une structure chevauchante antérieure (cf. Figure 6-2). Il est dans ce cas nécessaire de restaurer la coupe au moins en deux étapes : avant la dernière déformation, puis avant la première déformation.

Dans tous les cas, il sera utile de préciser là encore la durée des déformations (et leur vitesse).

### 3. Erosion pendant la déformation

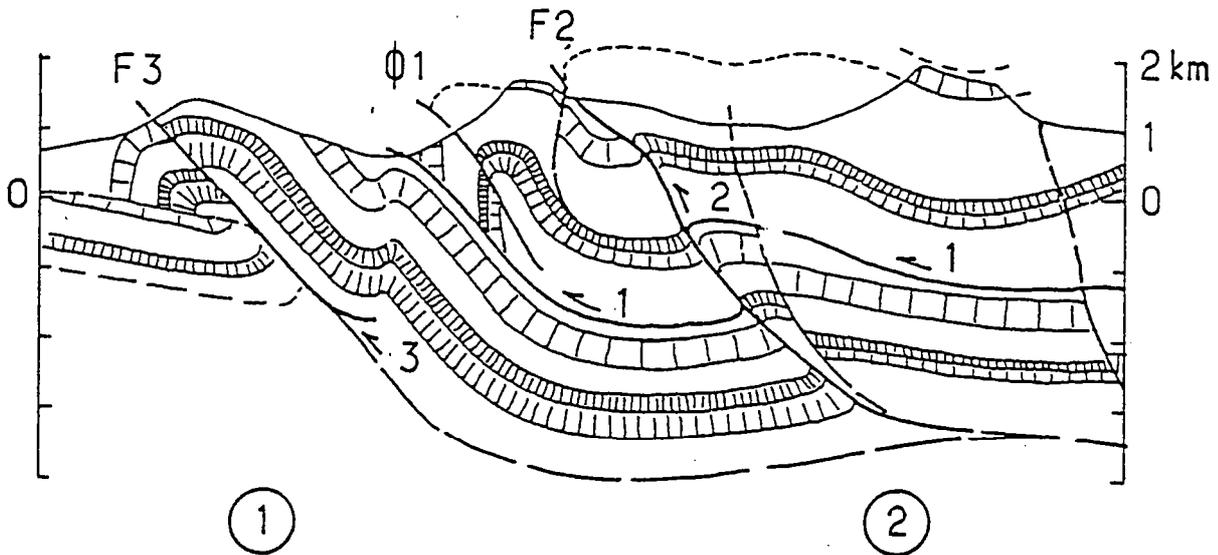
Le problème de l'érosion qui accompagne la déformation (destruction des reliefs créés par le raccourcissement) est important à prendre en compte dans le cas où cette érosion modifie les conditions de la déformation au cours de son évolution. C'est le cas en particulier de l'évolution d'un pli isopaque armé par un niveau compétent qui pourra évoluer de manière complexe dès que cette "carapace" aura été crevée par l'érosion. Comme dans le cas précédent on pourra être amené à restituer la coupe en plusieurs étapes pour tenir compte de cette évolution.

### 4. Cas de la séquence pli puis chevauchement

Le cas est ici évoqué d'une part parce qu'il correspond à une complication par rapport au schéma simple de chevauchement (en particulier par plats et rampes) qui est abondamment utilisé de nos jours, d'autre part parce qu'il semble s'appliquer dans un grand nombre de cas dans nos régions où une tectonique compressive a repris des structures héritées de périodes d'extension. Enfin il renouvelle l'approche classique des structures dans lesquelles un pli est associé à un chevauchement ; en effet dans beaucoup de cas un pli anticlinal (surtout lorsqu'il présente un flanc court fortement penté voire inverse) associé à un chevauchement (ou une faille inverse) est considéré comme s'étant formé par friction lors du chevauchement. On lui accorde ainsi une signification analogue à celle donnée aux crochons de faille. Or il semble que dans bien des cas, le pli soit antérieur au chevauchement qui en fait le recoupe tardivement. Cela correspond à un stade évolué de la figure 4-4 dans lequel le chevauchement profond qui s'amortit en un pli de surface finit par recouper ce même pli. L'exemple de la figure 6-3 montre une telle évolution : en Chartreuse (chaînes subalpines septentrionales des Alpes Occidentales) certains plis chevauchants montrent clairement une discordance des dépôts syntectoniques (molasse) sur leur flanc normal, ce qui prouve l'ébauche précoce du pli, alors que leur flanc inverse est franchement chevauchant sur cette même molasse.

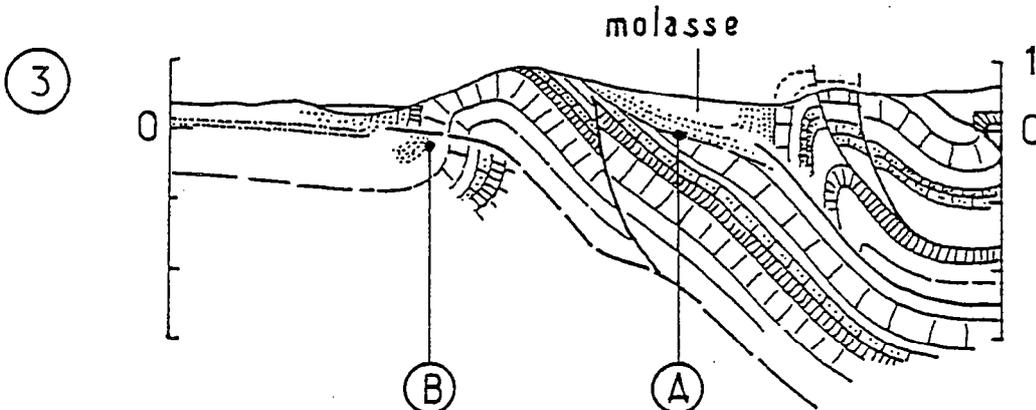
### 5. Evolution latérale des structures

Il est particulièrement important pour préciser l'évolution dans le temps d'une structure de regarder comment celle-ci évolue latéralement et en particulier comment elle s'amortit. On a ainsi souvent la possibilité d'avoir une image à un stade peu évolué de la déformation que l'on étudie.



F3 EST POSTERIEURE A  $\phi 1$   
 QU'ELLE DEFORME  
 SEQUENCE DANS L'ORDRE

F2 EST POSTERIEURE A  $\phi 1$   
 QU'ELLE RECOUPE  
 SEQUENCE DANS LE DESORDRE



CHEVAUCHEMENT SUR LA MOLASSE  
 → CHEVAUCHEMENT POST-PLI

DISCORDANCE DE LA MOLASSE  
 → PLI PRECOCE

**FIGURE 6 : EXEMPLES DE SEQUENCES  
 DE DEFORMATIONS**

### C. ESTIMATION DU RACCOURCISSEMENT (OU DE L'EXTENSION)

Ce paramètre est très important à connaître, en particulier dans le cas de grandes déformations.

On peut utiliser pour contraindre ce paramètre des raisonnements à partir de la notion de surface transférée. Cette notion est basée sur la conservation des surfaces dans le plan de coupe lors de la déformation.

La traduction de cette notion aussi bien en compression qu'en extension est représentée sur la Figure 7. Elle exprime qu'il existe une relation entre la profondeur du plan de décollement, la valeur du raccourcissement (ou de l'extension), l'altitude actuelle d'un horizon donné, son altitude avant déformation. La connaissance par mesure, calcul ou hypothèse de trois de ces paramètres permet de déduire la quatrième.

Un autre moyen de contraindre les valeurs du raccourcissement (ou de l'extension) est d'imposer une cohérence entre ces valeurs estimées pour les séries sédimentaires et celles estimées à une échelle supérieure (socle ou croûte toute entière).

### D. ESTIMATION DES MOUVEMENTS VERTICAUX

A l'échelle des coupes en séries sédimentaires on s'affranchit du problème en remettant à l'horizontale les derniers niveaux antétectoniques. Parfois, cette remise à plat peut permettre de mettre en évidence des mouvements verticaux régionaux qui ont accompagné les déformations étudiées.

Pour les coupes à l'échelle de la croûte, l'ampleur des mouvements verticaux qui accompagnent les déformations (subsidence de l'avant-pays, surrection du domaine chevauchant) est telle qu'il est nécessaire de les prendre en compte pour restituer aux différents stades antérieurs.

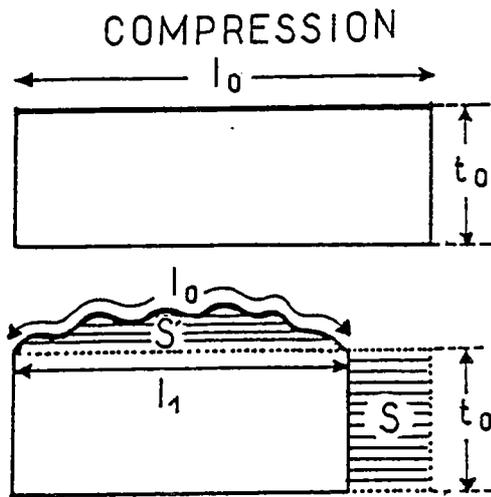
### E. PROBLEME DES RELATIONS ENTRE DEPLACEMENTS ET DEFORMATION INTERNE

Le problème est celui d'ensembles lithologiques fortement déformés de telle manière qu'on ne puisse plus appliquer les hypothèses de base des coupes équilibrées, à savoir la conservation des longueurs (découlant de la conservation des épaisseurs) au cours de la déformation. Il faut alors n'appliquer le principe de conservation des longueurs qu'aux niveaux considérés comme gardant une longueur constante.

Dans le cas de formation fortement déformée, le problème est de savoir si cette déformation s'ajoute au raccourcissement absorbé par déplacement sur une surface de chevauchement ou si elle accompagne ce déplacement. Il faut signaler que deux types de déformations accompagnent systématiquement les déplacements : tout d'abord le pliage et le dépliage des couches au passage d'une rampe s'accompagnent de cisaillements couche sur couche successifs et de sens opposé ; mais si les cisaillements doivent se compenser les déformations internes associées ne sont pas toutes réversibles et peuvent subsister (schistosité, stylolites, fentes de tension). Le deuxième cas est celui d'un plat empruntant une formation incompetent (marne) et dans lequel la surface de chevauchement est remplacée par une bande de cisaillement plus ou moins large : la déformation interne correspondante (schistosité, plissement) ne s'ajoute pas au déplacement de l'ensemble chevauchant par rapport à l'ensemble chevauché, mais en est un équivalent.

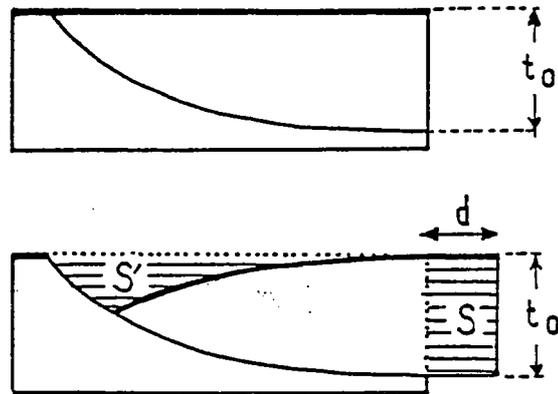
On voit ainsi que si l'on tient compte de ces deux cas de figure, il est malaisé de démontrer qu'il existe une déformation interne qui s'ajoute au chevauchement et absorbe un raccourcissement supplémentaire. On peut toutefois dans certains cas favorables utiliser la présence d'un marqueur antérieur à la déformation (faille verticale par exemple) déformée par cisaillement entre différents niveaux.

## 1 PRINCIPE



$$S' = (l_0 - l_1) t_0$$

## EXTENSION



$$S' = t_0 \cdot d$$

## 2 CALCUL DE S' ( EN COMPRESSION )

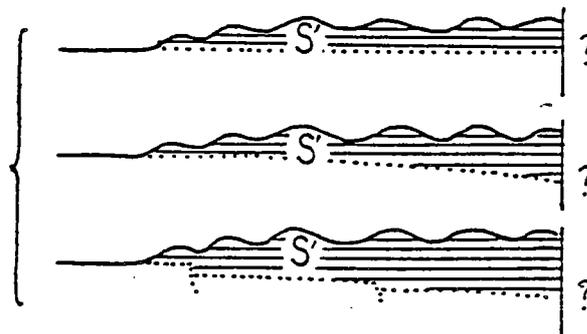
## INTERPOLATION



FAIBLE INCERTITUDE

FORTE INCERTITUDE

## EXTRAPOLATION



## 3 APPLICATION

- SI  $l_0$  PEUT ETRE MESURE (CURVIMETRE), ON PEUT CALCULER  $l_0 - l_1$  ET EN DEDUIRE  $t_0$ .
- SI  $t_0$  PEUT ETRE ESTIME (PLAN DE DECOLLEMENT), ON PEUT EN DEDUIRE LE RACCOURCISSEMENT.

FIGURE 7 : NOTION DE SURFACE TRANSFEREE

## F. PROBLEME DE LA DEFORMATION INTERNE INHOMOGENE

Lorsqu'un ensemble lithologique subit une déformation inhomogène (épaississement ou amincissement inhomogènes) sans que l'on puisse estimer cette déformation en un nombre suffisant de points, il est alors nécessaire de ne plus considérer la conservation des longueurs (inapplicable) mais seulement celle des surfaces. Il faut alors se fixer des contraintes géométriques (souvent en partie arbitrairement) sur la géométrie initiale : pour une géométrie entièrement définie par  $n$  paramètres, il faut s'en fixer  $(n-1)$  (la surface totale étant connue), et en déduire le paramètre manquant.

Ce genre d'approche est en particulier souvent utilisé lorsqu'on raisonne à l'échelle de la croûte, mais peut être envisagé également pour des ensembles sédimentaires.

## V - LA CONTINUITÉ LATÉRALE

Une contrainte supplémentaire peut être introduite sur une coupe en construisant des coupes parallèles (coupes sériées) et en imposant soit la constance soit une variation continue de tous les paramètres précédemment évoqués : valeurs de raccourcissement (ou d'extension) globale et des structures élémentaires, profondeur des surfaces de décollement, altitude des différents horizons, valeur des surfaces en excès associées à une ou plusieurs structures élémentaires (Figure 8) mouvements verticaux, longueur des plats, pendage et longueur des rampes, etc...

L'expérience montre que les contraintes apportées sur le modèle par cette approche sont parmi les plus fortes. En outre, on peut ainsi prendre en compte un grand nombre de données dispersées géographiquement sans faire des projections parfois délicates. Enfin cette pratique permet souvent de mettre en évidence que certaines hypothèses admissibles sur une coupe ne peuvent être maintenues latéralement. Le caractère très contraignant de cette démarche provient du fait qu'on impose une cohérence en trois dimensions au modèle au lieu de deux pour une coupe unique.

La Figure 8 montre un exemple (Chartreuse) dans lequel une anomalie dans l'évolution d'une surface en excès associée à une faille inverse conduit à modifier la géométrie en profondeur de cette faille ou la profondeur du plat correspondant à cette faille en profondeur.

Il est clair que si l'on avait considéré cette coupe (8-2) isolément, une telle anomalie n'aurait aucune chance d'apparaître.

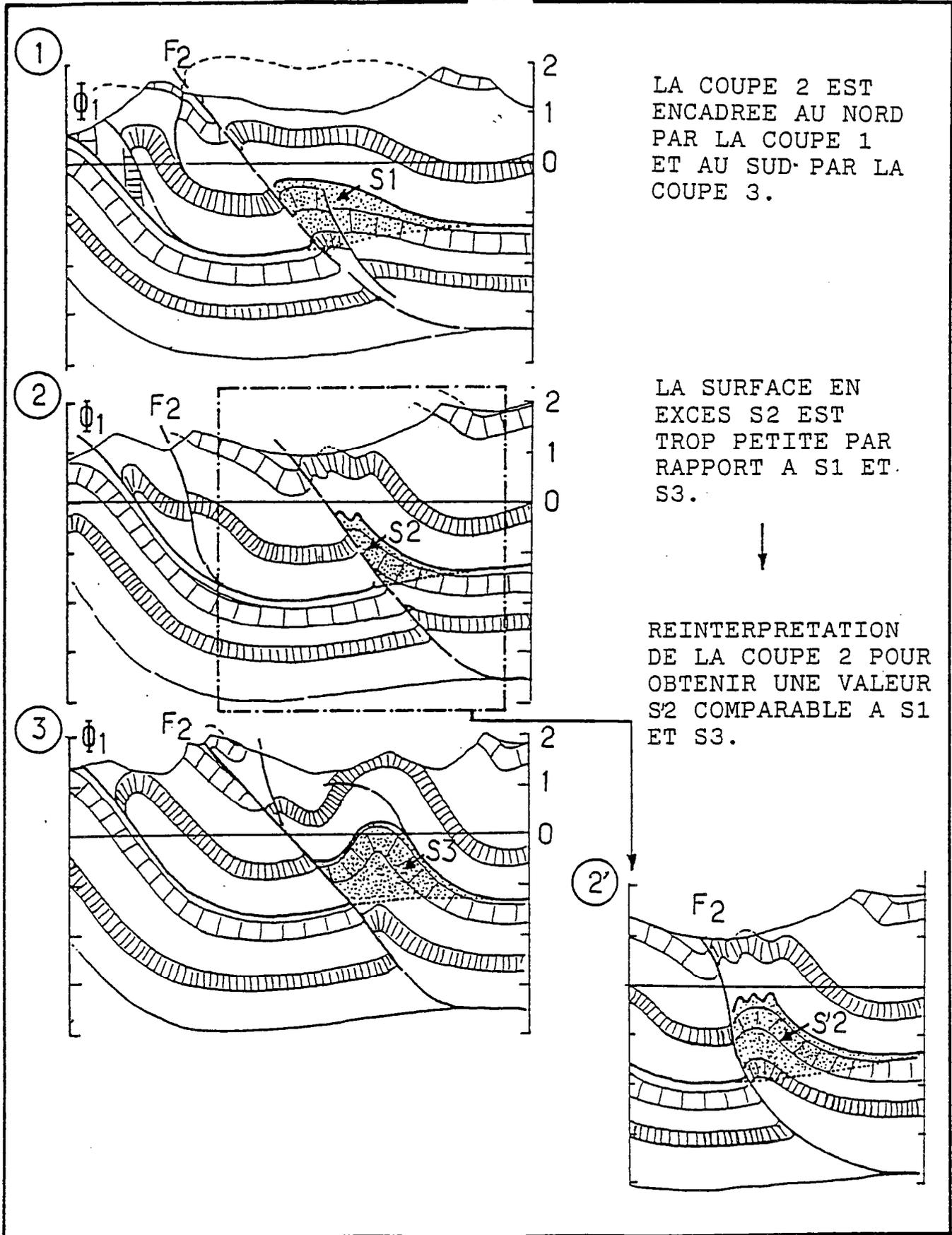
Il ressort ainsi que pour contraindre une longueur donnée de coupe, il faut étudier et donc acquérir des données bien au-delà du secteur considéré dans le plan de coupe et même au-delà de la coupe latéralement.

## VI - CONCLUSION - FORMULATION DES HYPOTHESES

Il est fortement recommandé, une fois achevée l'analyse de problème posé par une coupe à équilibrer, de formuler clairement tout ce que cette coupe contiendra implicitement (§ II, III, IV, V) en prenant soin :

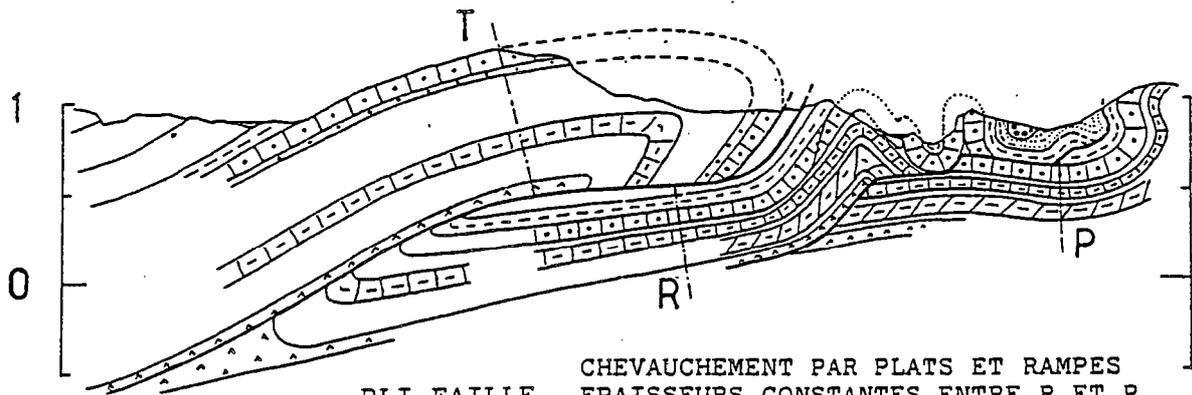
- de hiérarchiser les problèmes
- par ex : les déplacements par rapport à la déformation interne.
- pour chaque problème (ou question), de dire clairement quelles sont les hypothèses ou le modèle utilisés.
  - pour les hypothèses, de préciser quelles en sont les justifications (éventuellement préciser si elles sont arbitraires).
  - pour les modèles, de définir quelles sont les contraintes dont on dispose sur ces modèles.

Même si certaines de ces hypothèses ou certains modèles utilisés s'avèrent non satisfaisants et s'ils sont modifiés au cours de la phase d'équilibrage proprement dit, il est nécessaire de les formuler avant de construire les coupes proprement dites.



**FIGURE 8 : CONTRAINTE APPORTEE PAR LA CONTINUITE LATERALE D'UNE SURFACE EN EXCES**

A INTERPRETATION A PARTIR D'UNE HYPOTHESE STRUCTURALE

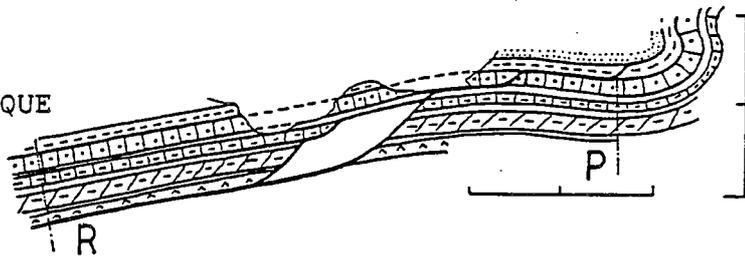


PLI FAILLE  
FLEXURE ENTRE T ET R

CHEVAUCHEMENT PAR PLATS ET RAMPES  
EPAISSEURS CONSTANTES ENTRE R ET P  
PAS DE CISAILLEMENT COUCHE SUR COUCHE

IMPOSSIBILITE GEOMETRIQUE  
(VIDE)

NON EQUILIBREE

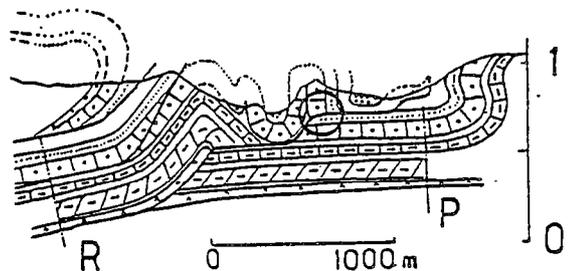


PROBLEME: COMMENT COMBLER LE DEFICIT DE LONGUEUR DES NIVEAUX PROFONDS ( $J_{1-2}$  ET L) PAR RAPPORT AU NIVEAU SUPERFICIEL ( $J_{6-9}$ )?

B MODIFICATION DE PARAMETRES POUR EQUILIBRER

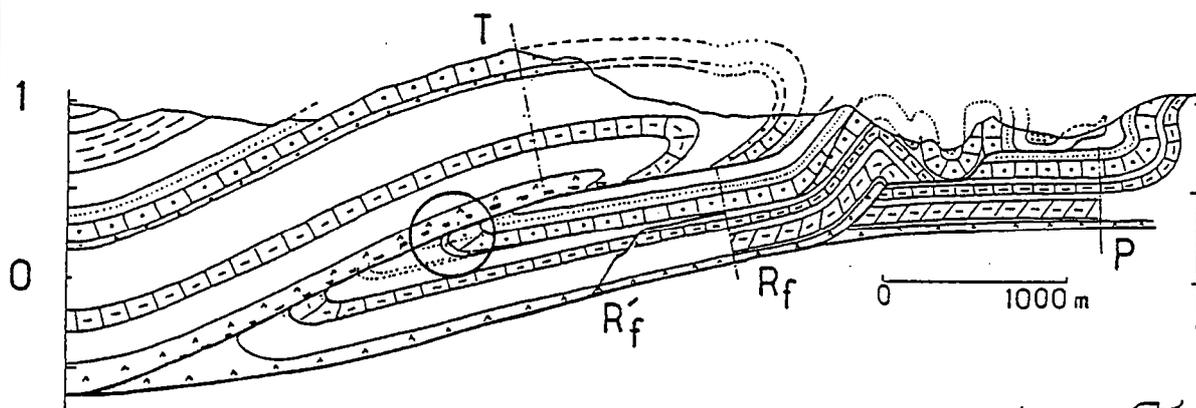
1 LE RACCOURCISSEMENT

IL EST IMPOSE PAR LA LONGUEUR DE  $J_{6-9}$  ENTRE R ET P. LA MODIFICATION DE CETTE LONGUEUR QUE L'ON PEUT FAIRE (cf CERCLE) EST TRES INSUFFISANTE POUR EQUILIBRER LA COUPE.



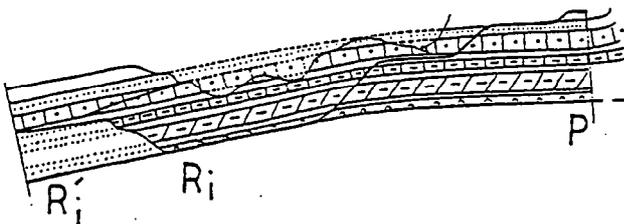
**FIGURE 9 : EXEMPLE D'EQUILIBRAGE D'UNE COUPE**

## 2 LE CISAILLEMENT COUCHE SUR COUCHE



SI L'ON ADMET LE CISAILLEMENT  
QUI TRANSFORME  $R'_i$  EN  $R_i$  ALORS

LA COUPE EST EQUILIBREE



NB: IL FAUT MODIFIER LE PLI (cf. CERCLE) EN FONCTION DE  
CE CISAILLEMENT.

## 3 LA GEOMETRIE DES SURFACES DE CHEVAUCHEMENT

APPROFONDISSEMENT DU PLAN DE DECOLLEMENT (cf. CERCLE C1)  
POUR GAGNER LA SURFACE MANQUANTE.

INTRODUCTION D'UNE ECAILLE (cf. CERCLE C2) POUR PLACER  
LES LONGUEURS MANQUANTES DE  $J_{1-2}$  ET L.

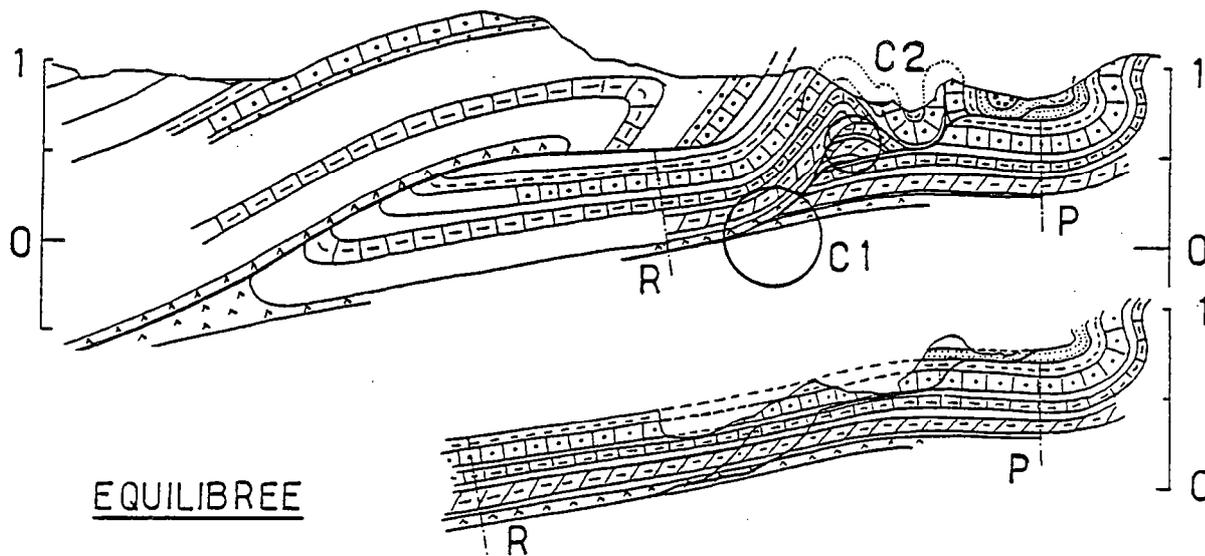


FIGURE 9 : EXEMPLE D'EQUILIBRAGE D'UNE COUPE

## VII - L'EQUILIBRAGE

L'équilibrage est l'ensemble des modifications du graphique et/ou des hypothèses qui tendent à rendre égales ou compatibles entre elles les longueurs des différents niveaux compétents d'une série stratigraphique.

D'un point de vue méthodologique, il est recommandé de progresser simultanément sur plusieurs coupes parallèles en se contentant d'un équilibrage approximatif (à quelques pour cent près). Une fois trouvée une solution satisfaisante pour l'ensemble des coupes on affine pour atteindre un équilibrage rigoureux en restituant simultanément à l'état avant déformation.

Dans le même esprit, il est conseillé d'aborder le travail sur les coupes parallèles à une échelle moins détaillée que l'échelle finale désirée et de ne travailler à cette échelle que pour la phase ultime de l'équilibrage.

Concrètement l'équilibrage s'effectue en jouant sur un certain nombre de paramètres géométriques.

### A. LE CISAILLEMENT COUCHE SUR COUCHE

Ce paramètre est important dans la mesure où quelle que soit la géométrie proposée pour l'interprétation d'une structure donnée, on peut toujours trouver une répartition du cisaillement couche sur couche qui rende la coupe équilibrée. Il faut ainsi être particulièrement critique sur le caractère acceptable ou non cette répartition du cisaillement couche sur couche. Cela est d'autant plus important que ce paramètre est extrêmement difficile à contraindre pratiquement : il faut donc lutter contre une tendance à la facilité qui conduit à compenser les insuffisances du modèle par une répartition du cisaillement couche sur couche adéquate. Un bon moyen est de s'imposer au départ cette répartition. La critique de la répartition du cisaillement couche sur couche qui s'ajoute à celui qui accompagne le pliage et le dépliage des couches au passage des rampes doit se faire aussi bien sur des critères géométriques (voir quelles sont les conséquences sur les structures situées à l'arrière des niveaux cisailés qui doivent être déformées par ce cisaillement (Figure 9-2, cercle)) que sur des critères mécaniques (le moteur de la déformation, poussée arrière, glissement gravitaire... est-il compatible avec un tel cisaillement ?) (cf. exercice n° 2).

La Figure 9 (A et B 2) montre que la même géométrie n'est pas équilibrée pour un ensemble d'hypothèses donné (en particulier cisaillement couche sur couche posé comme nul pour la Figure 9A) alors qu'elle le devient si l'on change les hypothèses sur le cisaillement et que l'on accepte celui proposé sur la Figure 9-B2.

### B. LA VALEUR DU RACCOURCISSEMENT

Ce paramètre est en général considéré en même temps que la profondeur du niveau de décollement en particulier au travers des raisonnements sur les surfaces transférées.

Puis isolément on peut rencontrer des cas où ce paramètre est bien contraint (Figure 9-B1 dans laquelle la marge de manoeuvre sur le raccourcissement est très faible et insuffisante pour équilibrer la coupe) ainsi que des cas où il est très mal contraint (c'est le cas du pli faillé de la Figure 9-A pour lequel beaucoup de solutions géométriques en profondeur peuvent être envisagées).

### C. LA PROFONDEUR DU PLAN DE DECOLLEMENT

Si ce paramètre joue un rôle sensiblement aussi important que le précédent dans l'équilibrage, il s'en distingue par le fait qu'étant associé en général à un horizon stratigraphique bien déterminé, on peut souvent le contraindre par des données de forage ou de sismique.

Dans le cas où il est libre (Figure 9-B3) on peut jouer sur sa valeur pour gagner la surface manquante de série nécessaire pour équilibrer la coupe (la surface manquante qu'il a fallu gagner ici correspond à la surface de vide visualisée sur la Figure 9-A légèrement diminuée du fait que l'on a pris une valeur moindre du raccourcissement (9-B1).

#### D. L'ÉPAISSEUR DE LA SÉRIE

Le déficit de matière qui est visualisé sous forme de vide dans la Figure 9-3 est une conséquence de l'hypothèse de constance d'épaisseur des couches. On pourrait envisager le cas où ce déficit apparent de matière est en fait dû à un amincissement de la série stratigraphique. Un peu comme pour le cas du cisaillement couche sur couche, il faut se garder de la tendance à compenser les insuffisances du modèle par des variations d'épaisseur des séries. Toutefois, pour ce cas, il ne faut pas oublier que de telles variations d'épaisseur existent bel et bien et qu'elles peuvent fournir des lieux préférentiels de flambage pour les couches (formation de plis et chevauchement). Elles devront aussi être confirmées par des observations ou au moins être cohérentes avec le contexte géologique.

### VIII - LA RESTITUTION A UN ETAT AVANT DEFORMATION

Cette construction, que l'on fait en même temps que la construction de l'état actuel, permet de contrôler la validité de l'interprétation de cet état actuel. Concrètement, on dessine la première structure unitaire (pli, chevauchement, faille normale) à partir de l'avant-pays non déformé, puis on remet à plat (ou dans une position imposée par les données dont on dispose) cette structure en conservant les longueurs (et les surfaces) entre les deux états. En général, l'état initial ainsi obtenu n'est pas satisfaisant (longueurs des couches, épaisseurs de couches, géométrie de failles). On corrige alors l'état initial puis on modifie l'état actuel toujours en conservant les longueurs (et les surfaces) par rapport à ce nouvel état initial. Si la géométrie obtenue pour ce nouvel état actuel n'est encore pas satisfaisante, on recommence un cycle de modification. Lorsqu'on est satisfait de la géométrie de la première structure ainsi construite, on passe de manière analogue à la structure suivante.

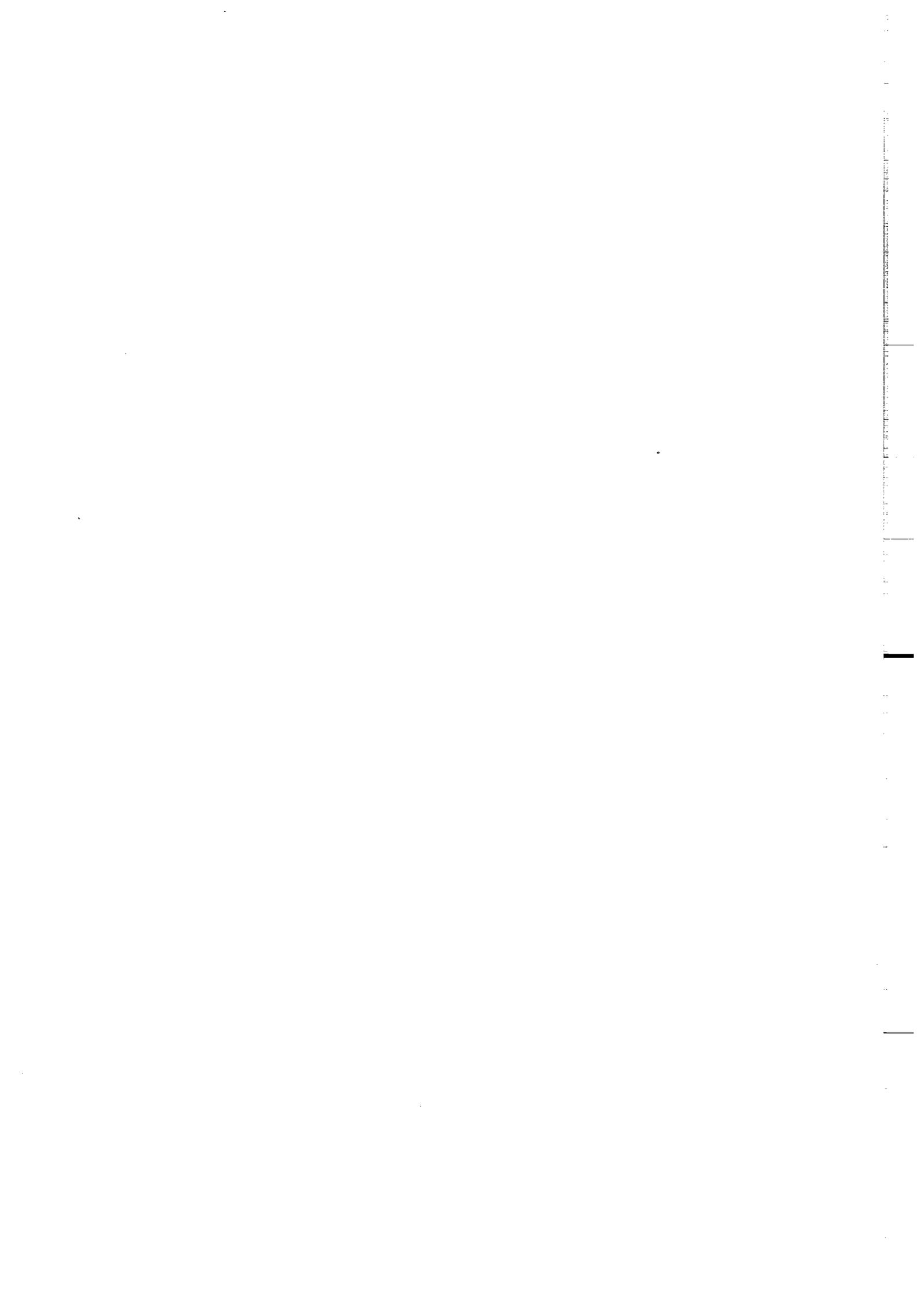
Lorsqu'on dispose de données sur des étapes intermédiaires de l'évolution cinématique, on peut restituer en plusieurs étapes. Dans ce cas chaque modification doit être répercutée sur tous les stades intermédiaires. Si cette démarche a l'avantage de contraindre de manière sensiblement plus forte les coupes (le jugement critique du géologue se porte sur chaque étape) et si elle permet d'utiliser un plus grand nombre de données, elle alourdit de manière considérable le temps à passer sur la construction des coupes, temps déjà fort important avec une restitution simple à l'état initial.

### IX - CONCLUSIONS

La construction de coupes équilibrées apparaît comme un exercice complet qui permet de faire la synthèse des données concernant la géométrie actuelle (géologie de surface, données de forage, données sismiques), de celles concernant la cinématique (géologie structurale) et celles concernant l'état avant déformation (paléogéographie, sédimentologie).

C'est donc une démarche qui permet une meilleure valorisation des données disponibles en permettant d'y apporter une cohérence d'ensemble.

Si elle ne conduit pas nécessairement à la solution exacte, elle a le mérite d'obliger le géologue à aller jusqu'au bout de sa logique.



## LES ETAPES DE LA CONSTRUCTION D'UNE COUPE EQUILIBREE EXEMPLE ET DISCUSSION

par Jean-Louis MUGNIER, Institut Dolomieu  
et Unité Associée CNRS N°69 Géologie Alpine  
Rue Maurice Gignoux 38031 - GRENOBLE Cedex

### I - INTRODUCTION

La construction de coupes équilibrées (balanced cross-section) permet, en appliquant des règles géométriques et cinématiques simples, basées sur des concepts mécaniques, de proposer des géométries interprétatives des structures profondes qui soient compatibles avec les informations géologiques et géophysiques disponibles. C'est un domaine de la géologie structurale en évolution rapide, et dans lequel de nombreux résultats ont été publiés dans la littérature Anglo-Saxonne. C'est une démarche qui permet d'éliminer certaines interprétations et qui conduit parfois à la représentation de structures interprétées, non observables sur le terrain ou non mise en évidence par la géophysique. Dans cet article nous avons réalisé un rappel des notions nécessaires pour la réalisation de coupes équilibrées, nous avons illustré la démarche utilisée en construisant une coupe étape par étape, et nous discutons ensuite la fiabilité de l'interprétation des structures profondes dans les coupes équilibrées.

### II - L'ANALYSE DES BILANS GEOMETRIQUES ET LA CONSTRUCTION DES COUPES EQUILIBREES : PRESENTATION

#### A. PRINCIPE

La construction d'une coupe équilibrée s'appuie sur le fait qu'il existe une évolution cinématique entre la géométrie avant déformation et la géométrie actuelle après déformation, évolution contrôlée par la valeur du raccourcissement (en structure compressive), par la géométrie du ou des chevauchements, et par les mécanismes de la déformation au sein des écaillés déplacées.

Le premier contrôle de l'existence possible d'une telle évolution cinématique consiste à construire simultanément une coupe interprétative de la géométrie actuelle des structures et une coupe restaurée de la géométrie antérieure (HOSSACK, 1979), en vérifiant que les surfaces des structures et les longueurs de certains marqueurs soient conservées entre les coupes des deux états, ce qui revient à dire qu'il y a équilibre entre les éléments de la géométrie interprétée et ceux de la géométrie initiale.

Cette construction simultanée s'effectue habituellement dans les formations sédimentaires, (DAHLSTROM, 1969), car dans ce cas la géométrie restaurée doit correspondre à celle du bassin reconstitué d'après les informations stratigraphiques et sédimentaires. Elle peut cependant être adaptée à la construction de coupes à travers des

édifices cristallins (MUGNIER et MENARD, 1986, ERSLEV, 1986, MENARD et THOUVENOT, 1986). Les coupes équilibrées se différencient de coupes rétrotectoniques dans la mesure où les données prises en compte sont indiquées et les règles géométriques utilisées pour introduire des structures interprétées explicitées.

Avant la réalisation d'une coupe équilibrée, les observations géologiques de surface et les informations du subsurface (forages, sismiques ..) collectées sont analysées de manière à déterminer :

- . le schéma de branchement des failles (HOSSACK, 1983 ; DIEGEL, 1986) ;

- . la séquence de mouvement le long des failles (BUTLER, 1982 ; BOYER et ELLIOTT, 1982) ;

- . les directions de transport des écailles limitées par les différentes failles ;

- . l'intensité de la déformation à l'intérieur des écailles (WOODWARD et al., 1986) ;

- . les règles qui permettent de décomposer le style tectonique régional en une superposition de figures structurales élémentaires (BALLY et al., 1966 ; DALSTROM, 1969 et 1970 ; ELLIOTT et JOHNSON, 1980 ; PRICE 1981 ; BOYER et ELLIOTT, 1982 ; GRAHAM et al., 1987 par exemple).

Nous avons détaillé ces étapes dans les paragraphes qui suivent pour un contexte compressif (chevauchant). Dans un contexte extensif, la démarche serait d'ailleurs similaire.

#### **B. LES SURFACES ENVELOPPES DES ECAILLES DEPLACEES ET LE SCHEMA DE BRANCHEMENT DES FAILLES**

Une structure chevauchante peut être considérée comme une juxtaposition d'écailles déplacées les unes par rapport aux autres, chacune d'elles étant plus ou moins déformée. La surface enveloppe de chaque écaille correspond aux failles et peut être décomposée dans la géométrie initiale (BOYER et ELLIOTT, 1982) de la manière suivante (Fig.1) :

- . une surface de base, au mur de l'écaille déplacée (floor thrust), appelée délamination lorsqu'elle est située dans le socle, (BALLY, 1984) et plan de décollement lorsqu'elle se produit dans la couverture. Ce décollement se produit dans des niveaux moins compétents que ceux constituant la masse de l'écaille ;

- . une surface supérieure qui peut être soit la surface topographique, soit une faille au toit de l'écaille déplacée (roof thrust) ;

. une succession de rampes qui viennent relier la surface de base à la surface supérieure. Suivant l'orientation des rampes par rapport à la direction de transport, celles-ci sont soit frontales, soit latérales, soit obliques.

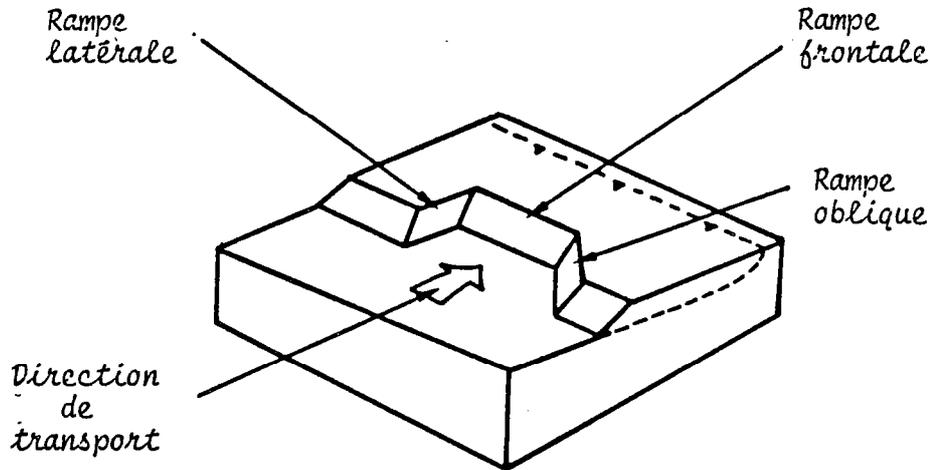


Figure 1 : Décomposition de la surface limitant à l'avant une écaïlle déplacée (d'après HOSSACK : 1983).

Les surfaces enveloppes des différentes écaïlles se relient les unes aux autres le long des lignes de branchement (branch line). Lorsque le déplacement le long d'une faille limitant une écaïlle s'atténue jusqu'à s'annuler, on définit la ligne d'amortissement (tip line) qui peut être considérée comme une ligne de branchement particulière de deux surfaces enveloppes, l'une correspondant à une faille, et l'autre à un "enracinement" (Fig.2).

Pour une écaïlle imbriquée, deux lignes particulières sont définies comme étant son extrémité arrière (trailing branch line), et son extrémité avant (leading branch line).

Sur une carte ou une coupe géologique, seule l'intersection de la ligne de branchement avec le plan d'étude apparaît : c'est le point de branchement, là où les traces de deux failles se rejoignent (HOSSACK, 1983). On est donc conduit à construire des cartes interprétatives (branch-line map), sur lesquelles les lignes de branchement passent par la projection, sur un plan horizontal, des différents points de branchement construits sur les coupes, et par ceux portés sur la carte géologique. Ces derniers séparent la partie enterrée de la ligne de branchement (buried branch-line) de sa partie érodée (eroded branch line) (DIEGEL, 1986). Ces cartes de branchement permettent de suivre l'évolution latérale des structures, et de prendre en compte lors de la réalisation de coupes du schéma de branchement des failles, et ainsi d'informations situées hors du plan de coupe.

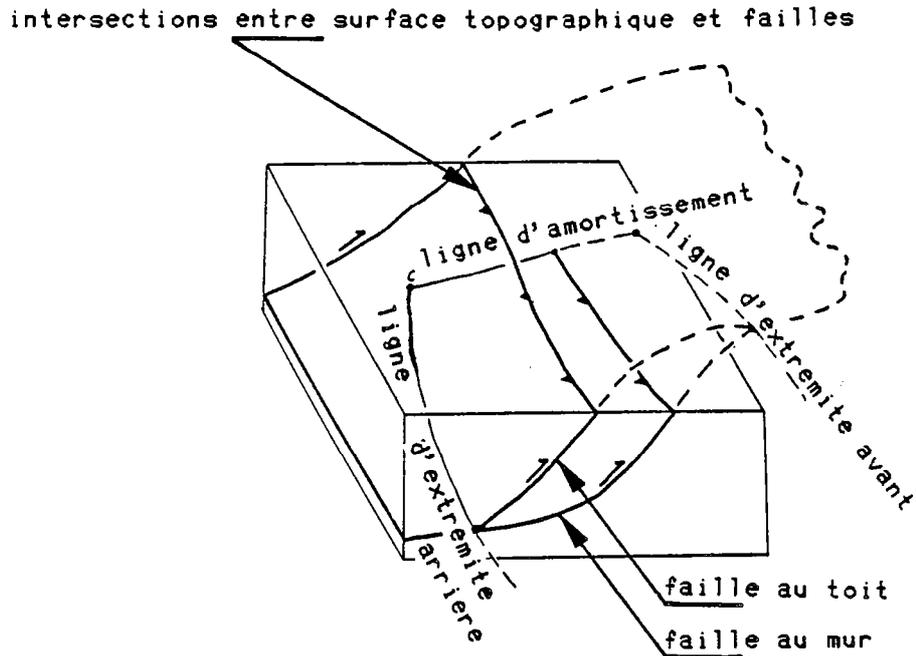


Fig.2 : Les lignes définissant l'enveloppe d'une écaille

### C. LA SEQUENCE DE MOUVEMENTS LE LONG DES FAILLES

La séquence de mouvements le long des failles a des implications importantes sur le schéma de branchement de celles-ci, et sur les phases successives de déformations que subit chaque écaille.

Trois types de séquences peuvent se rencontrer (BUTLER 1982, BOYER et ELLIOTT, 1982) (Fig.3).

1) Les séquences dans l'ordre ; la séquence de propagation vers l'extérieur de la chaîne (in sequence) semble la plus fréquente, car elle minimiserait l'énergie nécessaire à la déformation (MITRA et BOYER 1986) ; les structures les plus internes (les plus anciennes) sont déplacées passivement ("piggy-back" structures) par les chevauchements à la fois plus externes et plus récents. Dans de nombreux cas, ces structures déplacées subissent une phase tardive de déformation, associée à un basculement vers l'intérieur des structures (back-tilting) ; la séquence de propagation vers l'intérieur de la chaîne (overstep sequence) semble être un cas plus rare ;

2) Les séquences dans le désordre ; en étudiant une séquence, on pourra lui conférer une évolution globale prograde ou rétrograde, mais dans laquelle on observera des chevauchements échappant à la règle.

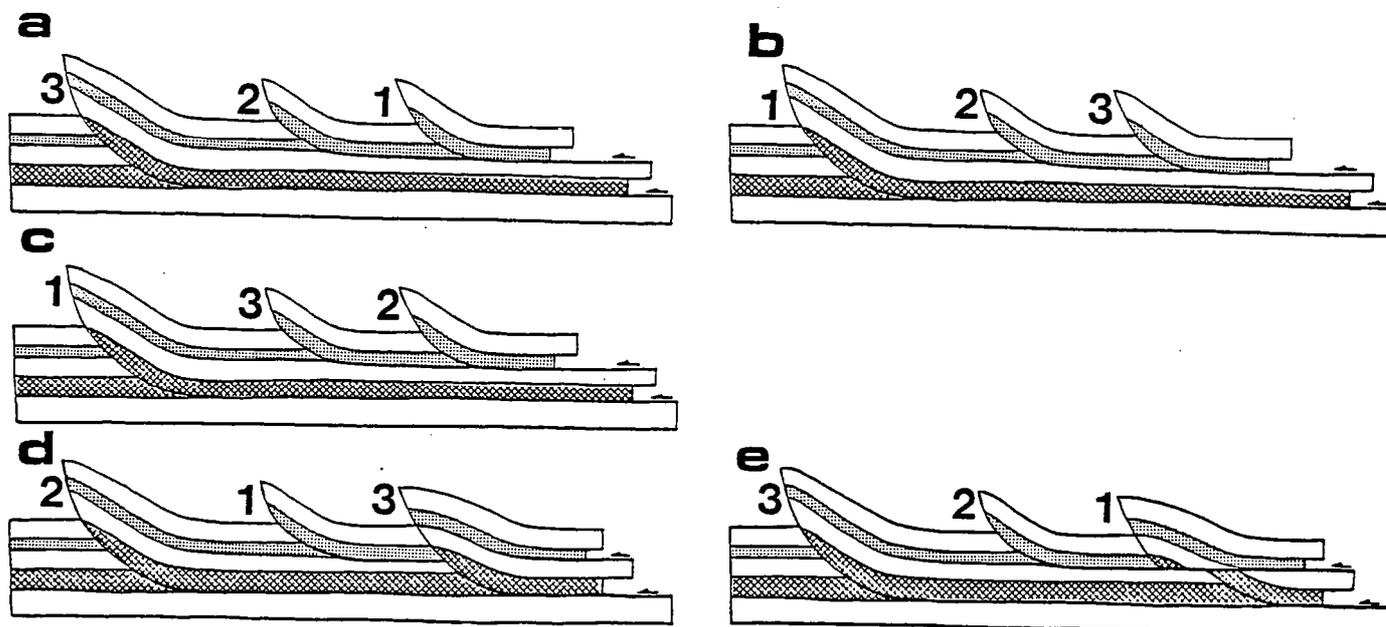


Fig.3 : Les séquences de mouvement le long des failles.

La faille n°1 est la plus ancienne.

- A. Propagation dans l'ordre vers l'extérieur de la chaîne
- B. Propagation dans l'ordre vers l'intérieur de la chaîne
- C. Propagation dans le désordre
- D. Recoupement d'origine profonde (breach sequence)
- E. Recoupement d'origine superficielle (out of sequence)

3) Les séquences de recoupement, qui impliquent que des failles plus récentes viennent recouper les plus anciennes ; la restauration doit alors s'effectuer en plusieurs étapes intermédiaires, séparées par des séquences ordonnées de mouvements ; deux cas peuvent être envisagés, l'un où un chevauchement d'origine profonde vient recouper un chevauchement plus superficiel (breach sequence) l'autre où un niveau de décollement recoupe un chevauchement d'origine plus profonde (out of sequence).

#### D. LA DIRECTION DE TRANSPORT

La direction de transport correspond avec la trajectoire (MERLE 1984) décrite par le centre de gravité de la masse déplacée durant l'édification de la structure, dans un repère considéré comme fixe dans l'avant-pays non déformé. Cette trajectoire n'est pas nécessairement rectiligne durant le déplacement. Elle peut être déterminée en utilisant des observations micro-structurales intégrées dans des modèles cinématiques simples :

- un modèle assimilant la déformation au voisinage de la surface de base d'une écaille à un cisaillement simple (GAMOND 1980), et permettant d'interpréter les linéations d'étirement comme les marqueurs de la direction de transport ;

- un modèle assimilant la déformation dans les écailles déplacées par poussée horizontale à un cisaillement pur et, permettant d'interpréter la direction de raccourcissement déterminée par l'analyse des marqueurs microstructuraux (stylolithes, stries de glissement) dans l'écaille déplacée, comme la direction de transport.

Elle peut également être déterminée en utilisant la compatibilité entre les mouvements sur les différentes rampes. Le cas idéal (BUTLER 1982) est un modèle composé de deux rampes de même direction et de pendages opposés, rampes qui sont alors nécessairement latérales et parallèles à la direction de transport.

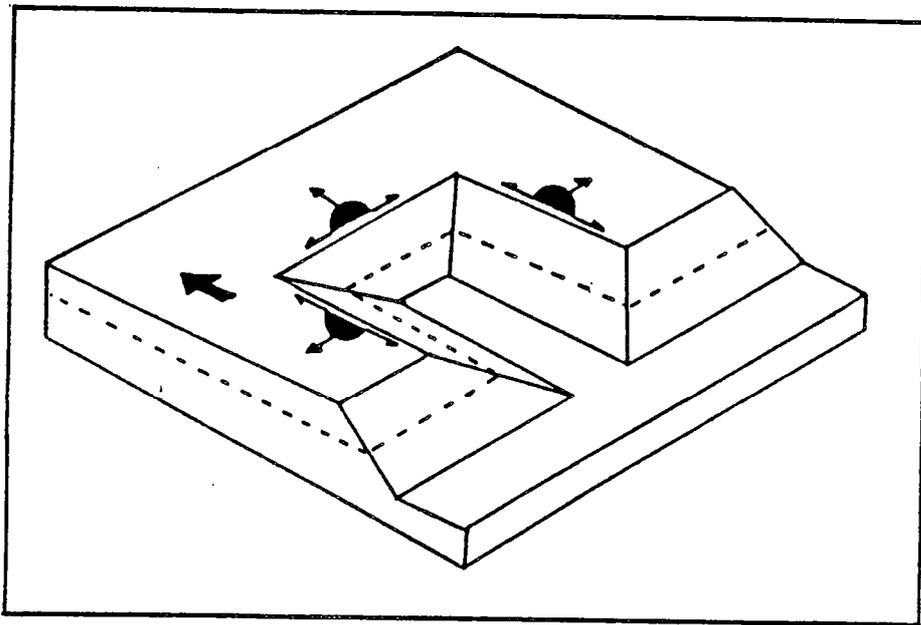


Fig.4 Les éventails des directions de transport associées à une rampe. Chaque demi cercle correspond aux directions de transport compatible avec une rampe ; la flèche indique la seule direction de transport associée aux 3 rampes.

D'autres modèles plus complexes tentent de résoudre en plan le problème de la rotation graduelle dans l'espace des directions de déplacement, en utilisant la méthode des cartes équilibrées (GOGUEL, 1939 ; GRATIER in press), ou en s'inspirant de résultats de modélisations analogiques de mise en place des nappes (MERLE 1982 ; VIALON et al., 1984 par exemple).

## 5. DEFORMATION DES ECAILLES

### 1. Déformation antérieure au déplacement

Lorsque la déformation est antérieure au déplacement de l'écaïlle, la reconstitution de la géométrie initiale doit se faire en retirant d'abord l'effet du déplacement le long des failles, puis en retirant l'effet de la déformation dans chacune des écaïlles pour au moins un des niveaux stratigraphique (WOODWARD et al., 1986).

### 2. Déformation durant le déplacement

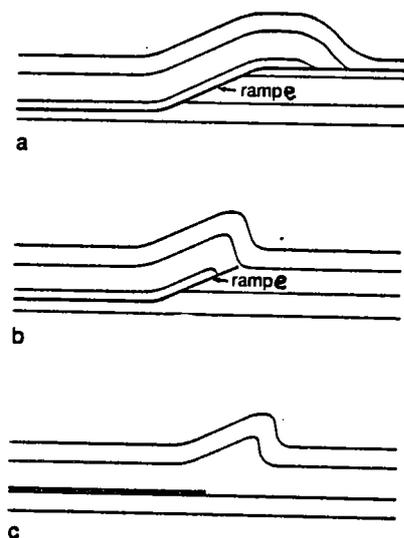


Fig.5 : Trois types d'inter-actions entre plis et failles  
 a. pli passif associé aux courbes de la surface de chevauchement  
 b. pli formé lors de la propagation d'une rampe  
 c. pli d'amortissement en extrémité de faille

La déformation contemporaine de déplacement de l'écaïlle est principalement liée aux courbes et angulosités de la surface de chevauchement (Fig.5a). Ceci conduit à une migration des charnières des plis durant la déformation, et dans le cas d'une courbure concave puis convexe, à un dépliage partiel, phénomène qui induit un chemin de la déformation très complexe dans le détail pour chacun des points de la structure (Fig. 6).

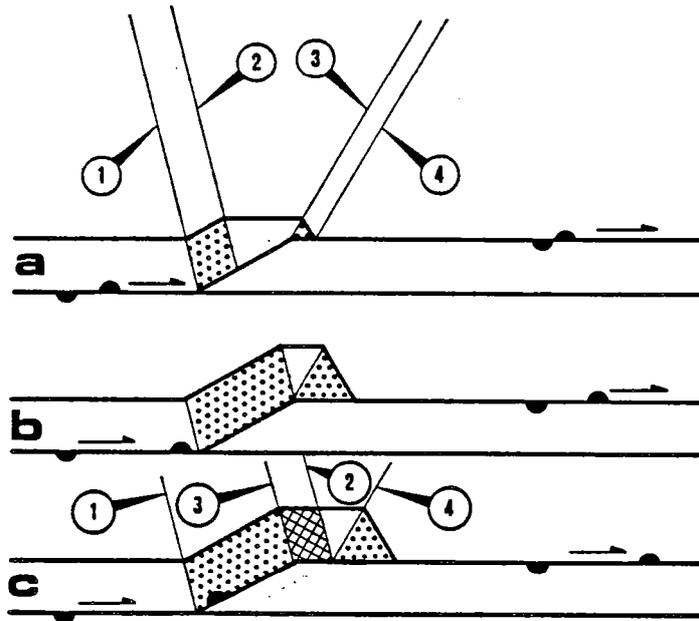


Fig.6 : Le développement d'un pli passif d'après la méthode des kinks. Les domaines ayant traversé un plan axial sont représentés par des pointillés, 2 plans axiaux (et donc plissés-déplissés) par une zone quadrillée. (1) : plan axial fixe associé à la base de la rampe ; (2) plan axial mobile associé à la base de la rampe, (3) plan axial fixe associé à l'extrémité supérieure de la rampe ; (4) plan axial mobile associé à l'extrémité supérieur de la rampe. Notez la permutation de l'ordre des axes entre les géométrie (b) et (c).

Lors de la propagation des surfaces de chevauchement il existe une déformation liée à l'amortissement du déplacement au voisinage de l'extrémité du chevauchement (CHAPMAN et WILLIAMS 1984), (Fig.5c).

Au voisinage des rampes (KNIPE 1985) des problèmes de propagation peuvent se produire et induire une déformation importante dans les formations au toit de la position initiale de la rampe. Ceci entraîne une géométrie sensiblement différente de celle du simple pli passif, avec un flanc externe de l'anticlinal de rampe très redressé, ou même inverse (Fig.5b). Lors de la restauration de ces structures, la règle de conservation des longueurs ne s'applique pas toujours au voisinage du recoupement au toit de la rampe. La restauration est réalisée en conservant la surface des couches, et en estimant leur épaisseur stratigraphique par continuité entre les formations au mur de la rampe et celles situées dans l'écaille déplacée au delà de la zone d'atténuation du déplacement.

### 3. Déformation postérieure au déplacement

La déformation postérieure au déplacement d'une écaïlle le long de sa surface de base peut être due au transport de manière piggy-back de cette structure. Cette déformation s'étudie alors en même temps que celle de l'écaïlle plus externe.

Si la déformation tardive n'est pas due à un tel transport piggy-back, la restauration de la coupe peut s'avérer difficile (RAMSAY et al. 1985, WOODWARD et al., 1986).

### F. LES REGLES BASEES SUR LES FIGURES STRUCTURALES OBSERVEES CLASSIQUEMENT

La construction d'une coupe interprétative de la géométrie actuelle nécessite de proposer une géométrie des failles limitant les écaïlles élémentaires en profondeur. Or ces accidents ne sont habituellement pas observables. Il est donc nécessaire d'utiliser une démarche se basant sur des analogies et des comparaisons avec les structures observées dans certaines régions de référence. Dans ces domaines, l'ensemble des structures a pu être déterminé grâce à des études de terrain détaillées, compte tenu de la qualité des conditions d'affleurement, ou grâce à des campagnes de prospection systématique d'hydrocarbures. On peut citer, comme domaines de références, les chevauchements des Appalaches (HATCHER, 1981), ceux des Montagnes Rocheuses (PRICE, 1981 par exemple), ceux du Moine (MAC CLAY & COWARD, 1981). Ces études fines ont mis en évidence la complexité de détail des structures géologiques.

Mais l'analyse des figures structurales, a permis de trouver des liens logiques -des règles- les reliant entre elles (DAHLSTROM, 1970 ; BOYER et ELLIOTT 1982 par exemple). Les règles les plus classiques sont :

(1) Les plis se forment lors du déplacement d'une écaïlle le long d'une faille courbe (RICH, 1934) ;

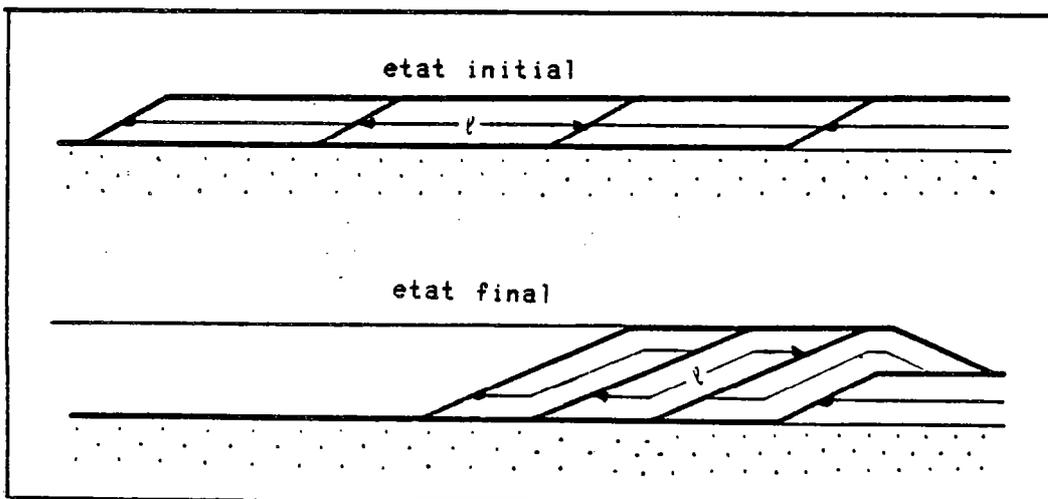


Fig.7 : Géométrie d'un Duplex (d'après BOYER et ELLIOTT, 1982)

(2) la structure en Duplex (DAHLSTROM, 1970) se forme par l'écaillage progressif des formations au mur du chevauchement (Fig.7) ; chaque écaille est appelée un "horse".

De nombreuses autres règles ont été proposées pour des zones structurales particulières. Les travaux de MORLEY (1986) et VANN et al., (1986) s'appliquent ainsi aux zones les plus externes des structures chevauchantes, ceux de PRICE (1986) aux zones de poinçonnement induisant des chevauchements à vergence interne (back-thrust), ceux de BALLY (1984) et GILLCHRIST et al. (1984) aux zones de réactivation en compression de structures extensives.

#### G. ANALYSE ET EQUILIBRAGE DE LA GEOMETRIE D'UNE COUPE

La construction d'une coupe interprétative équilibrée est guidée par quatre notions :

(1) l'estimation du raccourcissement global par la méthode de la surface totale (HOSSACK, 1979), (Fig.8) de la surface en excès (GOGUEL 1952, Fig.9) ou par le curvimétrage d'un horizon repère ;

(2) le schéma de branchement des failles en coupe en fonction des cartes de branchement et de la séquence de mouvement le long des failles;

(3) le positionnement des failles par rapport aux horizons stratigraphiques. Les plats sont situés dans les niveaux incompétents, donc en fonction des épaisseurs et des lithologies des niveaux stratigraphiques), les rampes d'après la forme des plis et les relations de recoupement observés entre strates et failles.

Lors du dépliage d'une structure, il doit être possible de remettre face à face les points de recoupement au toit et au mur (Fig.10), en ayant des variations des flèches de déplacement (distance séparant le recoupement au mur du vis à vis au toit) limitées ; la Fig.11 illustre les relations liant les grandeurs angulaires et les flèches des déplacements pour les plis passifs formés lors du déplacement et ayant une géométrie en kink ;

(4) la conservation des surfaces et des longueurs dans chaque écaille de chaque formation entre l'état déformé et l'état initial.

Les trois premiers points sont contraints par certaines données mais nécessitent une part d'interprétation pour être parfaitement définis. Le quatrième point est un moyen de contrôle. Pour construire simultanément la coupe interprétative de l'état actuel et la coupe reconstituée de l'état initial, il est nécessaire d'utiliser une démarche itérative par essais-erreurs ; la succession des étapes doit s'adapter à chaque cas particulier.

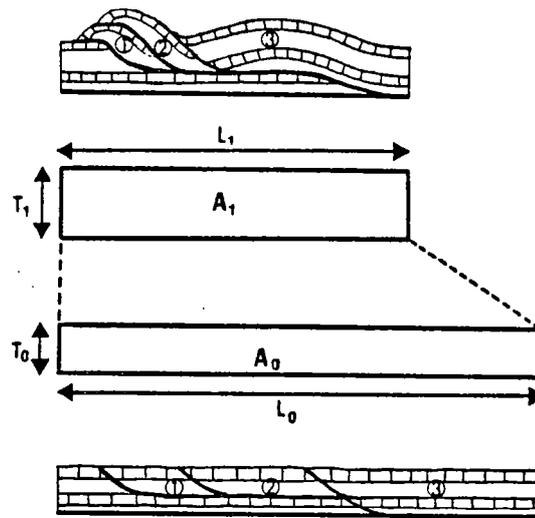


Fig.8 : La méthode de la surface totale

$$L_0 - L_1 = L_1 \left( \frac{T_1}{T_0} - 1 \right)$$

avec  $T_0$  épaisseur stratigraphique,  $T_1$  épaisseur structurale moyenne,  $L_1$  longueur finale,  $L_0$  longueur initiale

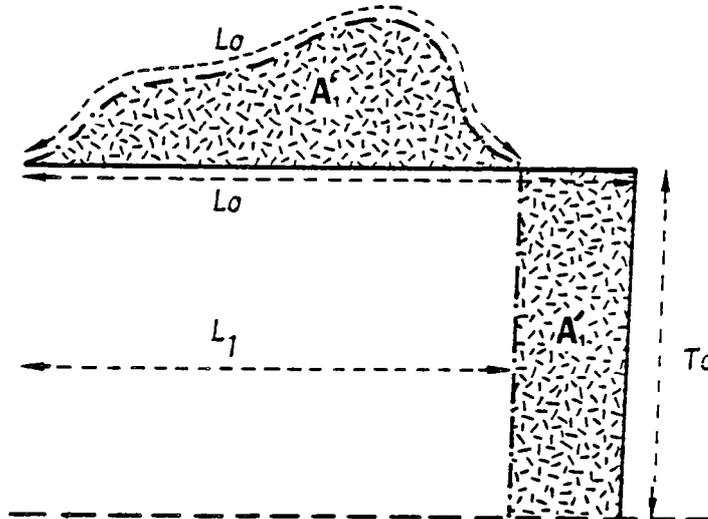


Fig.9 : Méthode de la surface en excès

$L_1$  longueur finale       $A'$  surface en excès  
 $L_0$  longueur initiale     $T_0$  profondeur du plan décollement  
 $L_0 - L_1 = A'/T_0$

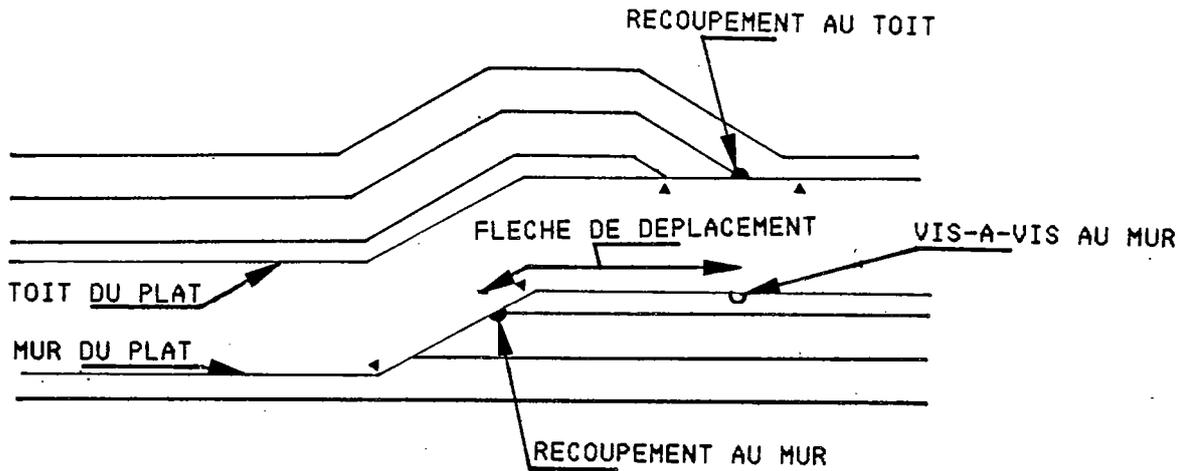
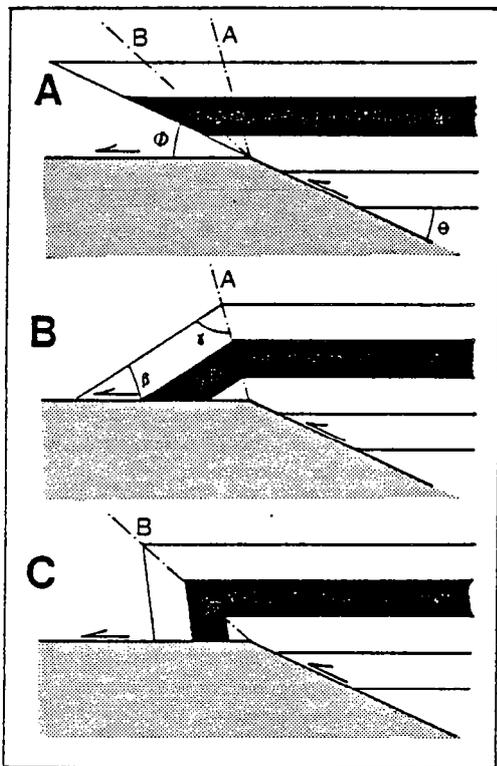


Fig.10 : Relations entre les différentes portions d'une surface de chevauchement et les couches affectées par ce chevauchement



Equation liant les grandeurs angulaires

$$\varphi = \text{Arctg} \left[ \frac{\sin(\gamma - \theta) [\sin(2\gamma - \theta) - \sin \theta]}{\cos(\gamma - \theta) [\sin(2\gamma - \theta) - \sin \theta] - \sin \gamma} \right]$$

avec  $\varphi$  angle de changement de pendage de la faille.  
 $\theta$  angle entre la stratification et le plan de faille, avant le déplacement le long de la faille.  
 $\beta$  angle entre la retombée du pli et la faille.  
 $\gamma$  angle entre la stratification et la charnière du pli.

Equation liant les flèches de déplacement

$$R = \frac{u}{u'} = \frac{\sin(\delta - \theta)}{\sin(\varphi + \delta - \theta)}$$

avec  $u$  flèche de déplacement avant le changement de pendage  
 $u'$  flèche de déplacement après le changement de pendage

Fig.11 : Construction d'un pli passif à l'aplomb d'un changement de pendage d'une surface de faille (d'après Suppe, 1983)

- (A) déplacement rigide le long de la rampe
- (B) pli de mode 1
- (C) pli de mode 2

Dans les flancs avants des plis en kinks la surface et la longueur des bancs sont conservées.

### III - UN EXEMPLE DE REALISATION D'UNE COUPE EQUILIBREE

Dans ce chapitre, les étapes suivies pour construire une coupe équilibrée sont détaillées sur un cas fictif, mais inspiré d'une structure naturelle. Le travail s'effectue à partir d'un document de base (Fig.12), et permet la construction simultanée de l'état initial et de l'état final, en respectant la conservation des surfaces et la longueur des bancs compétents.

#### A. LES DONNEES

L'exemple traité est inspiré du "Pine Mountain thrust". Celui-ci est un grand chevauchement superficiel, situé au front de la chaîne des Appalaches du sud (Fig.13).

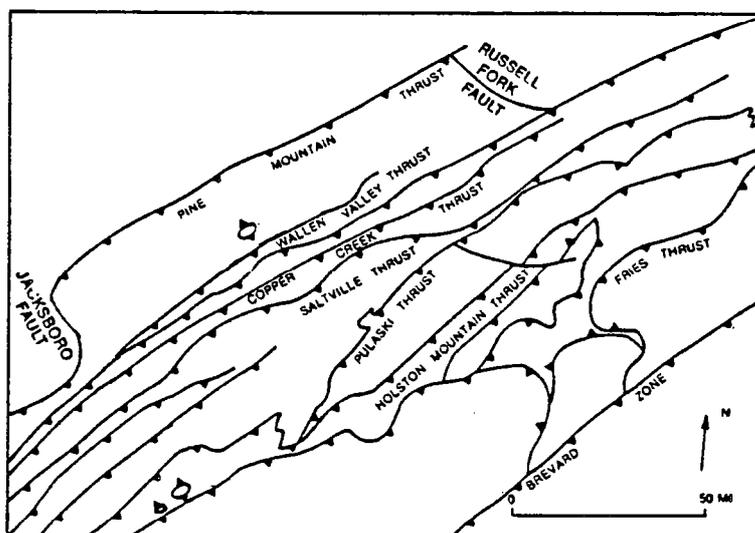


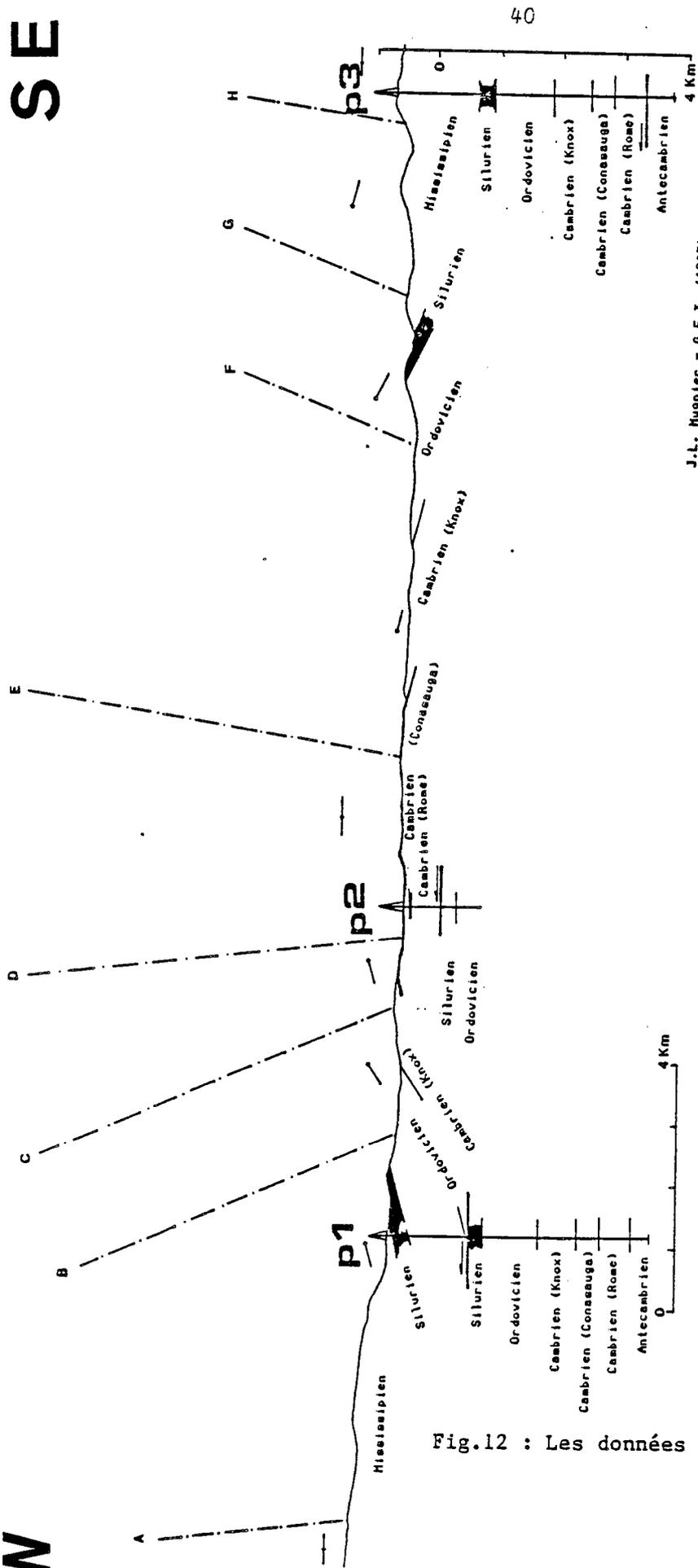
Fig.13 : Schéma structural des Appalaches du Sud (d'après MITRA 1986).

C'est sur cette structure que RICH (1934) définit le concept du pli passif créée à l'aplomb d'une rampe (Fig.5a). De nombreuses données, à la fois de surface (HARRIS et MILICI, 1977) et de subsurface ont été accumulées lors de la prospection et de l'exploitation pétrolière. A partir de celles-ci, différentes coupes équilibrées ont été publiées (SUPPE, 1983, 1984 ; MITRA, 1986). L'hypothèse de la conservation des surfaces dans le plan de coupe est réaliste sur cet exemple dans la mesure où (1) la déformation à l'intérieur des écailles chevauchantes est faible, (2) la structure frontale, qui présente un tracé cartographique rectiligne, est cylindrique, (3) deux rampes latérales limitent à chaque extrémité les écailles et imposent dès lors une direction de transport unique.

Les données de base, présentées sur la Fig.12, sont inspirées de celles de la Fig.3 de SUPPE, 1983. Mais l'exercice présenté (Fig.13) se limite à la construction d'une coupe à travers les structures liées au plus externe des chevauchements.

NW

SE



40

J.L. Mugnier - G.E.T. (1987)

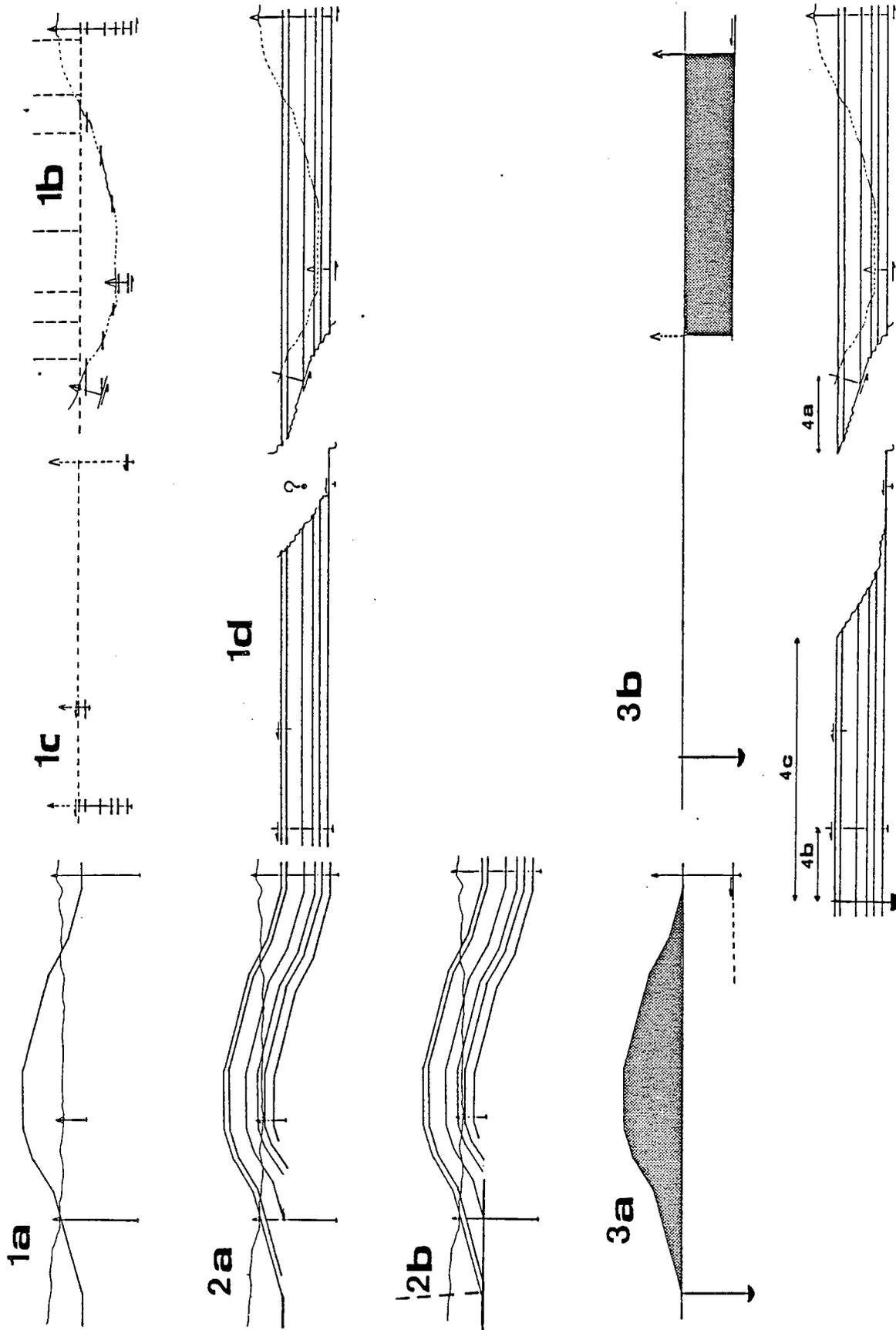
--- Charnières des plis en kink

↗ Pendage des strates

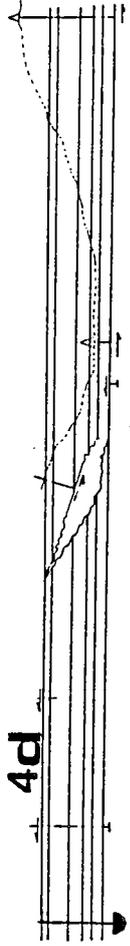
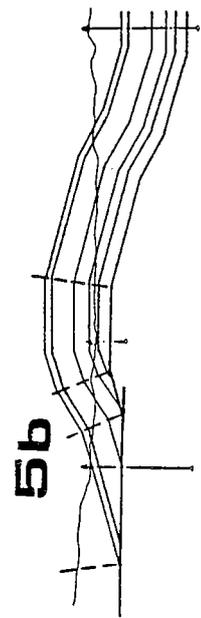
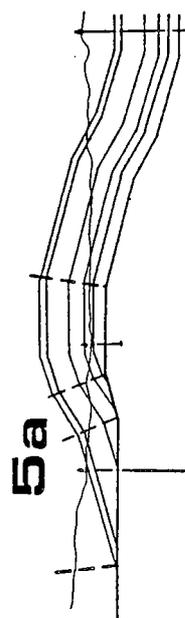
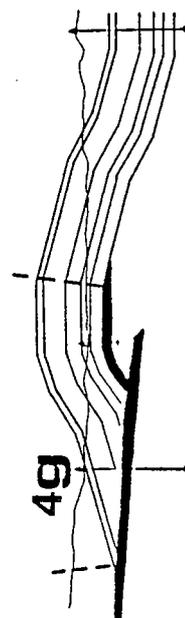
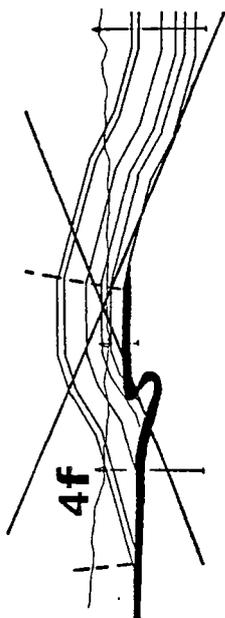
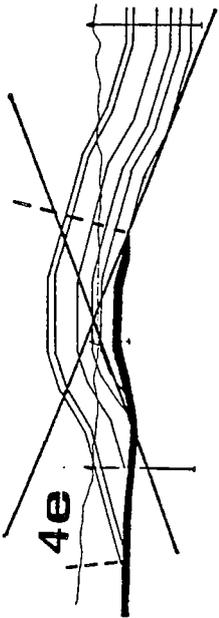
↔ Failles

Fig.12 : Les données

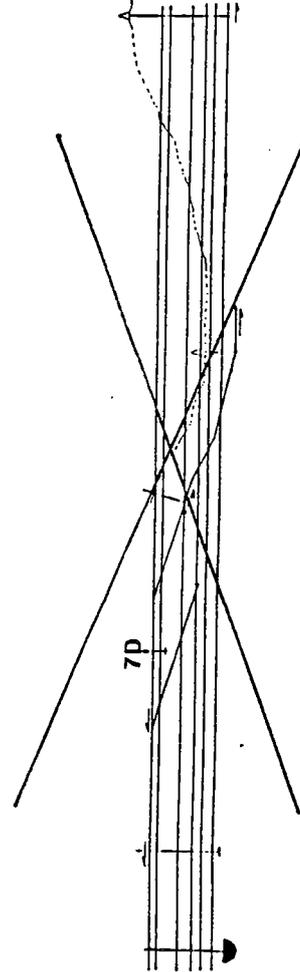
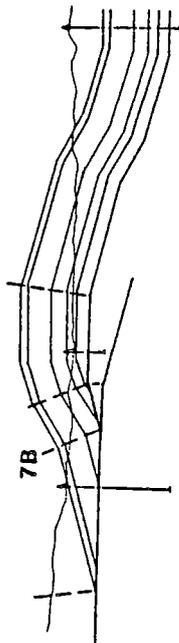
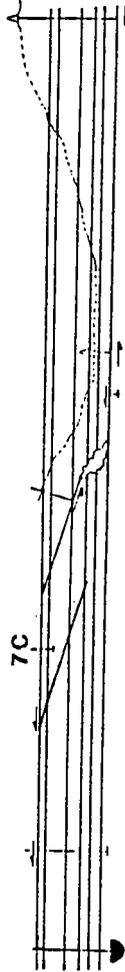
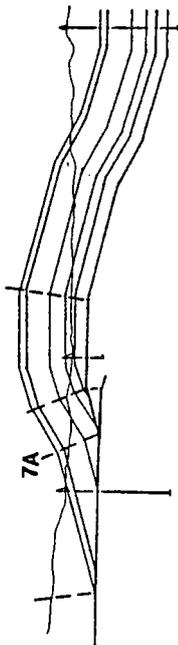
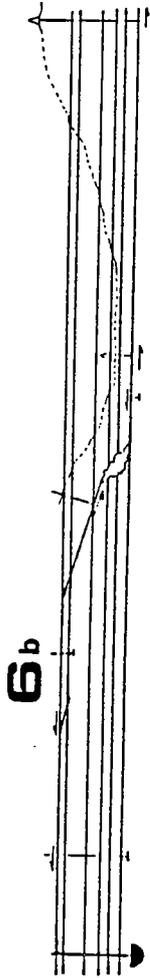
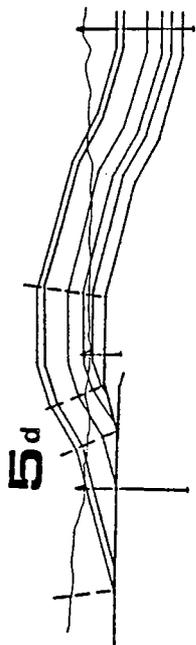
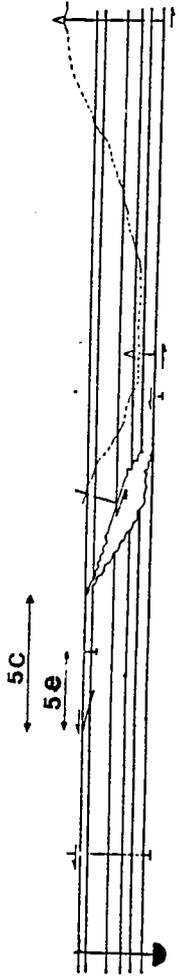
Fig.14 : La décomposition des étapes dans la construction d'une coupe équilibrée.



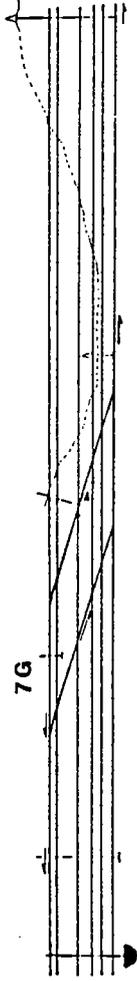
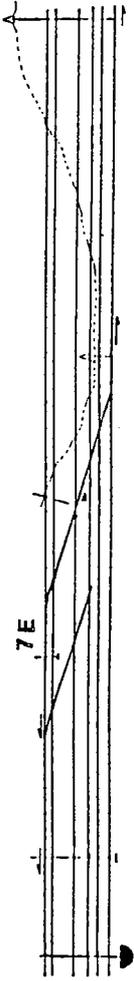
J.L. Mugnier - G.E.T. (1987)



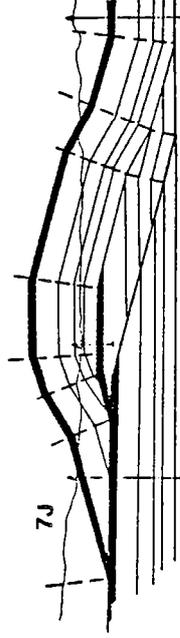
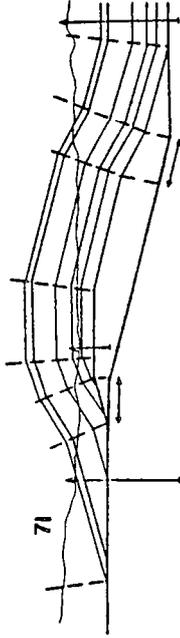
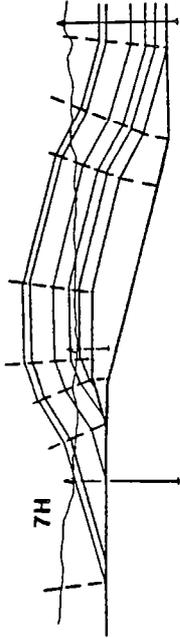
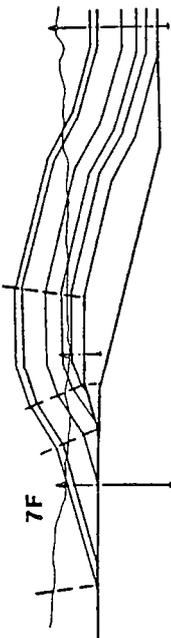
J.L. Mugnier - G.E.T. (1987)



J.L. Mugnier - G.E.T. (1987)



J.L. Mugnier - G.E.T. (1987)



Aussi les chevauchement plus interne du Wallen Valley thrust, situé juste au S.E. de l'anticlinal de la Fig.12 n'a pas été représenté, et son étude est réalisée plus loin dans ce mémoire à l'aide d'un programme informatique (ENDIGNOUX et MUGNIER 1987). De plus, deux puits fictifs (les puits (1) et (3) ont été en fait rajoutés aux données présentées par SUPPE 1983, afin de remplacer les informations géologiques situées hors du plan de coupe. L'interprétation des structures profondes qui pourrait être réalisée si ces deux puits fictifs étaient négligés est discutée dans un chapitre ultérieur.

**Une première analyse des données montre que :**

- la série stratigraphique est composée de formations qui s'étendent de manière continue de l'Antécambrien au Mississipien ;

- les structures tectoniques sont constituées (1) à l'affleurement d'un anticlinal dont les flancs sont faiblement pentés et les charnières anguleuses sont proches de celles de plis en kink, (2) de failles rencontrées par forages, qui présentent un pendage nul et qui permettent un redoublement d'une partie de la série.

#### **B. ETAPE 1 : ETUDE DES EPAISSEURS STRATIGRAPHIQUES**

On construit successivement :

la) - la ligne de référence pour la remise à plat, en superposant le document de base (appelé (D) dans la suite du texte) et le calque où l'état final va être dessiné (appelé (E.F) dans la suite du texte), en traçant la ligne partant de l'affleurement du toit du Silurien situé au N.W et ayant entre les charnières les pendages mesurés en surface.

lb) - le schéma de remise à plat de l'allochtone ; sur le calque où l'état initial de l'allochtone va être dessiné (appelé (E.I al.) dans la suite du texte), on positionne par rapport au niveau de référence les failles (profondeur, angle de recoupement entre la stratigraphie et la faille) et les informations sur la stratigraphie (épaisseur, niveau d'érosion) en mesurant, sur la superposition d'(E.F.) et de (D), les abscisses parallèlement à la ligne de référence, et les ordonnées perpendiculairement à celle-ci.

lc) - le schéma de remise à plat de l'autochtone ; sur le calque où l'état initial de l'autochtone va être dessiné (appelé (E.I. au) dans la suite du texte), on positionne les puits par rapport au toit du Silurien remis à plat, en reportant d'une manière purement conventionnelle les distances horizontales mesurées sur (D).

On déduit alors des documents (E.I. al.) et (E.I. au) (étape 1d) :

(1) que les variations latérales des épaisseurs stratigraphiques sont limitées. Dans la suite de l'exercice on supposera que les couches sont isopaques. Ceci aurait pu être déduit du stade (1a) dans la mesure où la ligne de référence passe par les positions du toit du Silurien connues, aussi bien dans les puits qu'à l'affleurement.

(2) que la géométrie initiale de la faille, est constituée de deux plats, l'un situé au toit du Silurien, l'autre à la base de la formation de Rome.

(3) Comme dans une série stratigraphique bien réglée, les failles du chevauchement remontent la série dans le sens du déplacement de la nappe (BUTLER, 1982), l'allochtone est situé dans l'état initial au S.E. de l'autochtone. Ceci aurait pu être déduit de (D) à partir de l'angle de recoupement au toit de la faille dans les puits (1), et correspond bien à la vergence des chevauchements dans le contexte régional (Fig.13).

#### **C. ETAPE 2 : REPRESENTATION SUR LE DOCUMENT (E.I. al.) DES NIVEAUX STRATIGRAPHIQUES REPERES**

2a) Les couches étant maintenant supposées isopaques, on trace les niveaux stratigraphiques repères, parallèlement à la ligne de référence, en utilisant les plans axiaux des plis en kink pour situer les changements de pendage (stade 2a).

2b) Un problème est rencontré pour bisauter les formations sur les surfaces de chevauchement, et ceci tout particulièrement au N.W. de l'anticlinal. Le point de recoupement au toit du haut du Silurien semble pouvoir être positionné à l'intersection entre la prolongation en profondeur de la charnière(A) et de la prolongation vers le N.W. du plan de décollement rencontré dans les puits (1). Dans ce cas la charnière(A) correspondrait à la charnière mobile associée à l'extrémité supérieure de la rampe (Voir Fig.6).

#### **D. ETAPE 3 : CALCUL DU RACCOURCISSEMENT GLOBAL PAR LA METHODE DE LA SURFACE EN EXCES**

Le raccourcissement global peut être estimé par la méthode de la surface en excès (Fig.8).

3a) Dans le cas traité, on choisira comme frontières de la structure étudiée :

(1) à la base, l'horizontale située à la profondeur du niveau de décollement rencontré dans le puits 3.

(2) à l'arrière par rapport au sens de déplacement le long de la faille, une ligne verticale dans l'état initial, et qui subit la plus

petite déformation durant le déplacement de l'écaïlle chevauchante; dans le cas présent, le puits 3 situé dans la zone tabulaire à l'arrière de l'anticlinal peut être utilisé.

(3) à l'avant, une ligne verticale située uniquement dans l'autochtone et donc ni déformé, ni déplacé ;

(4) en haut, un horizon stratigraphique repère dont la géométrie est aussi bien connue que possible dans l'état final, et ceci tout particulièrement au niveau du recouplement avec les failles ; la formation supérieure du Silurien est donc bien adaptée, et son vis à vis au mur peut être considéré comme un point fixe pour l'étude de la structure chevauchante.

L'aire de sa surface en excès soit mesurée par planimétrie, soit calculée par une décomposition en trapèze :

$$A'1 = 39 \text{ km}^2$$

$$T_o = 2,6 \text{ km}$$

$$3b) \text{ d'où } L_o - L_1 = 15 \text{ km}$$

#### **E. ETAPE 4 : POSITIONNEMENT DES POINTS DE RECOUPEMENT ET DE LEURS VIS-A-VIS**

L'équilibrage des longueurs entre l'état initial et l'état final va permettre de positionner les points de recouplement et leurs vis-à-vis, ceci plus particulièrement pour le niveau supérieur du Silurien.

(4a) - Sur le document (E.I. al.), le recouplement au toit est placé en reportant la longueur mesurée sur le document (D) et séparant le forage 2 du recouplement au toit.

(4b) - Sur le document (E.I. au), le vis-à-vis au mur est placé en reportant la largeur mesurée sur le document (D) et séparant le forage 1 du vis à vis au mur.

(4c) - Sur le document (E.I. au), le recouplement au mur est placé en fonction de la flèche du déplacement au niveau du plat supérieur. Cette flèche de déplacement est calculée en écrivant l'équilibre des longueurs du Silurien dans la portion de coupe définie précédemment :

$$L_o = L \text{ alloch} + \text{Flèche.}$$

$$\text{ou encore : Flèche} = L_1 + (L_o - L_1) - L \text{ alloch}$$

$$\text{d'où : Flèche} = 13,8 \text{ km}$$

(4d) - Les recouplements au toit et au mur ayant été situés sur les états initiaux de l'allochtone et de l'autochtone, il est alors possible de placer les deux unités structurales l'une par rapport à l'autre en accolant les deux recouplements.

Le placement du recouplement au mur sur le document (D) et du puits 2 (jusqu'à là situé d'une manière arbitraire) sur le document (E.I. au) soulève une difficulté :

(4e) - Si la distance séparant le puits 2 du recouplement au mur sur (E.I au) est reportée sur le document (E.F.) ce recouplement se trouverait entre les plans axiaux (E) et (F) et devrait générer une charnière fixe associée à l'extrémité du plat supérieur, charnière qui n'est pas observée en surface ; le recouplement au mur doit donc se situer plus au N.W.

(4f) - Si l'on fait correspondre sur (E.F.) l'extrémité du plat supérieur à l'intersection entre la charnière (E) et l'horizontale passant par le puits (2), la longueur du Silurien situé dans l'autochtone entre le puits (1) et le puits (2) doit être considérable (7,3 km).

(4g) - Un chevauchement profond, masqué, qui viendrait se brancher sur le plan de décollement apparaît comme la seule solution permettant de conserver les longueurs du Silurien et d'expliquer le fait que sur (D) le plan de décollement est rencontré à une altitude moindre dans le sondage (1) que dans le sondage (2)

#### **F. ETAPE 5 : POSITIONNEMENT DU CHEVAUCHEMENT PROFOND**

L'interprétation des charnières (B) et (C) situées au N.W. de la structure anticlinale, en tant que charnières générées par le branchement entre le plan de décollement et le chevauchement plus profond permet de positionner le chevauchement profond.

(5a) - sur la géométrie finale, la partie du chevauchement superficiel qui plonge vers le N.W. et qui permet de relier les 2 failles observées dans les puits 1 et 2, est construit en considérant que les deux charnières (B) et (C) correspondent au plissement d'un chevauchement antérieurement plat.

(5b) - sur la géométrie finale, le point de branchement avant les deux failles est construit en considérant que le plissement du chevauchement supérieur est lié au déplacement le long du chevauchement inférieur.

(5c) - sur la géométrie initiale, le point de branchement est positionné en reportant la longueur du Silurien de l'écaïlle intermédiaire mesurée sur la géométrie finale.

(5d) - sur la géométrie finale, le recouplement au mur du chevauchement profond est positionné en reportant la longueur du Silurien de l'autochtone vrai mesuré sur l'état initial.

### G. ETAPE 6 : VALEURS DES PENDAGES DES RAMPES ET DES ANGLES DE RECOUPEMENT

(6a) Les angles de recouplement au toit de la rampe dans les flancs avant de l'anticlinal et les pendages de la rampe à la base du flanc arrière de l'anticlinal sont mesurés sur le document (E.F). On trouve des valeurs de l'ordre de 15-17 degrés, excepté entre les charnières (F) et (G), où le pendage de la faille est alors de 29 degrés. La construction d'un pli passif par la méthode des kinks (Fig.11) prévoit pour une rampe de 15 degrés suivie d'un plat, un angle de 17 degrés entre la retombée du pli et la faille (tableau 1). Compte tenu des imprécisions dans la construction et dans les mesures, l'exemple étudié vérifierait donc bien cette relation angulaire.

$\phi = \theta$	$\delta$	$\beta$	$\mu/\mu'$
15°	81,5°	17°	0,93
30°	60°	60°	0,73

Tableau 1 : Les angles et les rapports de glissement associés au passage d'un plat à une rampe.

(6b) - La rampe peut alors être représentée sur le document (E.I. al.) entre les points où elle recoupe le Silurien et le forage 1. L'origine du fort pendage entre les charnières (F) et (G) devra cependant être étudié.

### H - ETAPE 7 : PROLONGATION DES CHARNIERES EN PROFONDEUR

Nous avons supposé dans l'étape (5) que les charnières (B) et (C) étaient générées par le branchement d'une rampe profonde sur le plan du décollement. Dans l'écaïlle intermédiaire, sous le plan de décollement, les axes associés à l'extrémité supérieure de la rampe sont définis de la même manière que dans le développement d'un pli simple, (B) est donc la charnière mobile associée à l'extrémité supérieure de la rampe profonde et (C) est la charnière fixe.

(7a) - La construction sur le document (E.F.), de la prolongation de la charnière (C) dans l'écaïlle intermédiaire met en évidence une réfraction du plan axial à travers le niveau de décollement, phénomène étudié et quantifié par Suppe (1983), et montre un angle de 81 degrés entre la stratification et la charnière du pli.

(7b) - Cette dernière valeur correspond (voir tableau 1) à une rampe ayant un pendage de  $15^\circ$  dans l'état final.

(7c)- et un angle de recoupement de même valeur dans l'état initial.

(7d) - Les charnières (F) et (G) ne peuvent être les charnières fixes associées au changement de pendage de la rampe. En effet si le fort pendage entre (F) et (G) était lié à la géométrie initiale de la rampe, celle-ci devrait recouper une série stratigraphique plus épaisse.

(7e) - Le fort pendage est donc acquis lors d'un plissement affectant le mur de la rampe, et celle-ci présente un pendage unique dans la géométrie initiale.

(7f) et (7g) - Ce plissement peut être lié à l'extrémité inférieure de la rampe profonde. Celle-ci relierait alors les 2 plans de décollement rencontrés en sondage, l'un à la base de la formation Rome, et l'autre en haut du Silurien, avec un pendage identique à celui de la rampe superficielle.

(7h) - Les charnières (F) et (G) seraient alors respectivement les charnières fixes et mobiles associées à l'extrémité inférieure de la rampe externe, et (H) et (D) celles associées à l'extrémité inférieure de la rampe interne.

(7i) - L'hypothèse réalisée sur la géométrie de la faille limitant à sa base l'écaïlle intermédiaire est contrôlée en vérifiant que les variations de déplacement le long de cette faille sont cohérentes avec celles calculées par la méthode des kinks. La distance qui sépare les charnières fixes et mobiles marque l'amplitude du déplacement. On trouve donc un déplacement de 1,9 km le long du plat supérieur et un déplacement de 2,1 km le long de la rampe, soit un rapport de glissement de 0,9, valeur analogue à celle prédite par la méthode des kinks (Tableau 1).

(7j) - L'interprétation proposée pour les structures profondes est donc équilibrée, et peut alors être habillée.

#### **IV - LA FIABILITE DE L'INTERPRETATION DES STRUCTURES PROFONDES DANS LES COUPES EQUILIBREES**

##### **A. LES DEGRES DE LIBERTE DANS LA CONSTRUCTION D'UNE COUPE EQUILIBREE**

Dans cette partie on recherchera le nombre de paramètres qui interviennent dans la construction d'une géométrie finale, dans le cas des hypothèses simplificatrices suivantes :

(1) L'état initial est constitué de  $j$  unités lithologiques d'épaisseur  $h_j$ , de compétence homogène, et ne présentant pas de variations latérales d'épaisseur.

(2) L'angle de recoupement entre les failles et un horizon donné est fonction de la compétence de celui-ci, et est donc constant à travers des unités lithologiques homogènes,  $\theta_j$  est l'angle de recoupement dans la géométrie initiale à travers l'unité  $j$ .

(3) Les failles découpent l'état initial en  $i+1$  domaines, et fonctionnent dans une séquence dans l'ordre vers l'extérieur de la chaîne ; la faille 1 est située à la base du domaine 1, la faille  $i$  déplace les domaines de 1 à  $i$ .

(4) La faille  $i$  est constituée d'une succession de portions de surfaces planes qui recoupent les bases des unités lithologiques aux points d'abscisses  $X_{i,j}$ , ou sont parallèles aux strates, juste en dessous d'une unité lithologique homogène  $j$ .

(5) La déformation des domaines déplacés le long de la faille  $i$  est fonction de la géométrie de celle-ci et de l'amplitude du déplacement à l'arrière du système.

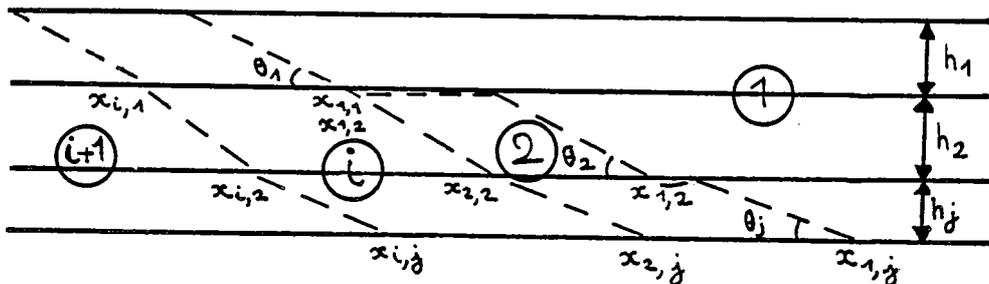


Fig.15 : Les paramètres définissant la géométrie initiale

L'état initial est déterminé par  $X_{i,j}$ ,  $\theta_j$  et  $h_j$  ; l'état final pour  $X_{i,j}$ ,  $\theta_j$ ,  $h_j$ ,  $u_i$ , soit  $(i+2) \cdot j + i$  paramètres. Cet état final simule la géométrie d'une coupe géologique sur laquelle on possède  $x$  données.

L'équilibrage d'une coupe revient donc à ajuster les  $(i+2) \cdot j + i$  paramètres de manière à faire correspondre la géométrie finale aux  $x$  données.

#### B. La fiabilité de l'interprétation dans l'exemple de la figure 14

Les données dans l'exemple de la figure 14 sont :

(1) 9 valeurs de pendages en surface dans des domaines de pendage constant.

(2) 3 valeurs des épaisseurs stratigraphiques (puits 2 et affleurements, puits 1, puits 3).

(3) 3 profondeurs du plan de décollement (1 dans chaque puits).

(4) 2 valeurs de pendage sous le plan de décollement dans les puits 1 et 3.

Au total il y a donc 17 données.

Il y a 2 niveaux de décollement qui séparent des unités lithologiques homogènes, l'un à la base du Mississipien, l'autre à la base de la formation Rome. Si l'on suppose qu'il y a en profondeur 2 failles, il y a 10 paramètres à ajuster. Le nombre de données dépassent donc le nombre de paramètres à ajuster, et le problème est sur-contraint. L'interprétation proposée par la Fig.14 est la seule solution équilibrée. Il n'est donc pas possible d'envisager une géométrie équilibrée avec 1 seule faille en profondeur. De plus il existe un contrôle des hypothèses présentées dans le paragraphe précédent.

Si les puits fictifs (1) et (3) n'avaient pas été rajoutés à l'exemple traité, il y aurait eu alors 10 données. Le nombre de données aurait été égal au nombre de paramètres et le problème juste contraint. L'interprétation finale proposée par la Fig.14 aurait été la seule solution permettant d'équilibrer la coupe en respectant les hypothèses présentées dans le paragraphe IV A. Les étapes dans la réalisation de la coupe équilibrée n'auraient pas été sensiblement différentes de celles présentées sur la Fig.14 ; l'étude des épaisseurs stratigraphiques aurait été réduite à la reconstitution d'une colonne stratigraphique ; le calcul de la surface en excès aurait nécessité de choisir les frontières du domaine étudié de la manière suivante : (a) le puits (2) indique l'existence de deux niveaux de décollement, l'un à la base de la formation Rome, l'autre au sommet du Silurien, (b) les pendages horizontaux observés en surface correspondent à des zones où le toit d'un plat repose sur le mur d'un plat, (c) la succession stratigraphique dans les zones situées au N.W. de la charnière (A) est donc normale, et la faille correspond au décollement à la base du Mississipien au N.W., et à celui à la base de la formation Rome au S.E.

Dans l'exemple de la Fig.4 d'ENDIGNOUX & MUGNIER 1987, (ce mémoire), le chevauchement situé à l'affleurement au S.E. de l'anticlinal vient faire reposer la formation Knox sur le Silurien. Il y a alors 3 niveaux de décollement et 3 failles. Le nombre de paramètres à ajuster est de 18.

Les données sont :

(1) 7 valeurs de pendages en surface dans des domaines de pendage constant.

(2) 2 valeurs de l'épaisseur stratigraphiques (affleurements au S.E. du chevauchement, puits 2 et affleurements au N.W du chevauchement).

(3) 2 positions des failles (forage 1, affleurements au S.E. de l'anticlinal).

Il y a au total 11 données, moins que de paramètres à ajuster. Le problème est sous-contraint, et il est possible d'équilibrer la coupe avec différentes géométries des structures, tout particulièrement aux extrémités arrières des écaïlles.

Données	1*	2*	3*	4*	Qualité de l'interprétation
Fig.12	2	1	7	17	Problème sur-contraint la géométrie ne peut pas être équilibrée en tenant compte des hypothèses initiales
Fig.12	2	2	10	17	Problème sur-contraint la géométrie est équilibrée et les hypothèses initiales sont testées
Fig.12, sans les puits 1 et 3	2	2	10	10	Problème juste contraint. L'interprétation repose sur l'hypothèse des couches isopaques
Fig.4 ENDIGNOUX, MUGNIER 1987 (ce mémoire)	3	3	18	11	Problème sous-contraint plusieurs géométries équilibrées possibles pour les structures profondes

Tableau 2 : La fiabilité de l'interprétation dans l'exemple de la Fig. 14

- 1\* Nombre de décollements parallèles aux strates
- 2\* Nombre de failles supposées
- 3\* Nombre de paramètres à ajuster
- 4\* Nombre de données

### C. DISCUSSION

Le tableau 2 fait apparaître dans l'interprétation des coupes équilibrées 4 niveaux de fiabilité qui sont fonctions du nombre de données et de paramètres libres à ajuster. Si ces paramètres ont été précisés dans le paragraphe IV pour un modèle en plats et rampes dans une série stratigraphique d'épaisseur initiale constante, leur nombre pourrait être plus difficile à estimer dans le cas d'une série stratigraphique présentant des variations latérales et déformée de manière plus complexe. De même, si dans l'exercice présenté, le nombre de données peut être précisé, sur le terrain chaque mesure n'a pas la même importance, et il s'avère nécessaire de réaliser une pondération qui rend difficile l'estimation du nombre de données.

Les quatre niveaux de fiabilité permettent cependant de préciser l'utilisation faite des coupes équilibrées.

(1) Lorsque le nombre de données dépasse le nombre de paramètres à ajuster, le problème est sur-contraint. C'est le cas de quelques structures chevauchantes où la prospection et l'exploitation pétrolière ont permis de collecter une masse importante de données. Il existe en général un écart entre la géométrie finale construite et la géométrie réelle ; l'étude de cet écart permet de tester les hypothèses de départ et de progresser dans la mise au point de modèles tectoniques.

(2) Lorsque le problème est sur-contraint et lorsque la géométrie finale construite correspond aux données, il existe alors un contrôle des hypothèses de départ, et l'interprétation proposée est fiable. La zone frontale des Appalaches du Sud, où les données indiquées sur le Fig.12 ne correspondent qu'à une petite partie des informations collectées par forages et sismiques, constitue un bel exemple de problème sur-contraint.

(3) Si le nombre de paramètres à ajuster est égal au nombre de données, le modèle est juste contraint. Il existe alors une seule géométrie équilibrée des structures qui correspondent aux données ; mais la validité des hypothèses à la base de la construction de la coupe équilibrée conditionne la fiabilité de l'interprétation.

(4) Si le nombre de paramètres à ajuster dépasse le nombre de données, le problème est sous contraint. C'est souvent le cas lorsque les données du sub-surface sont peu nombreuses.

Il existe alors plusieurs interprétations des structures profondes qui possèdent à la fois une géométrie équilibrée et qui intègrent les données connues. La fiabilité de la géométrie proposée par une coupe équilibrée unique est alors faible. Les notions et les hypothèses privilégiées lors de la construction devraient alors être indiquées. Ainsi la Fig.16 propose 4 géométries équilibrées d'une même coupe, réalisées à partir des mêmes données (MUGNIER et al., 1987, MENARD et THOUVENOT, 1987). Les trois premières interprétations ont été réalisées de manière à estimer les valeurs minimales du déplacement le long des failles et à tester les implications latérales, hors du plan de coupe, de la séquence et du schéma de branchement. L'interprétation (d) a été réalisée pour illustrer la complexité probable des structures liées aux variations, actuellement mal quantifiées, des épaisseurs et des lithologies des niveaux stratigraphiques. Chacune des coupes équilibrées présentées n'est qu'un modèle géométrique, et le style lissé de la 4ème, s'il paraît plus réaliste que le style cubique des premières n'apporte pas d'informations supplémentaires en profondeur.

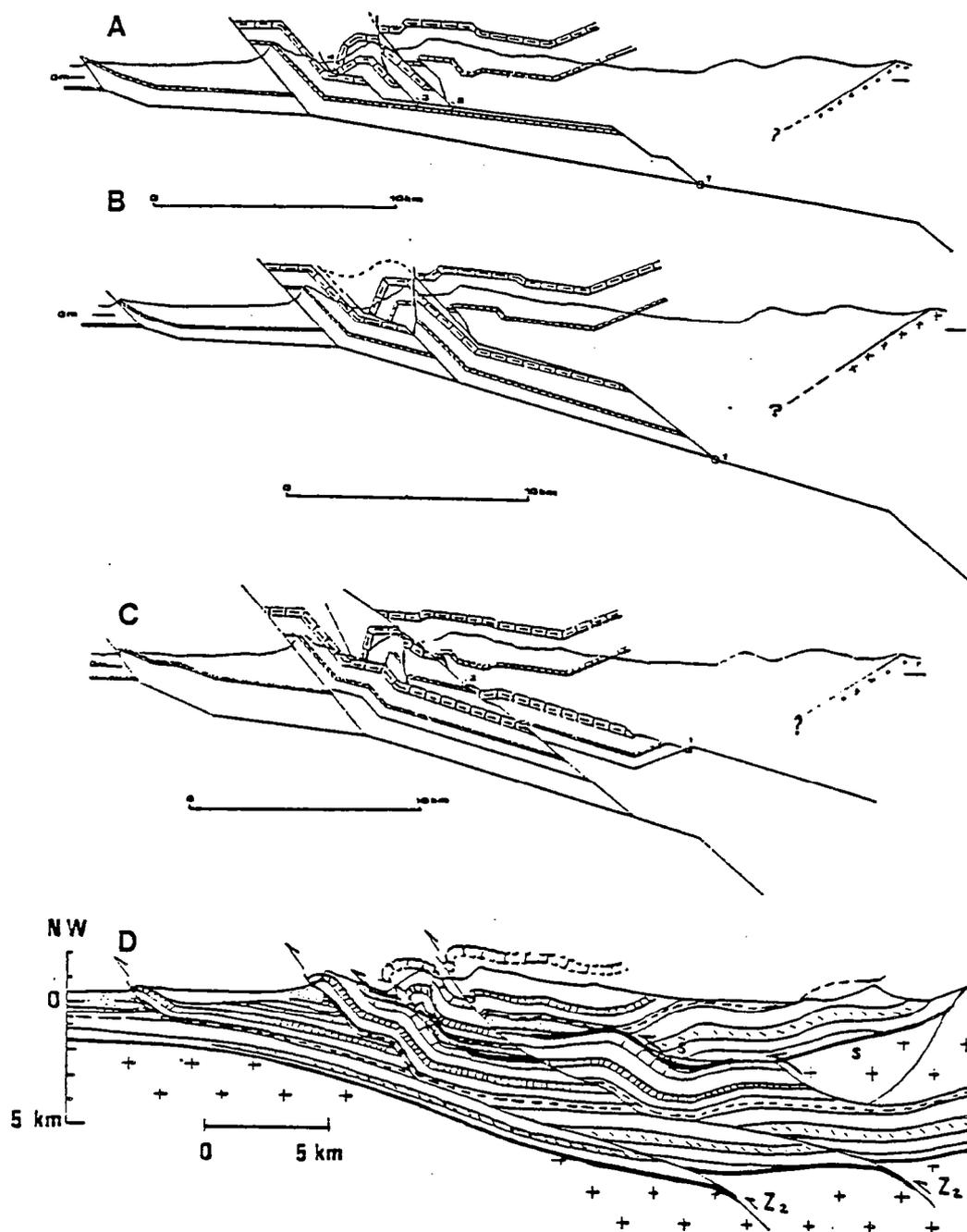


Fig.16 : 4 coupes équilibrées d'une même transversale de la Chartreuse. (coupes (a), (b), (c) d'après MUGNIER et al., 1987, coupe (d) d'après MENARD et THOUVENOT 1987)  
 (a) interprétation minimisant le raccourcissement  
 (b) interprétation avec redoublement de l'Urgonien dans une séquence dans le désordre  
 (c) interprétation avec redoublement de l'Urgonien dans une séquence dans le désordre.  
 (d) interprétation avec redoublement de l'Urgonien dans une séquence dans le désordre, et raccourcissement fixé à 26 km.

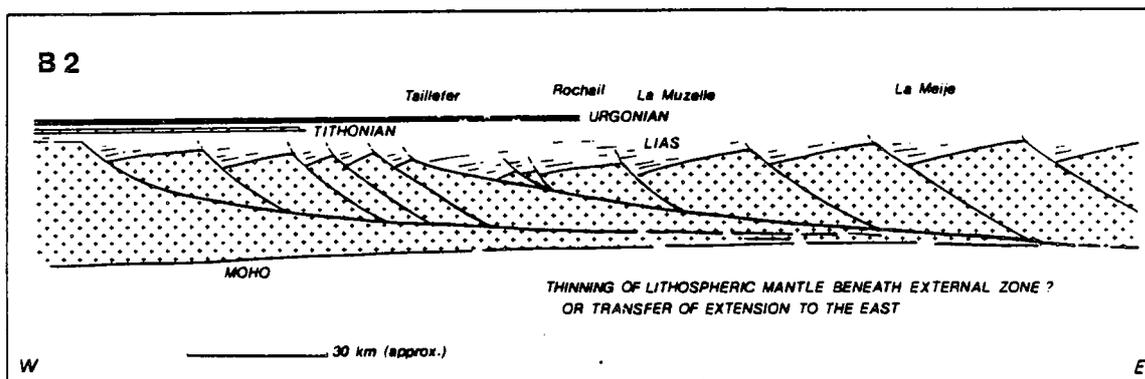
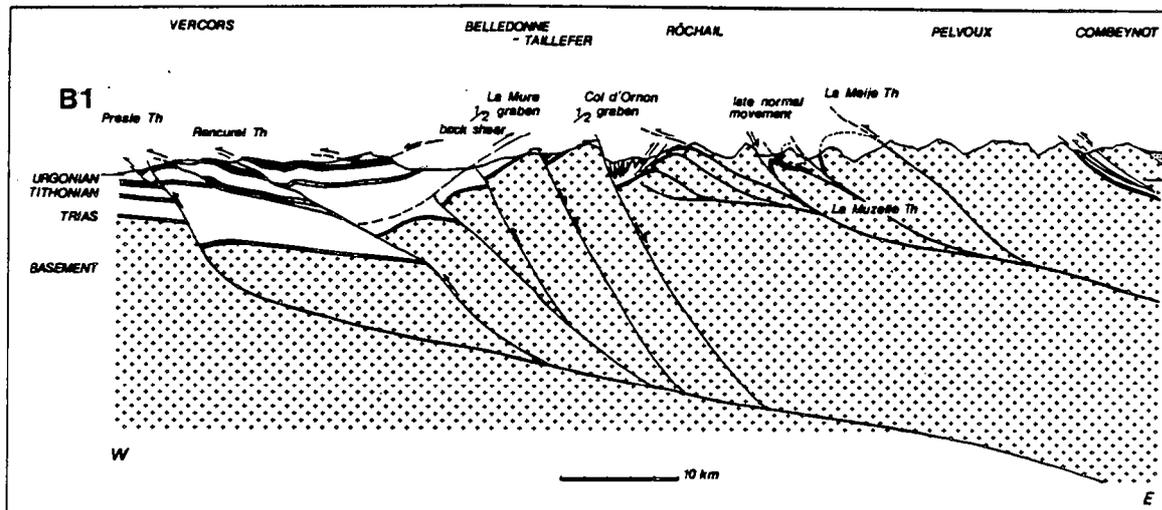
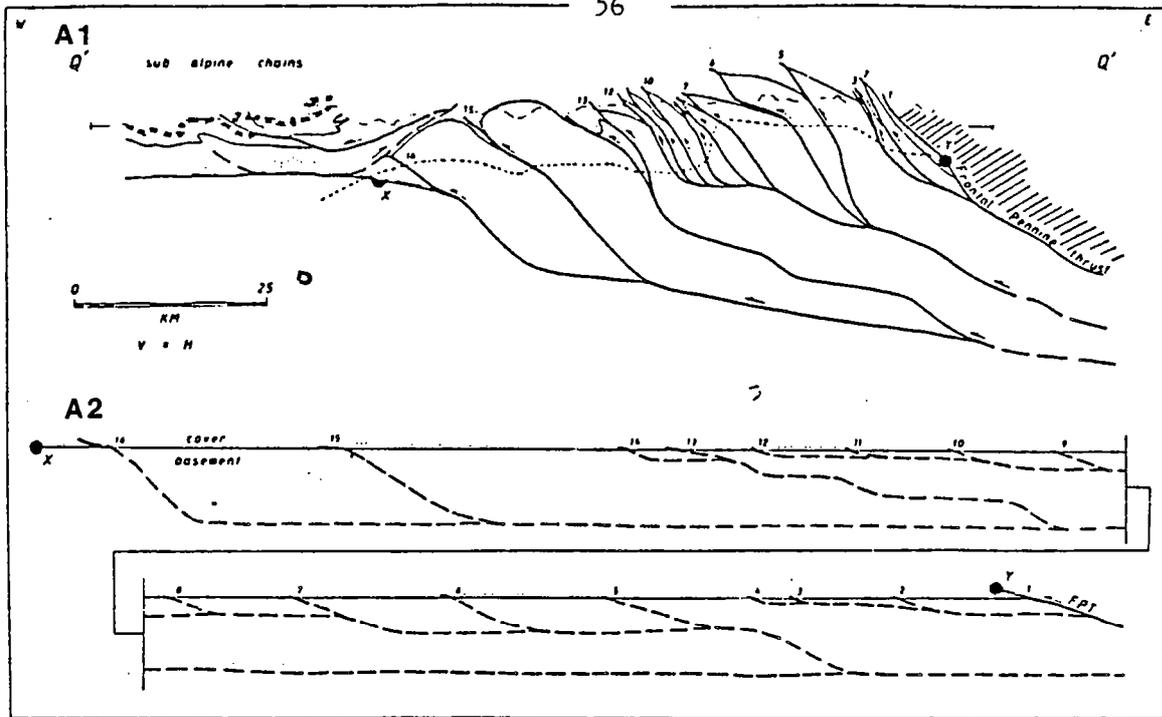


Fig.17 : 2 coupes d'une même transversale des Alpes externes, du Vercors au massif des Ecrins.  
 (a) coupes équilibrée et restaurée (d'après Butler 1987)  
 (b) coupe interprétative et schéma de branchement des failles normales héritées de l'ouverture de Téthys (d'après GILLCRIST et al., 1987).

Il est donc important de pouvoir séparer l'aspect mise ne forme des données géologiques (paragraphe II, B, C, D, E, F), de celui procédure de construction de la géométrie interprétée (paragraphe II,G). A la limite, le dernier stade du travail de construction, c'est à dire l'équilibrage des surfaces et des longueurs dans chaque écaille peut être inutile.

Ainsi les coupes de la Fig.17 ont été effectuées toutes deux du Vercors au massif des Ecrins. La première a été réalisée en privilégiant l'équilibrage des surfaces dans la construction, la deuxième en insistant sur l'étude du schéma de branchement en fonction des séquences de mouvement et de recoupement entre failles normales héritées de l'ouverture de la Téthys et chevauchement alpins. L'équilibrage de cette dernière coupe n'a pas été réalisée car les directions de déplacement le long des différents chevauchements sont variables, et les lignes de référence dont les longueurs auraient pu être équilibrées, très peu nombreuses. La qualité de l'interprétation des structures profondes pour une coupe dont la géométrie avant les chevauchements alpins était complexe, et où le nombre de degré de liberté dans l'équilibrage est extrêmement grand, dépend plus du réalisme de l'hypothèse structurale utilisée que de la rigueur de la construction géométrique.

#### CONCLUSION

La construction de coupes équilibrées est un outil qui permet :

- (1) de réaliser du point de vue structural une synthèse régionale,
- (2) de tester la validité et/ou de mettre en évidence les implications d'une hypothèse tectonique,
- (3) de développer des modèles cinématiques pouvant servir de support à la compréhension des processus physiques mis en jeu dans les déformations tectoniques.

- BALLY A.W., GORDY P.L. & STEWARD G.A. (1966).- Structure, seismic data and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains. Bull.Can.Petrol.Geol., 14, p. 337-381.
- BALLY A.W. (1984).- Tectogenèse et sismique reflexion. Bull.Soc.Géol.Fr., 26, p. 279-287.
- BOYER S.E. & ELLIOTT D. (1982).- The geometry of thrust systems. Bull.Am.Ass.Petrol.Geol., 66, p. 1196-1230.
- BUTLER R.W.H. (1982).- The terminology of structures in thrust belts. J.Struct.Geol., 4, p. 239-245.
- BUTLER R.W.H. (in press).- Geometry of crustal shortening in the Western Alps. tectonic evolution of the Tethyan belt. Senghor ed. Spec. Publ. NATO.
- CHAPMAN T.J. & WILLIAMS G.D. (1984).- Displacement-distance methods in the analysis of fold thrust structures and linked-fault systems. J.Geol.Soc.LOnd., 141, p. 121-128.
- DAHLSTROM C.D.A. (1969).- Balanced cross sections. Can.J.Earth.Sci., 6, p. 743-757.
- DAHLSTROM C.D.A. (1970).- Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. Bull.Can.Petrol.Geol., 18, p. 332-406.
- DIEGEL F.A. (1986).- Topological constraints on imbricate thrust networks, example from the Mountain City Window Tennessee, U.S.A. J.Struct.Geol., 8, p. 269-279.
- ELLIOTT D. & JOHNSON M.R.W. (1980).- Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt. Trans.Royal Soc. Edinburgh.Earth Sci., 71, p. 69-96.
- ENDIGNOUX L., MUGNIER J.L. (1987). Modélisation 2D Informatique et cinématique des chevauchements : exemple d'application à la structure du Pine Mountain. Mémoire et document du centre armoricain d'étude structurale des socles.
- ERSLEV E.A. (1986).- Basement balancing of Rocky Mountains foreland uplifts. Geology, 14, p. 259-262.
- GAMOND J.F. (1980).- Direction de déplacement et linéation : cas de la couverture sédimentaire dauphinoise orientale. Bull.Soc.Géol.Fr., (7), t. XXII, p. 429-436.
- GILLCHRIST R., COWARD H., MUGNIER J.L. (1987).- Structural inversion : examples from the Alpine foreland and Western Alpine collisional belt Géol. Dyn., 1, p. 1-34..

- GOGUEL J. (1939).- Tectonique des chaînes subalpines entre la Bléone et la Durance. Bull. Services carte geol.Fr., 202, t XLI, p. 1-48.
- GOGUEL J. (1948).- Le rôle des failles de décrochement dans le massif de la Grande Chartreuse. Bull. Soc. Geol.Fr., 18, p. 277-235.
- GOGUEL J. (1952).- Traité de tectonique. Paris, Masson et Cie, Edit.
- GRAHAM R, HOSSACK J., DERAMOND J., SOULA J.C. (1987).- Géométrie des surfaces de chevauchements. Bull. Soc. Géol. France, (8), Tome III, p. 169-181.
- GRATIER J.p., MENARD G., ARPIN P. (in press). Strain-displacement compatibility and restoration of the subalpine massifs of the Western Alps. London Geological Society, numéro spécial "Alpine Tectonic".
- HARRIS L.D. and MILICI R.C. (1987).- Characteristics of thin-skinned style of deformation in the southern Appalachians and potential hydrocarbon traps , USGS Professional Paper, 1018 p. 1-40.
- HATCHER R.D. (1981).- Thrust and nappes in the North american Appalachian orogen. In thrust and nappes tectonics. Mad Klay D.P. and Price N.J. Editor, p. 491-497.
- HOSSACK J.R. (1979).- The use of balanced cross sections in the calculation of orogenic contraction : a review. J.Geol.Soc.Lond., 136, p. 705-711.
- HOSSACK J.R. (1983).- A cross-section through the Scandinavian Caledonides constructed with the aid of branch-line map. J.Struct.Geol, 5, p. 103-111.
- KNIPE R.J. (1985).- Footwall geometry and the rheology of thrust sheets. J.Struct.Geol., 7, p. 1-10.
- MAC CLAY K.R. et COWARD M.P. (1981).- The moine thrust zone : an overview - in thrust and nappe tectonics. K.R. Mac Clay and N.J. Price Editors, p. 241-255.
- MENARD G. & THOUVENOT F. (1987).- Coupes équilibrées crustales : méthodologie et application aux Alpes occidentales. Géol.Dyn., 1, 35-45.
- MERLE O. (1982).- Cinématique et déformation de la nappe du Parpaillon. Thèse 3<sup>e</sup> Cycle, Univ.Rennes I, 148 p.
- MERLE O. (1984).- Déplacement et déformation des nappes superficielles. Revue Géol.Dyn.Geogr.Phys., vol. 25, n°1, p. 3-17.
- MITRA S. (1986).- Duplex structures and Imbricates Thrust Systems : Geometry, Structural Position, and Hydrocarbon Potential. Bull.

- Am. Ass. Petrol. Geol., 70, 1087-1112.
- MITRA G. & BOYER S.E. (1986).- Energy balance and deformation mechanisms of duplexes. J.Struct.Geol., 8, p. 291-304.
- MORLEY C.K. (1986).- A classification of thrust fronts. Bull.Am.Ass.Géol., 70, p. 12-25.
- MUGNIER J.L., MENARD G. (1986).- Le développement du bassin molassique suisse et l'évolution des Alpes externes : un modèle cinématique. Bull.Centre.Rech.Explor.Prod Elf Aquitaine, 10, 1, p. 167-180.
- MUGNIER J.L., ARPIN R. et THOUVENOT F. (1987).- Coupes équilibrées à travers le massif subalpin de la Chartreuse. Geodinamica Acta, 1, p. 125-137.
- PRICE R.A. (1981).- The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky mountains. in Thrust and Nappe Tectonics (edited by Mc Clay, K. and Price, N.J.) Spec. Publs geol Soc Lond., 9, p. 427-449.
- PRICE R.A. (1986).- The southeastern Canadian Cordillera : thrust faulting, tectonic wedging and delamination of the lithosphere. J.Struct.Geol., 8, p. 239-254.
- RAMSAY J.G., DIETRICH D., CASEY M. (1985).- Structural transect of the swiss Alps. In International symposium on foreland basins. Excursion guide book Allen P., Homemood P. Williams G. Edit., p. 75-103.
- RICH (1934).- Mechanics of low angle overthrust faulting as illustrated by the Comberland thrust block, Virginia, Kentucky Tennessee. Bull.Am.Ass.Petrol.Geol., 18, p. 1584-1596.
- SUPPE J. (1983).- Geometry and kinematics of fault bend folding. Am.J.Sc., 283, p. 684-721.
- SUPPE J. (1984).- Principles of structural geology. Chapitre 8, 1984, p. 254-300.
- VANN .I.R., GRAHAM R.H., HAYWARD A.B. (1986).- The structure of mountain front. J.Struct.Geol., 8, p. 215-227.
- VIALON P., BONNET J.L., GAMOND J.F. ET MUGNIER J.L. (1984).- Modélisation des déformations d'une série stratifiée par le déplacement horizontal d'un poinçon, application au Jura. Bull. Soc. Géol. France, (7), tXXVI, p. 139-150.
- WOODWARD N.B., GRAY D.R., SPEARS D.B. (1986).- Including strain data in balanced cross-sections. J. Struct. Geol., 8, p. 313-324.

## EXERCICE N°1 : PARAMETRES SUR LESQUELS JOUER POUR EQUILIBRER UNE COUPE

par Gilles MENARD

L.G.I.T., Observatoire de l'Université de Grenoble,  
I.R.I.G.M.. BP 68 St Martin d'Hères

### BUT DE L'EXERCICE

Prendre conscience des différents paramètres sur lesquels on peut jouer pour équilibrer une coupe, à savoir l'épaisseur des séries, la profondeur des horizons de décollement, la valeur du cisaillement couche sur couche, la valeur du raccourcissement. L'exercice se fera sur une coupe insuffisamment contrainte en profondeur. Cela permet d'une part de pouvoir jouer sur tous ces paramètres et de voir ainsi leur rôle, d'autre part de prendre conscience de la nécessité d'acquérir des données de subsurface (géophysiques en particulier) pour contraindre ceux parmi ces paramètres qui peuvent l'être.

### EXERCICE

1 - Présentation de la coupe

a) Restrictions concernant l'équilibrage de cette coupe

- Cette coupe, située dans la région de Castellane (chaines subalpines méridionales), est perpendiculaire aux structures locales, mais n'est probablement pas parallèle à la direction de raccourcissement, d'ailleurs difficile à définir ici.

- L'extrémité droite de la coupe ne peut pas être considérée comme fixe. Le dépliage s'effectuera donc relativement à un point lui-même mobile par rapport à son socle.

- Le travail ne s'effectuera pas sur plusieurs coupes s riees comme il est recommandé de faire dans le cas général.

Toutes ces restrictions seraient assez importantes s'il s'agissait de trouver une solution sûre au problème. Vu le caractère pédagogique de cette construction, orientée vers la prise de conscience du rôle d'un certain nombre de paramètres, nous passerons sur ces restrictions.

#### b) Commentaire de la coupe "classique"

Cette coupe présente plusieurs points pour le moins insuffisants (voir figure 1) :

point a : le raccord entre la série chevauchante au nord (série épaisse) et la série chevauchée au sud (série mince) n'est pas représenté.

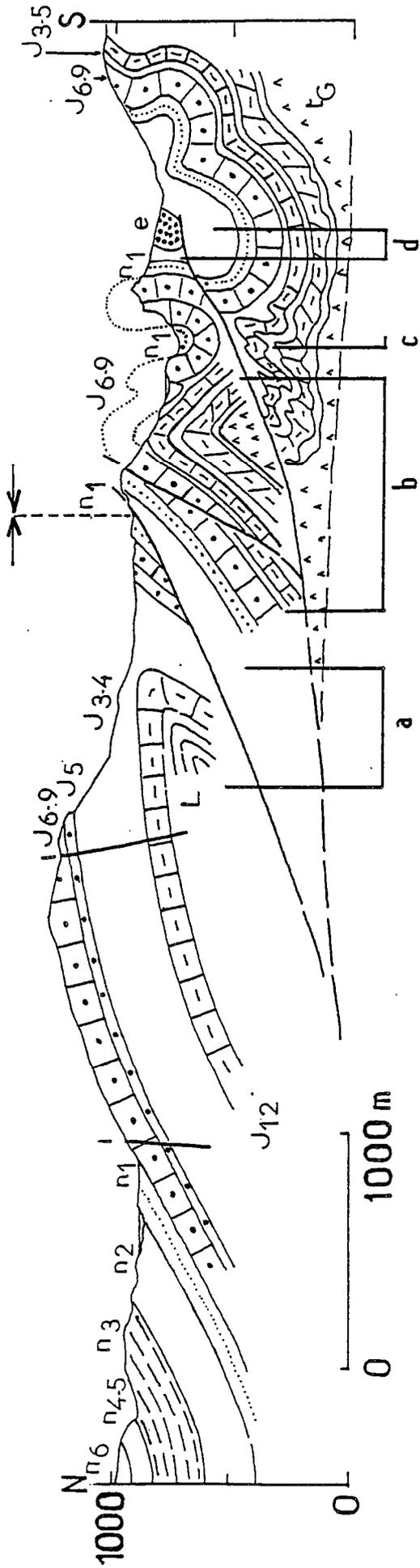
point b : le même chevauchement recoupe deux fois les mêmes niveaux géologiques, ce qui implique une cinématique pas très évidente.

point c : existence d'un "bourrage" tectonique, solution adoptée ici pour combler des vides de la structure, qui ne s'impose pas.

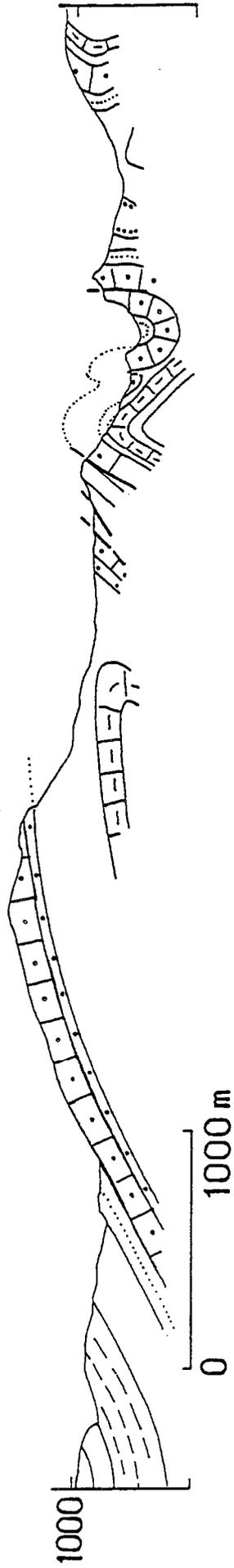
point d : variation d'épaisseur dont la logique n'apparaît pas sur la coupe.

#### c) Partie superficielle de la coupe

Nous avons conservé la partie superficielle de la coupe précédente qui nous servira de point de départ pour une réinterprétation (figure 2).



① COUPE GEOLOGIQUE "CLASSIQUE"



② PARTIE SUPERFICIELLE DE LA COUPE

## 2 - Formulation des hypothèses

Les hypothèses prises pour réinterpréter la coupe sont les suivantes :

- pour la partie gauche de la coupe, la structure est interprétée comme un pli faillé (la solution dessinée correspond à celle qui minimise le raccourcissement qui peut être ici bien plus important) tandis que le passage entre série épaisse et série réduite est supposé se faire par l'intermédiaire d'une flexure (transition progressive mais rapide).

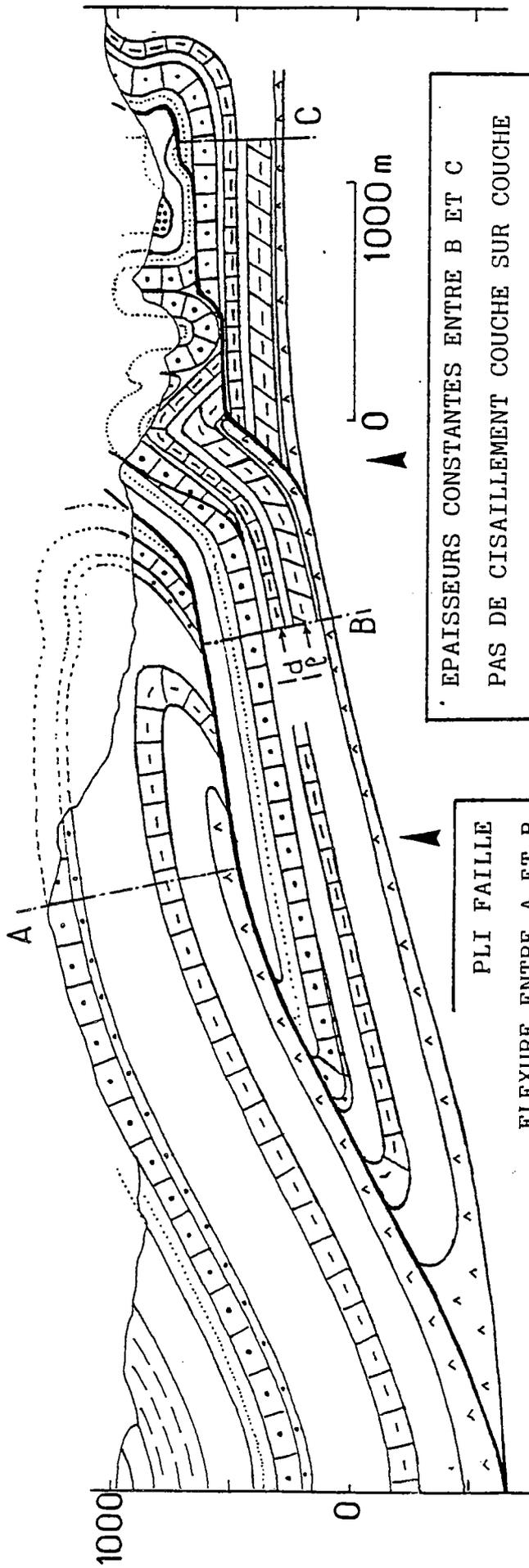
- pour la partie droite sur laquelle nous allons travailler, nous supposons que les épaisseurs de couches restent constantes entre B et C, qu'il n'y a pas de cisaillement couche sur couche et que le style tectonique découle d'un chevauchement avec plats (dans le Trias, dans les Terres Noires comme le montrent les replis du Jurassique supérieur J<sub>6-9</sub> sur lui-même et dans le Néocomien) et rampes (dans le Lias-Dogger et dans le Jurassique supérieur)

## 3 - 1ere étape : interprétation à partir de ces hypothèses.

La figure 3 correspond à la mise en forme de ces hypothèses. Afin de tester la validité de cette interprétation en terme d'équilibrage, on va construire l'état restitué avant déformation de la structure ainsi dessinée. Cette construction a été ébauchée en bas de la figure 3 dans laquelle on a remis à plat (après l'avoir curvimétré) le Jurassique supérieur.

Il s'agit alors de reporter à partir de la ligne B les longueurs mesurées au curvimètre du Lias ( $l_l$ ) et du Dogger ( $l_d$ ) et d'en tirer la conclusion qui s'impose en terme d'équilibrage.

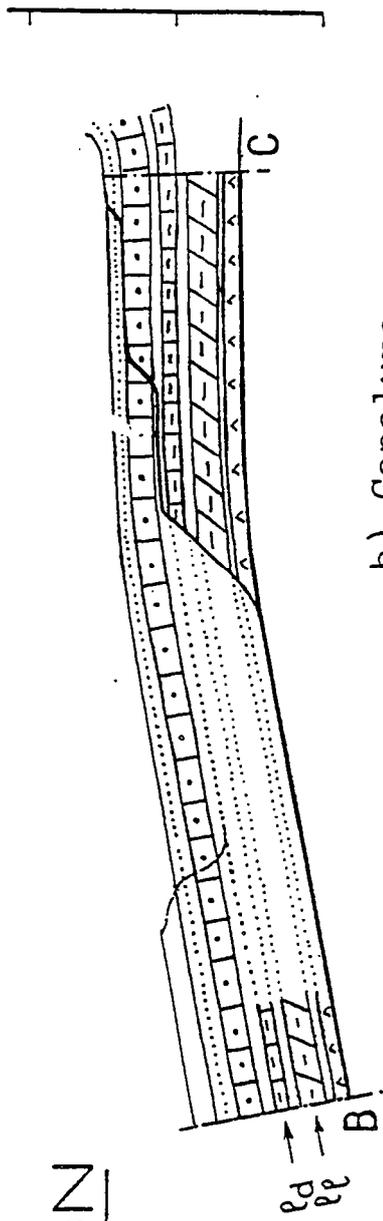
# ③ INTERPRÉTATION A PARTIR D'HYPOTHESES STRUCTURALES



· EPAISSEURS CONSTANTES ENTRE B ET C  
PAS DE CISAILEMENT COUCHE SUR COUCHE  
CHEVAUCHEMENT PAR PLATS ET RAMPES

PLI FAILLE  
FLEXURE ENTRE A ET B

## RESTAURATION

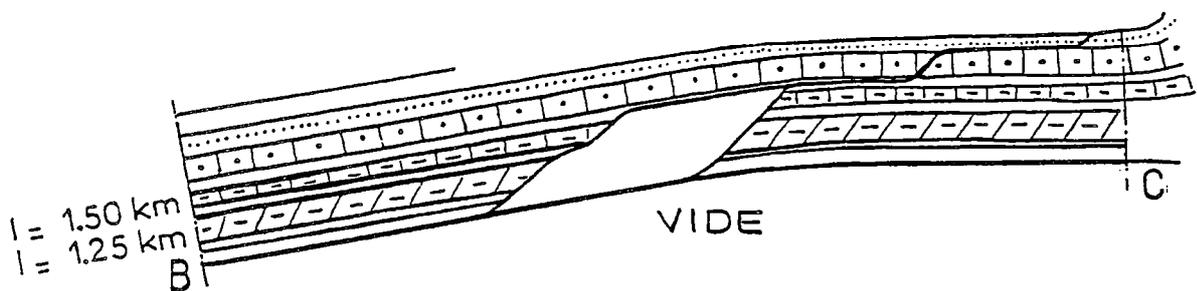
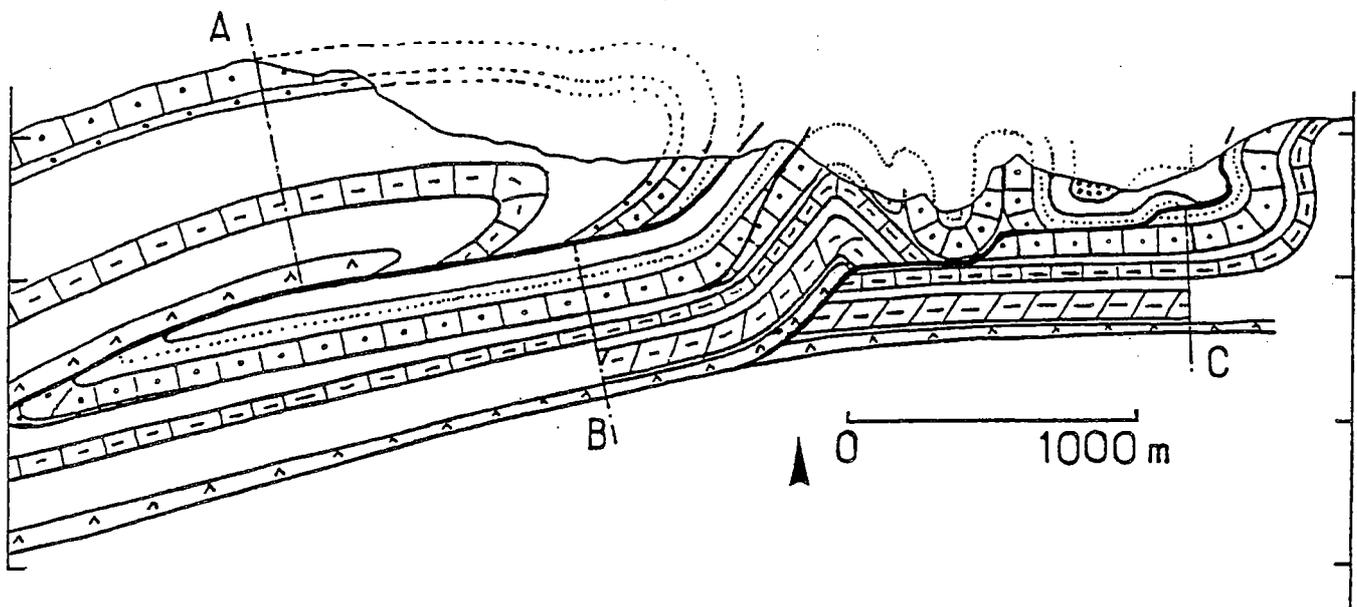


a) Reporter  $l_d$  et  $l_1$

b) Conclure

## Corrigé du 3

Le report des longueurs  $l_d$  et  $l_l$  conduit à mettre en évidence un vide qui traduit le déficit important de longueur de Lias-Dogger par rapport au Jurassique supérieur. Cette impossibilité géométrique est l'expression du fait que la coupe n'est pas équilibrée pour les hypothèses utilisées.



Impossibilité géométrique (vide)

----> coupe non équilibrée

Le problème est donc de combler le déficit de longueur des niveaux profonds ( $J_{1-2}$  et L) par rapport au niveau superficiel ( $J_{6-9}$ ), et ce en jouant sur les différents paramètres que l'on a fixés au niveau des hypothèses.

#### 4 et 5 - 2e étape : modification des hypothèses

Le problème étant le déficit de longueur des niveaux profonds, on peut essayer de réduire ce déficit en diminuant la longueur du niveau superficiel. La longueur que l'on peut ainsi gagner (voir cercle dans la figure 4) est très nettement insuffisante pour combler le déficit en question.

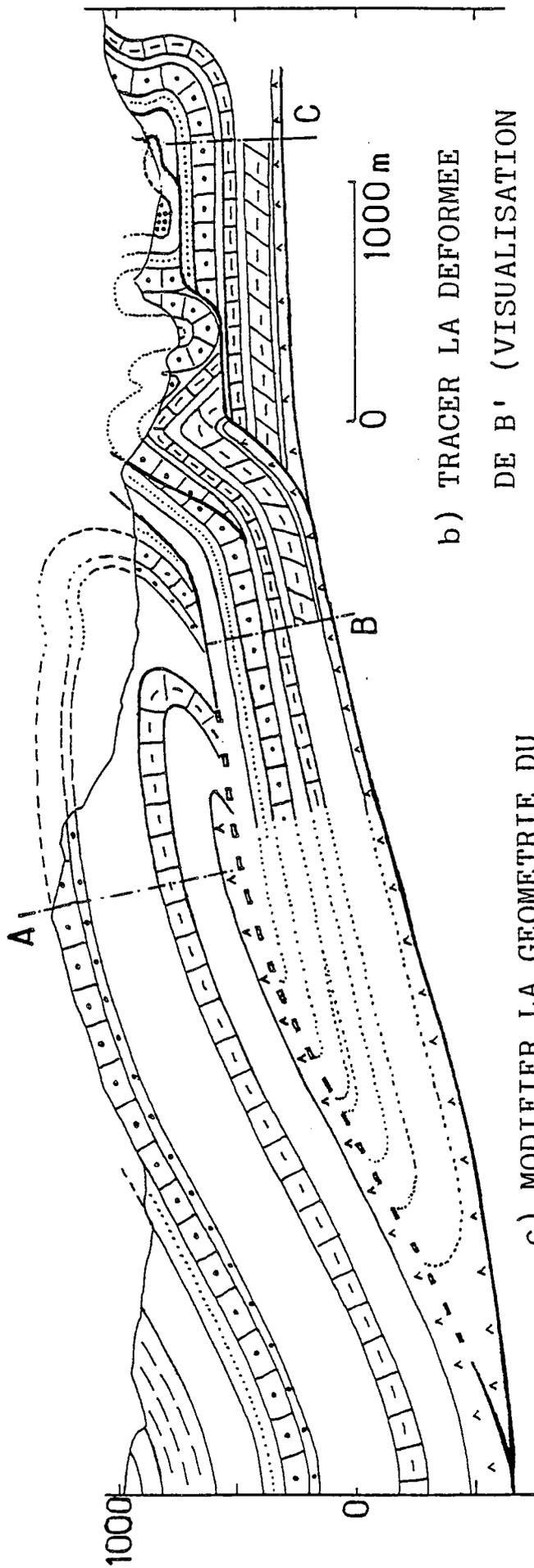
#### 4 - Le cisaillement couche sur couche.

Nous allons voir le rôle de ce paramètre en partant de la même coupe que précédemment (à la modification mineure située dans le cercle près).

- a) Construire la géométrie initiale de la ligne B en reportant les longueurs  $l_l$  et  $l_d$  comme précédemment sur l'état avant déformation, mais cette fois en partant de la rampe.
- b) Construire la déformée de la ligne B' sur la coupe du haut afin de visualiser le cisaillement.
- c) Modifier la géométrie du compartiment chevauché (par rapport à la coupe 3) pour tenir compte du cisaillement que l'on vient de mettre en évidence.

# ④ MODIFICATION DES HYPOTHESES

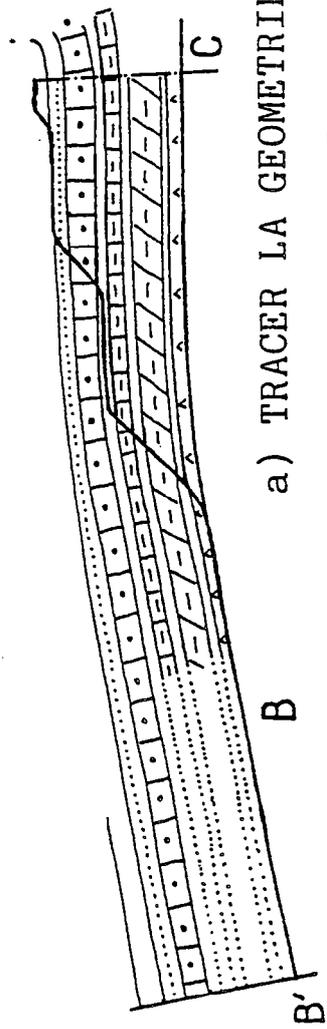
Cisaillement couche sur couche possible



c) MODIFIER LA GEOMETRIE DU  
COMPARTIMENT CHEVAUCHE

b) TRACER LA DEFORMEE  
DE B' (VISUALISATION  
DU CISAILLEMENT)

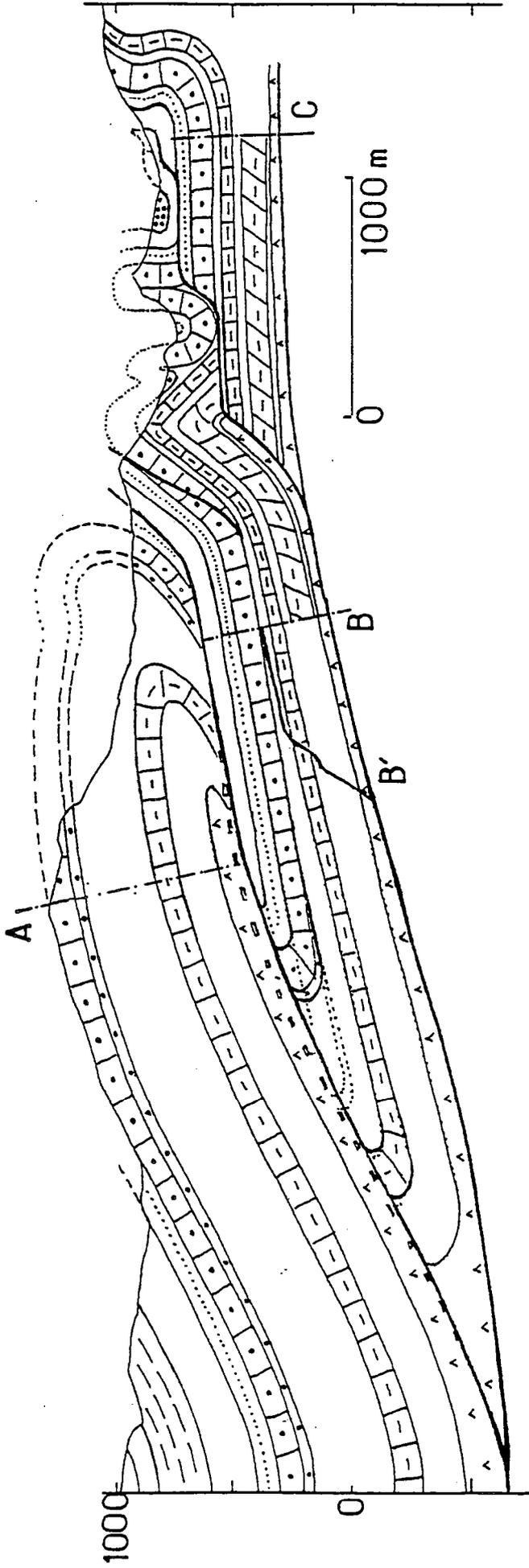
## RESTAURATION



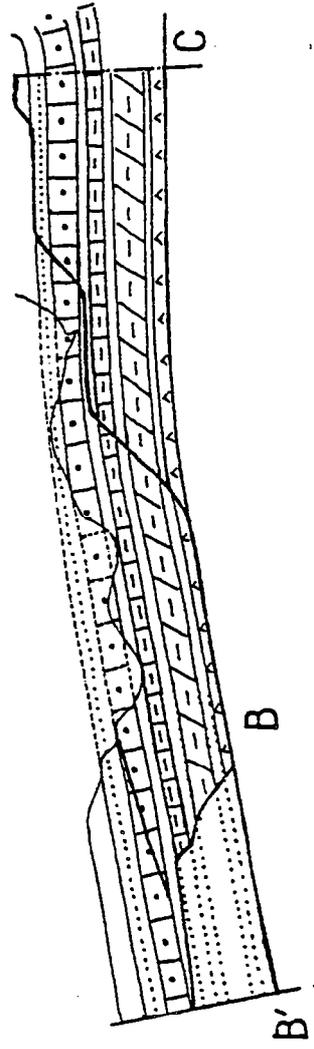
a) TRACER LA GEOMETRIE  
INITIALE DE B

# ④ MODIFICATION DES HYPOTHESES

Cisaillement couche sur couche possible



# RESTAURATION



## Corrigé du 4

Le déficit de matière en profondeur est compensé par du cisaillement couche sur couche transmis à l'arrière. Ce cisaillement doit déformer la charnière synclinale du compartiment chevauché dans la partie gauche de la coupe. Une telle déformation est-elle raisonnable ? D'un côté, il semble que le volume important du compartiment chevauchant soit suffisant pour pouvoir induire du cisaillement dans la série chevauchée ; de l'autre on peut se demander si la charnière synclinale située sous le chevauchement ne constitue pas une structure de blocage suffisante pour empêcher tout cisaillement. A chacun de choisir !

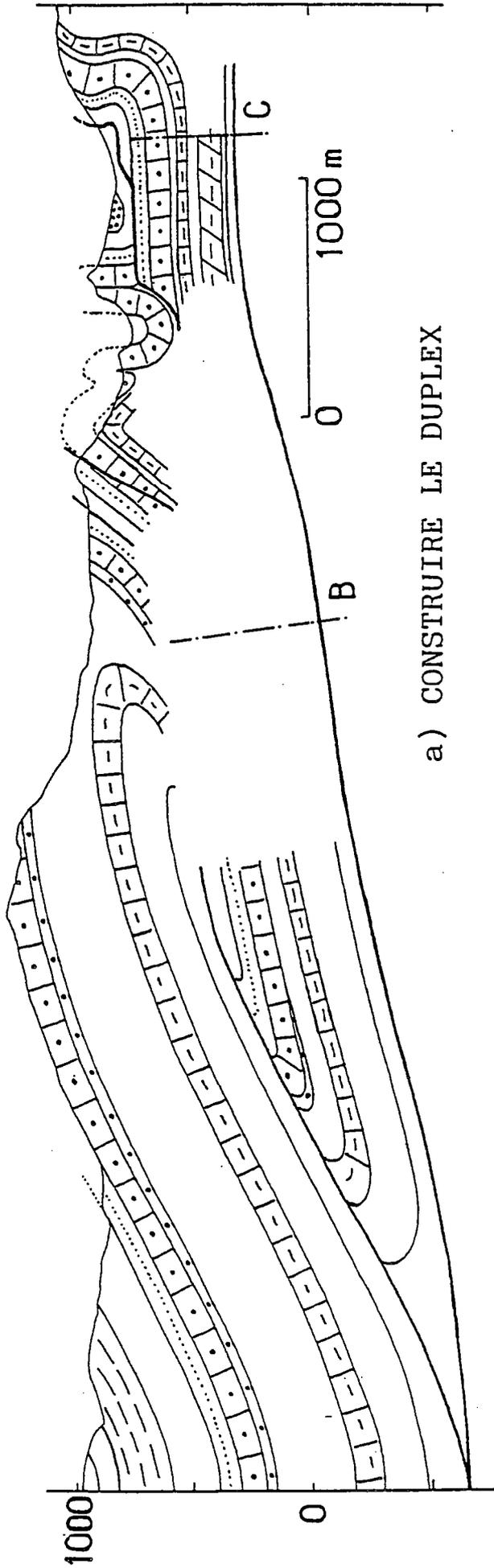
Quoi qu'il en soit, on voit que cette coupe est équilibrée alors que la même coupe dans le cas précédent ne l'était pas. Il apparaît ainsi qu'une coupe n'est pas équilibrée dans l'absolu, mais est équilibrée pour un ensemble donné d'hypothèses. On remarque également qu'on peut toujours trouver une répartition du cisaillement qui permette d'équilibrer la coupe. Il faut donc d'une part être particulièrement critique sur le caractère acceptable du cisaillement obtenu (sens de cisaillement cohérent le long de la pile sédimentaire, justification mécanique de ce cisaillement) et d'autre part en tirer les conséquences qui s'imposent sur les structures situées en arrière.

## 5 - Plan de décollement plus profond - Introduction d'un duplex.

Une autre manière de combler le déficit de longueur entre les niveaux profonds et le niveau superficiel est de rajouter une écaille supplémentaire, cachée (aveugle), constituée uniquement des niveaux profonds (L et  $J_{1-2}$ ). Toutefois, la surface totale disponible avec la géométrie précédente étant insuffisante pour pouvoir placer ces longueurs supplémentaires, il est nécessaire d'augmenter la surface disponible en approfondissant le plan de décollement. C'est ce qui a été fait sur le coupe 5, nous verrons comment ci-après. Sur cette coupe, construire le duplex (une seule écaille cachée) et restituer l'état initial en reportant les deux failles limitant le structure.

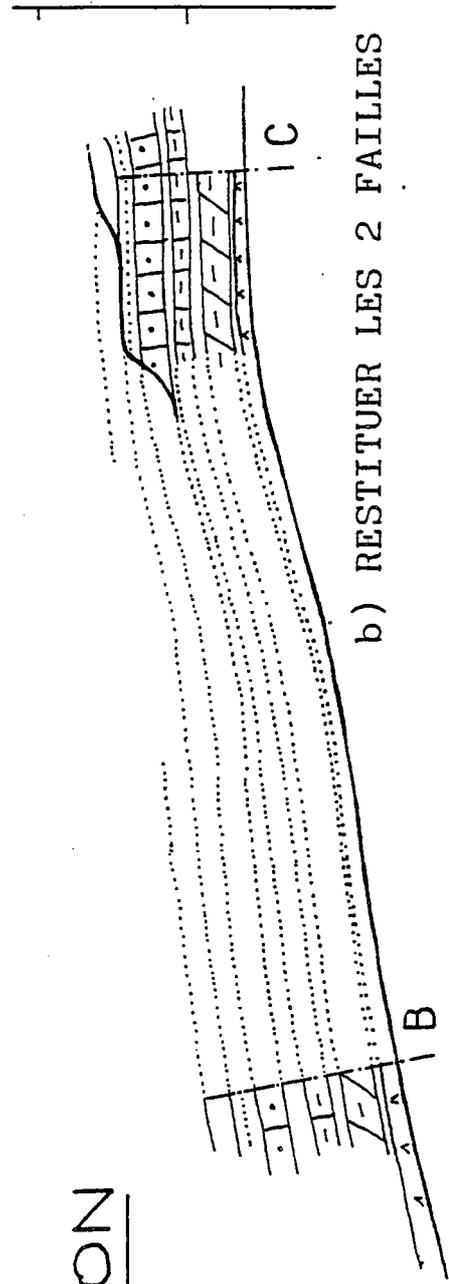
# ⑤ MODIFICATION DES HYPOTHESES

Plan de décollement plus profond - Introduction d'un duplex.



a) CONSTRUIRE LE DUPLEX

# RESTAURATION

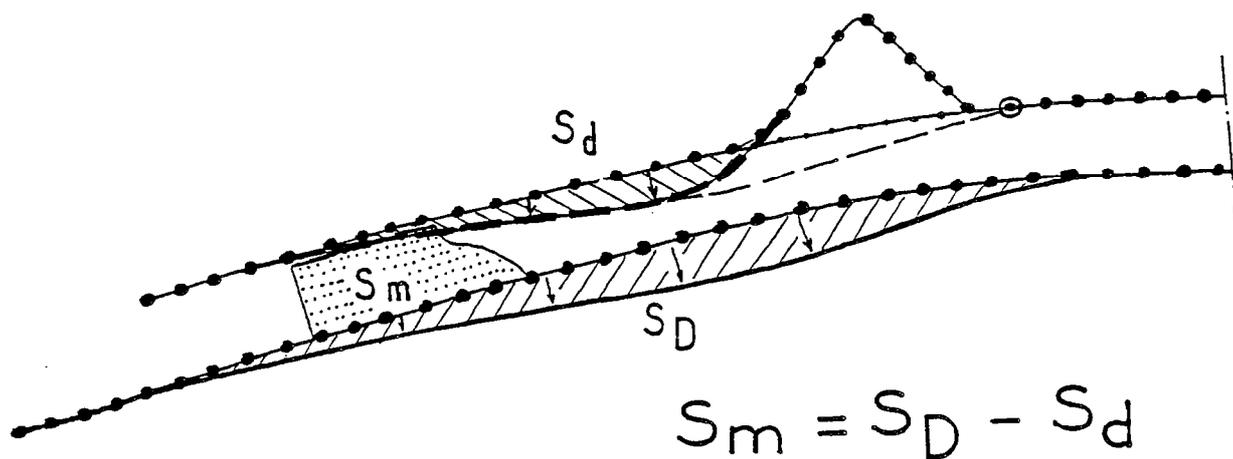


b) RESTITUER LES 2 FAILLES

## Corrigé du 5

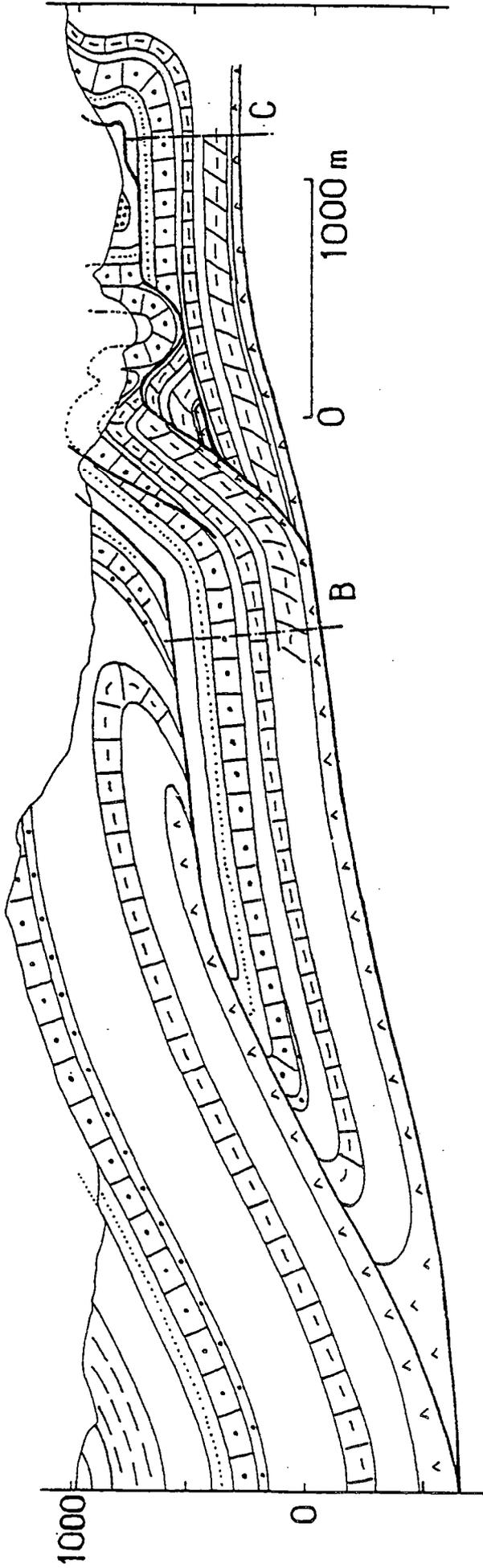
Voyons tout d'abord comment a été construite la nouvelle géométrie du plan de décollement.

En partant de la géométrie antérieure (lignes surchargées de gros points (plan de décollement en bas et toit du Dogger en haut), on abaisse la position du plan de décollement (soit  $S_D$  la surface limitée par l'ancienne et la nouvelle position du plan de décollement). Cette surface est rajoutée à la surface disponible pour résoudre notre problème. Toutefois compte tenu de l'isopacité des couches postulée, il faut abaisser corrélativement la limite supérieure du dogger (soit  $S_d$  la surface limitée par l'ancienne et la nouvelle position de cette ligne). Cette surface est à soustraire à la surface disponible pour résoudre le problème. C'est donc la différence  $S_D - S_d$  qui sera la surface effectivement gagnée. Cette différence doit être égale à  $S_m$  (surface manquante obtenue au niveau de la coupe 4). Dans la pratique on abaisse progressivement le plan de décollement jusqu'à obtenir l'égalité entre les deux surfaces.

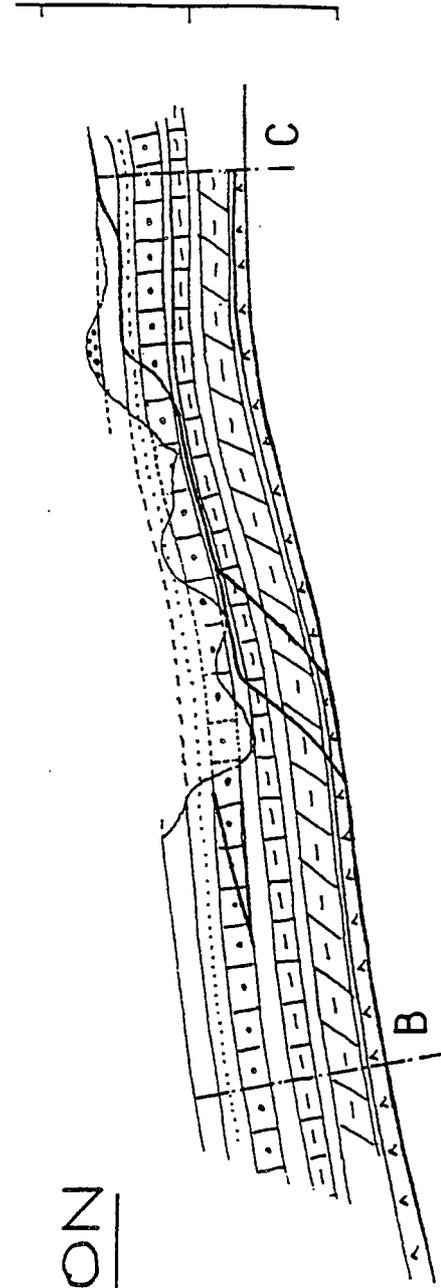


# ⑤ MODIFICATION DES HYPOTHESES

Plan de décollement plus profond - Introduction d'un duplex-



# RESTAURATION



Une solution possible avec duplex est proposée ici. Il faut noter que la carte géologique Castellane 1/50 000 montre à 500 m à l'Est de la coupe un chevauchement avec du Trias à sa base qui correspond au chevauchement supérieur de la structure en duplex et confirme ainsi ce type de solution (en toute rigueur on aurait dû commencer par regarder la carte).

#### 6 - Epaisseur de la série.

Bien que non testé ici, un autre moyen de résoudre notre problème serait d'admettre un amincissement possible de la série. Dans ce cas il peut être envisageable de pouvoir placer les longueurs manquantes de L et de  $J_{1-2}$  (avec une géométrie de type duplex) sans nécessairement enfoncer le plan de décollement.

### COMMENTAIRE

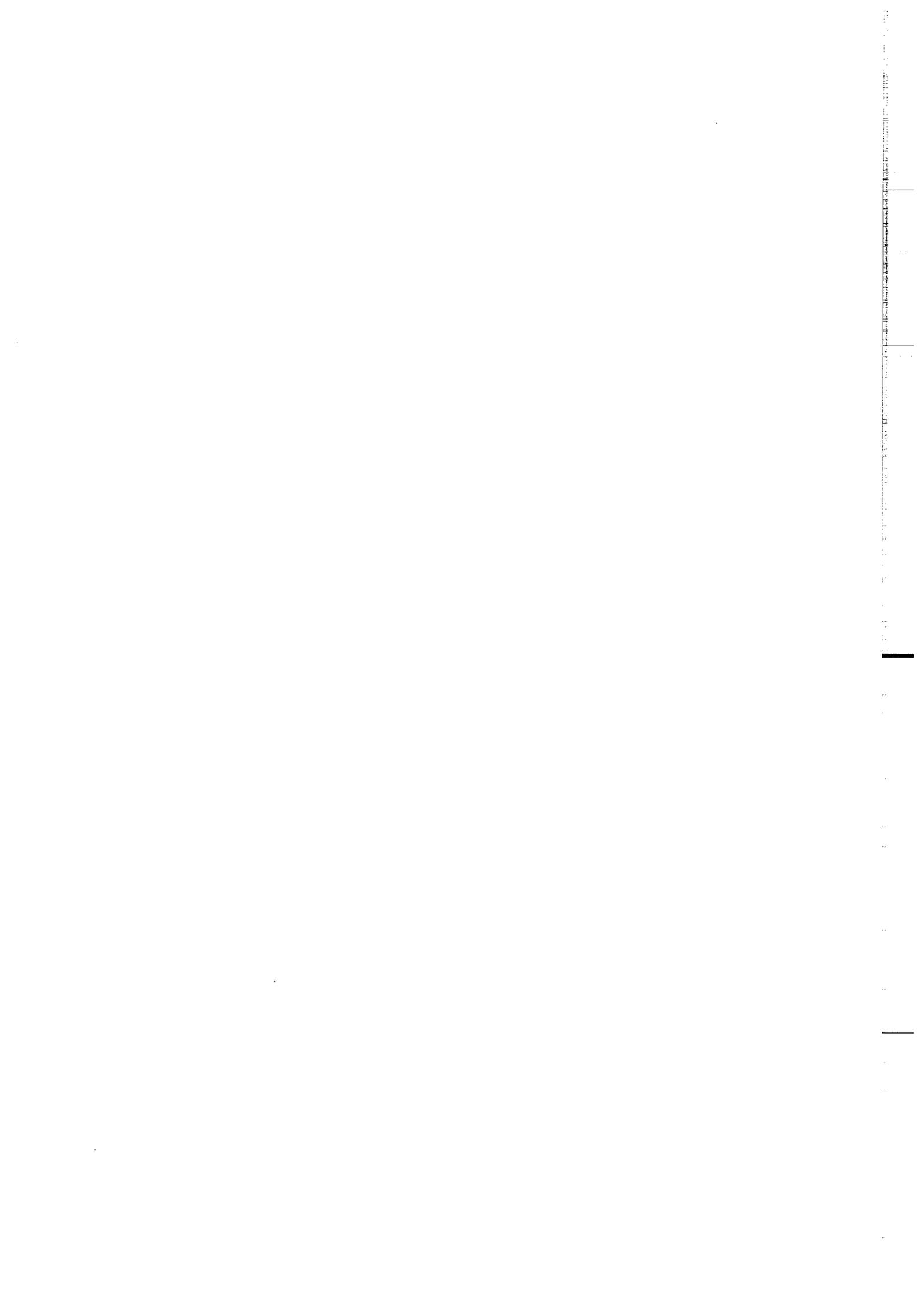
Il ressort de cet exercice les points suivants qu'il faut garder à l'esprit.

a) Il importe dans la construction d'une coupe équilibrée de bien formuler toutes les hypothèses contenues dans la coupe, formulation qui implique d'une part une prise de conscience du géologue des schémas qui guident sa pensée, d'autre part un effort de justification de ces hypothèses.

Notons que le choix de l'hypothèse structurale est déterminant pour le type de solution adaptée : il y a plus de différences entre la coupe 1 et la coupe 3 (non équilibrées) qu'entre la coupe 3 et la coupe 5 (équilibrée). L'équilibrage apparaît dans ce cas essentiellement comme une contrainte géométrique qui conduit à aller jusqu'au bout de la logique que l'on a choisie.

b) Compte tenu du nombre de paramètres libres qui interviennent dans l'équilibrage d'une coupe, la solution est mal contrainte lorsqu'on ne part que de données de surface. L'effort doit donc porter sur l'acquisition de données de subsurface (géophysiques, en particulier sismiques) susceptibles de contraindre les quelques paramètres qui peuvent l'être : position du plan de décollement (associé à un horizon stratigraphique en général bien connu), l'épaisseur des séries.

c) Notons enfin que nous n'avons pas abordé ici le problème du travail sur plusieurs coupes parallèles, approche qui apporte probablement la contrainte la plus forte sur les coupes.



EXERCICE N°2 : MODELES D'ANTICLINAL DE RAMPE  
ET CISAILLEMENT COUCHE SUR COUCHE ASSOCIE

par Gilles MENARD

L.G.I.T., Observatoire de l'Université de Grenoble,  
I.R.I.G.M., BP 68 St Martin d'Hères

BUT DE L'EXERCICE

Lors du franchissement d'une rampe, la série chevauchante accomode le passage sur cette rampe en formant un anticlinal. La formation de cet anticlinal s'accompagne d'une déformation de la partie de la série chevauchante qui a franchi la rampe. Le but de cet exercice est de faire prendre conscience de ce qu'implique le choix d'un modèle de déformation de la partie frontale de l'écaille chevauchante en terme de cisaillement couche sur couche transmis à l'arrière de la structure.

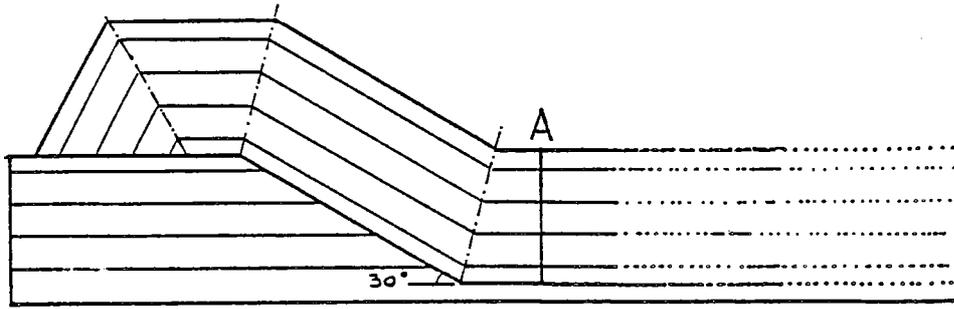
EXERCICE

Visualiser le cisaillement couche sur couche associé à différents cas d'anticlinaux de rampe en construisant l'état initial d'une ligne verticale A située à l'arrière de la structure chevauchante. Cette construction s'effectue en reportant les longueurs de chaque couche entre le front de l'écaille chevauchante et la ligne A à partir du compartiment chevauché au niveau de la rampe.

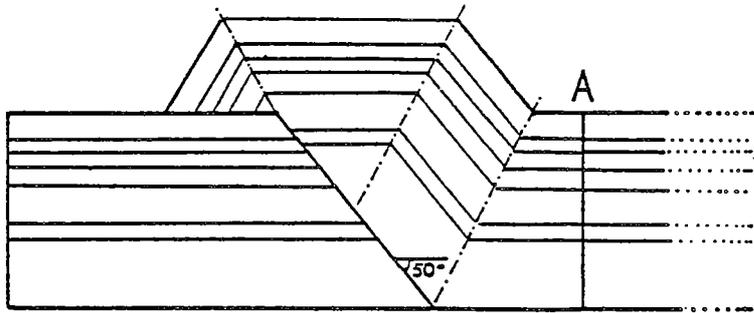
Essayer de deviner pour chaque cas quel est le mode de déformation qui a été imposé à la partie frontale de l'écaille chevauchante.

N.B. : Le panneau "danger" signale un piège.

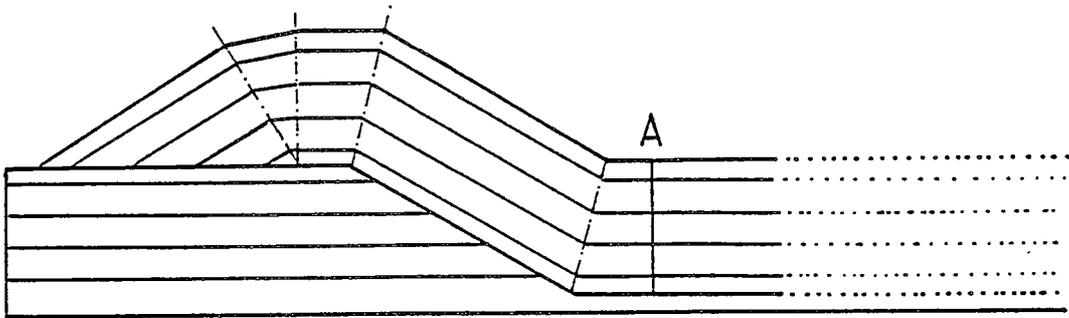
1



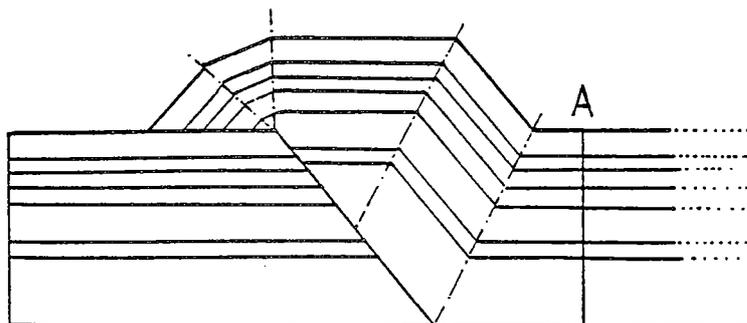
2



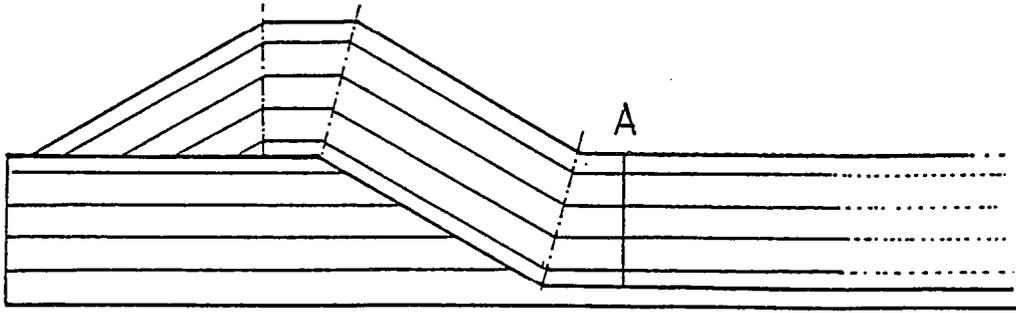
3



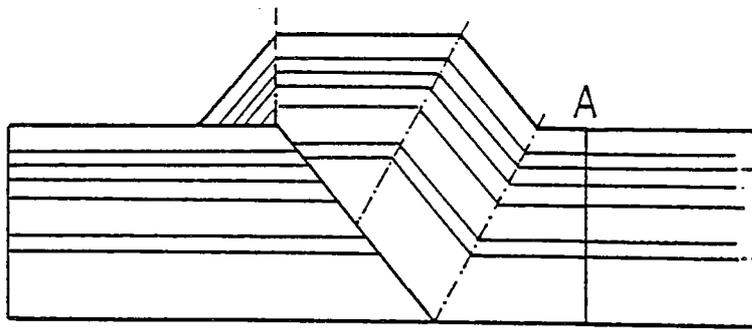
4



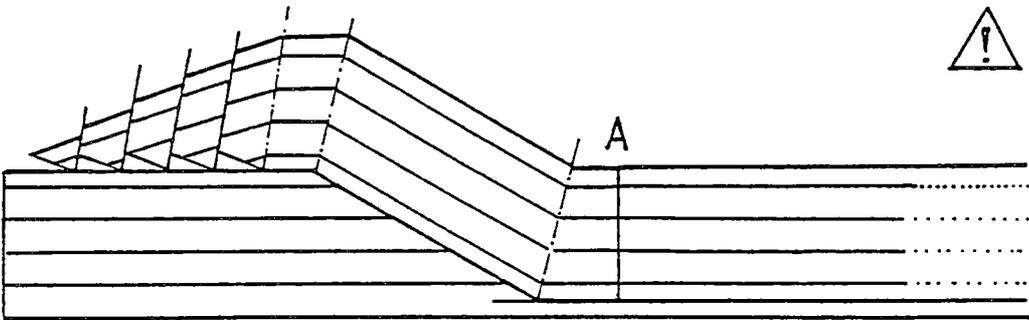
5



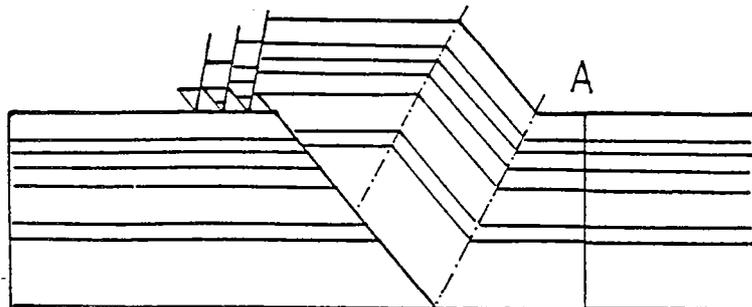
6



7

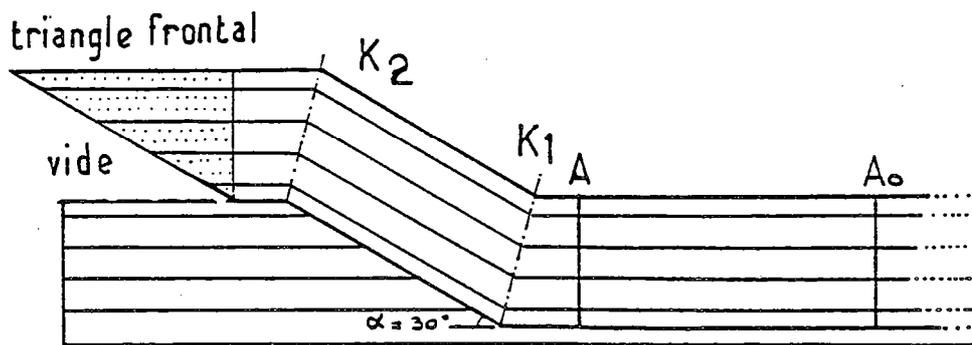


8



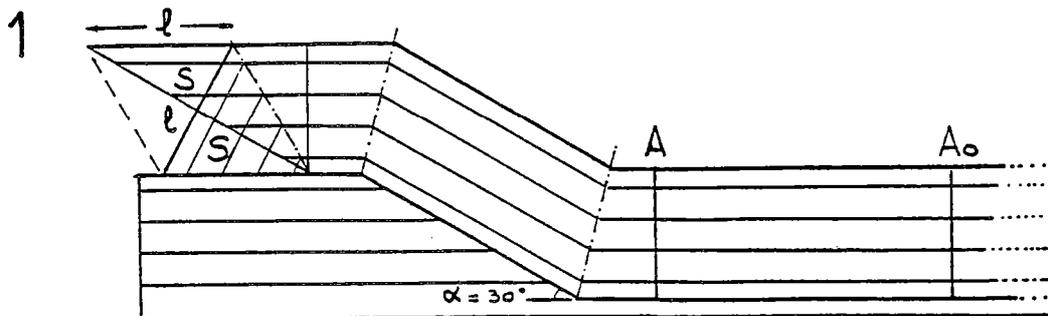
CORRIGE

Les déformations associées aux kinks  $K_1$  et  $K_2$  se compensant géométriquement (pliage et dépliage - glissement couche sur couche), le problème se ramène à la déformation du triangle frontal qui doit combler le vide potentiel situé entre sa base et le toit du compartiment chevauché. C'est le problème de la déformation de ce triangle qui a été abordé de différentes manières dans les cas suivants.



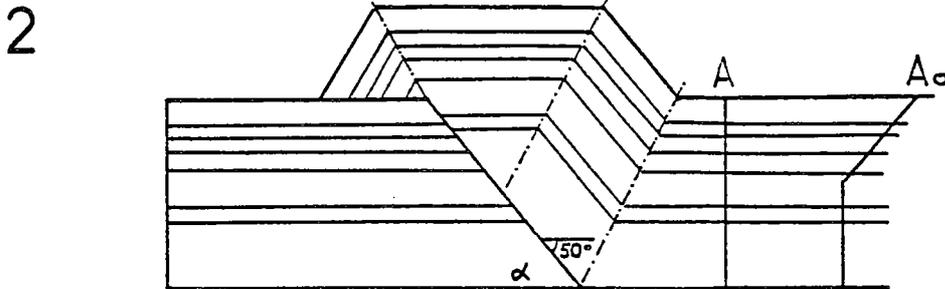
Cas 1 - Mode de déformation imposé : déformation du triangle frontal en imposant la conservation de sa surface ( $S$ ) et les longueurs des couches ( $l$ ). Le problème admet une solution si  $\alpha$  (pendage de la rampe)  $< 30^\circ$  (ici  $\alpha = 30^\circ$ ) (cf. SUPPE 1983). Dans ce cas il n'y a pas de cisaillement couche sur couche transmis à l'arrière de la structure.

Commentaire : si l'on peut trouver une solution qui conserve les longueurs entre états "initial" et état "final", on ne peut passer continuellement de l'un à l'autre en conservant simultanément les longueurs et la surface. On peut ainsi s'interroger sur la validité du critère de conservation des longueurs dans ce modèle.

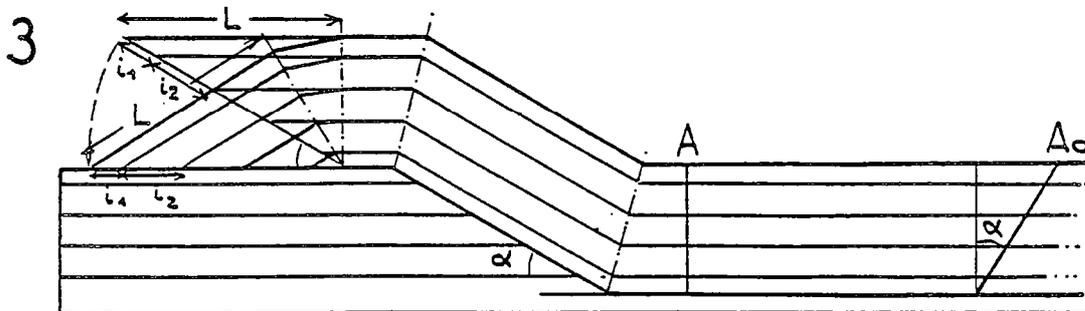


Cas 2 - Ici  $\alpha$  est supérieur à  $30^\circ$  ; le problème précédent n'admet pas de solution. Il est nécessaire de rajouter du cisaillement couche sur couche pour rabattre les couches contre le toit du compartiment chevauché.

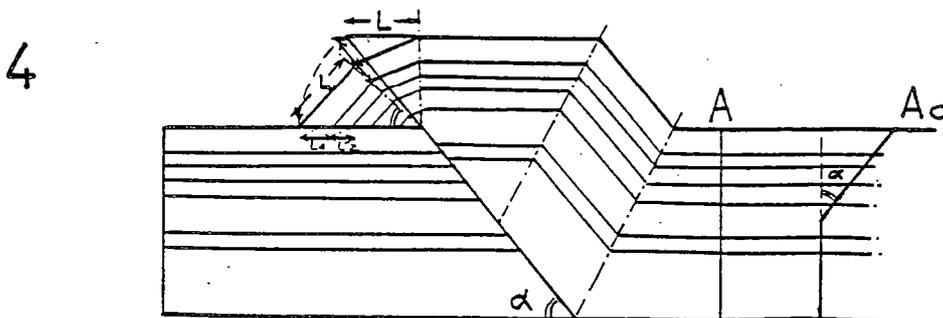
Commentaire : ce problème des rampes à fort pendage se pose lors des réactivations de failles normales préexistantes.



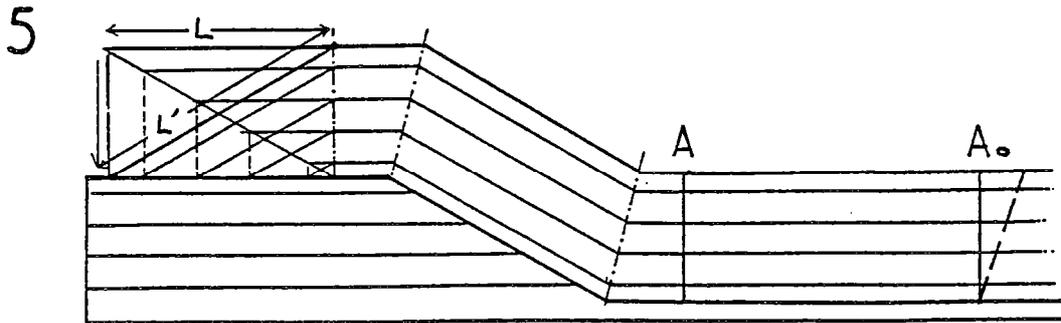
Cas 3 - Mode de déformation imposé : conservation des longueurs d'intersection  $i_1, i_2, i_n$ , ce qui entraîne une rotation rigide du triangle frontal d'un angle  $\alpha$ . Dans ce cas on a un cisaillement couche sur couche transmis à l'arrière de la structure.



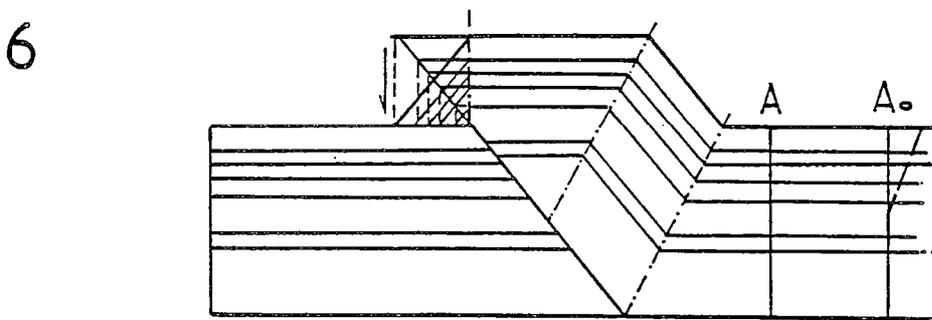
Cas 4 - Idem cas précédent.



Cas 5 - Mode de déformation imposé : cisaillement simple vertical du triangle frontal. Dans ce cas, il n'y a pas de cisaillement couche sur couche transmis à l'arrière de la structure, contrairement à ce que laisserait penser le report des longueurs effectué. En fait le cisaillement simple vertical, s'il conserve la surface du triangle, modifie les longueurs des couches (allongement accompagné d'un amincissement) ( $L' > L$ ). Dans ce cas on n'a pas le droit de reporter les longueurs comme il a été demandé.

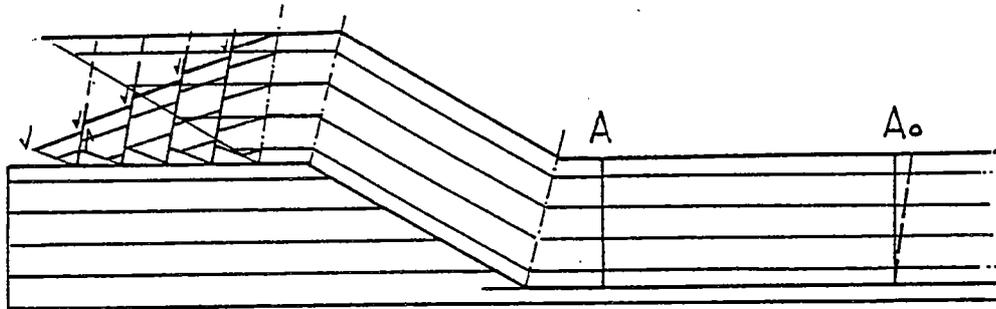


Cas 6 - Idem cas précédent.



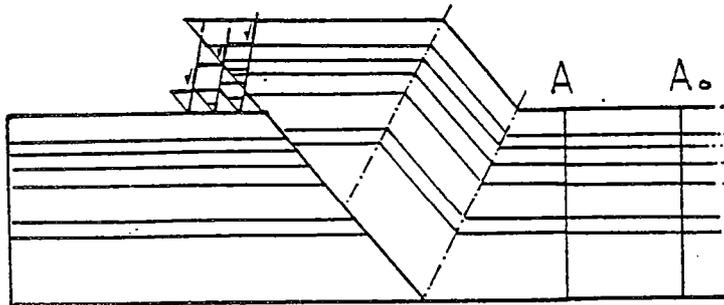
Cas 7 - Mode de déformation imposé : failles normales accompagnées d'un cisaillement simple parallèle à ces failles. Là encore il n'y a pas de cisaillement couche sur couche transmis à l'arrière de la structure, contrairement à ce que montre le report des longueurs. Noter la présence de vides résiduels impliquée par ce modèle.

7



Cas 8 - Mode de déformation imposé : faille normales. Dans ce cas pas de cisaillement couche sur couche. Présence de vides dans ce modèle.

8



La question principale qu'il faut se poser lorsqu'on veut équilibrer une structure telle que celle que nous venons de voir est la suivante : faut-il choisir un modèle dans lequel la déformation est cantonnée à l'anticlinal lui-même ou bien faut-il tolérer du cisaillement couche sur couche transmis à l'arrière de la structure ?

La taille du système qui doit se déformer pour combler le vide potentiel au front de la structure étant petite par rapport à la taille de cette structure, il paraît peu probable que cette déformation seule puisse être le moteur du cisaillement transmis à l'arrière de la structure. Ainsi, s'il existe du cisaillement couche sur couche généralisé, celui-ci a toutes les chances d'être imposé par les conditions extérieures à la structure (solicitation régionale).

Si on cantonne le problème à l'anticlinal lui-même, le problème est mieux contraint puisqu'on raisonne sur un système clos. Dans ce cas le modèle à chercher pour la déformation de l'anticlinal est une combinaison de rotations avec glissement couche sur couche, de cisaillements simples provoquant un étirement-amincissement des couches et de failles (normales ou éventuellement inverses). A l'heure actuelle nous ne disposons pas de modèles sur la manière dont se fait cette déformation : il y a là un domaine ouvert à des recherches futures.

Si on admet un cisaillement couche sur couche, le problème dépend d'un paramètre supplémentaire pas très facile à déterminer et se trouve ainsi très peu contraint. Dans ce cas il faut pouvoir justifier du cisaillement couche sur couche par le contexte régional, il faut assumer les conséquences géométriques de ce cisaillement à l'arrière de la structure chevauchante (déformation des structures situées à l'arrière) et il faut essayer d'estimer la valeur du cisaillement : ce dernier point est particulièrement délicat quand on tient compte du fait qu'il ne faut pas inclure dans cette estimation le cisaillement couche sur couche associé au pliage et dépliage des couches passant sur la rampe ainsi que celui qui correspond à des plats dans des niveaux incompetents dans lesquels la surface de cisaillement est remplacée par une bande cisillée.

IMPORTANCE DES MODELES DE FAILLES DANS  
L'EQUILIBRAGE DES COUPES EN DISTENSION

Jean-Luc FAURE et Michel SEURET

Laboratoire de Tectonique - USTL - 34060 MONTPELLIER

INTRODUCTION.

La connaissance précise de la géométrie des failles normales ainsi que leur évolution dans le temps est un des aspects fondamentaux de compréhension des mécanismes de l'extension crustale. Depuis un certain nombre d'années, de nouvelles méthodes d'études indirectes ont vu le jour. Ces méthodes ont comme objectif de remonter à la géométrie profonde des failles, grâce à la géométrie superficielle des structures (Verral, 81 ; Gibbs, 83,85 ; Davison, 86). Jusqu'à présent, toutes ces méthodes ne se sont intéressées qu'aux failles listriques associées à un niveau de décollement. Ce modèle n'est pas le seul possible, d'autres méthodes doivent donc être mises au point. D'autre part, toutes les méthodes qui ont été décrites ne nous paraissent pas satisfaisantes sur le plan des mécanismes de déformation qu'elles sous-entendent.

I/ - LES MODELES DE FAILLES NORMALES

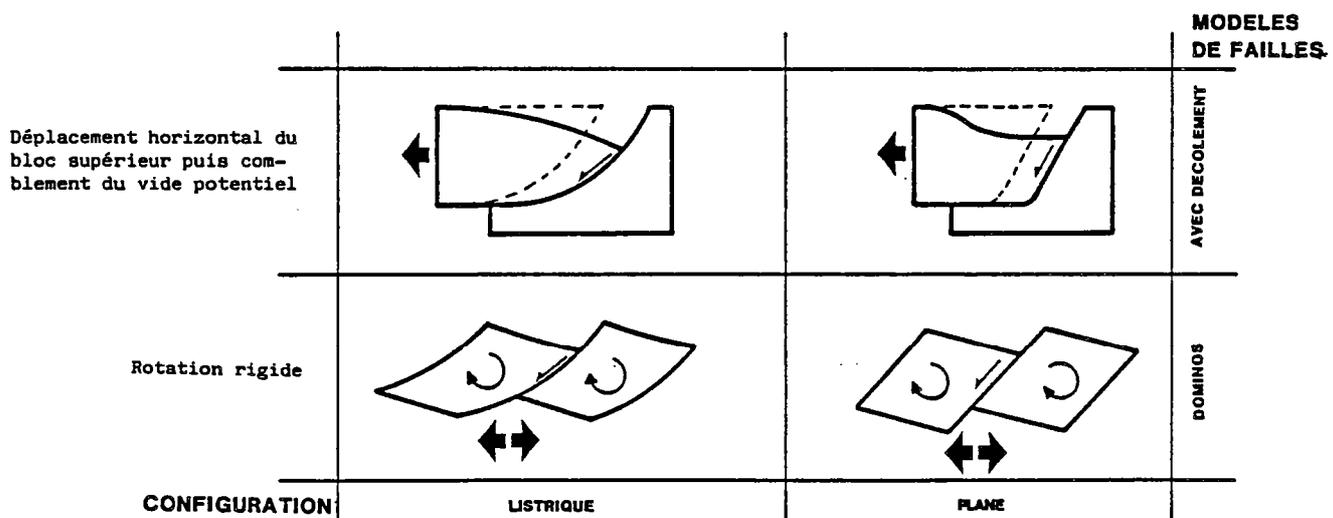


Figure 1 : Les différents modèles de failles normales

1/ Les failles normales associées a une surface de décollement (De Charpal et al., 78 ; Bally et al., 81)

Ces failles sont soit planes, soit listriques et viennent tangenter un niveau de décollement subhorizontal (surface incohérente, Cobbold, 83). Ceci implique l'existence d'un niveau à faible résistance au cisaillement (Brun et al., 85) comme par exemple une couche de sel, une limite socle-couverture ou un ancien chevauchement.

L'évolution de ce type de faille n'a été décrite que pour les failles listriques (Gibbs, 83). On peut la décomposer en deux stades (fig. 1) : le déplacement horizontal du bloc supérieur le long du décollement, engendre la création d'un vide potentiel. Ce vide potentiel une fois comblé est à l'origine d'une forme en roll-over pour les failles listriques ou d'un graben de compensation pour les failles planes.

Dans ce modèle, le basculement des couches ne peut résulter que d'une déformation du bloc supérieur par flexion et/ou extension.

2/ Le modèle en dominos (Fig.1) (Le Pichon et Sibuet, 81 ; Jackson et al., 82 ; Jackson et Mc Kenzie, 83 ; Brun et al., 85).

Dans ce modèle, l'interface qui limite les blocs vers le bas ne correspond plus à un niveau de décollement, mais à un niveau moyen d'amortissement des failles fragiles, dans des matériaux se déformant de façon ductile (surface cohérente ; Cobbold, 83). Le moteur responsable de la rotation des blocs est l'extension ductile profonde. Chaque bloc délimité par des failles normales planes, glisse et pivote le long du bloc qui le précède. Dans ce modèle, la courbure des failles ne peut être que faible (Brun et al., 85).

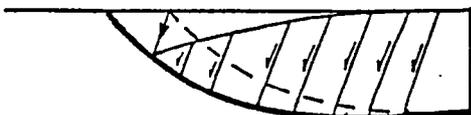
## II - DEMARCHES ET FINALITES



CONFIGURATION DU BLOC SUPERIEUR ———> QUELLE GEOMETRIE DE FAILLE

METHODE

1/ ON S'IMPOSE LA FAILLE.



2/ ON S'IMPOSE OU L'ON DEFINIT UN MODE DE DEFORMATION DU BLOC.

3/ RECHERCHE D'UNE METHODE DE CONSTRUCTION QUI RENDE COMPTE  
AU MIEUX DU MODE DE DEFORMATION DU BLOC QUE L'ON A ADOPTE.

FAILLE ——— Déformation ———> CONFIGURATION DU BLOC.

4/ CHEMIN INVERSE

CONFIGURATION DU BLOC ———> FAILLE.

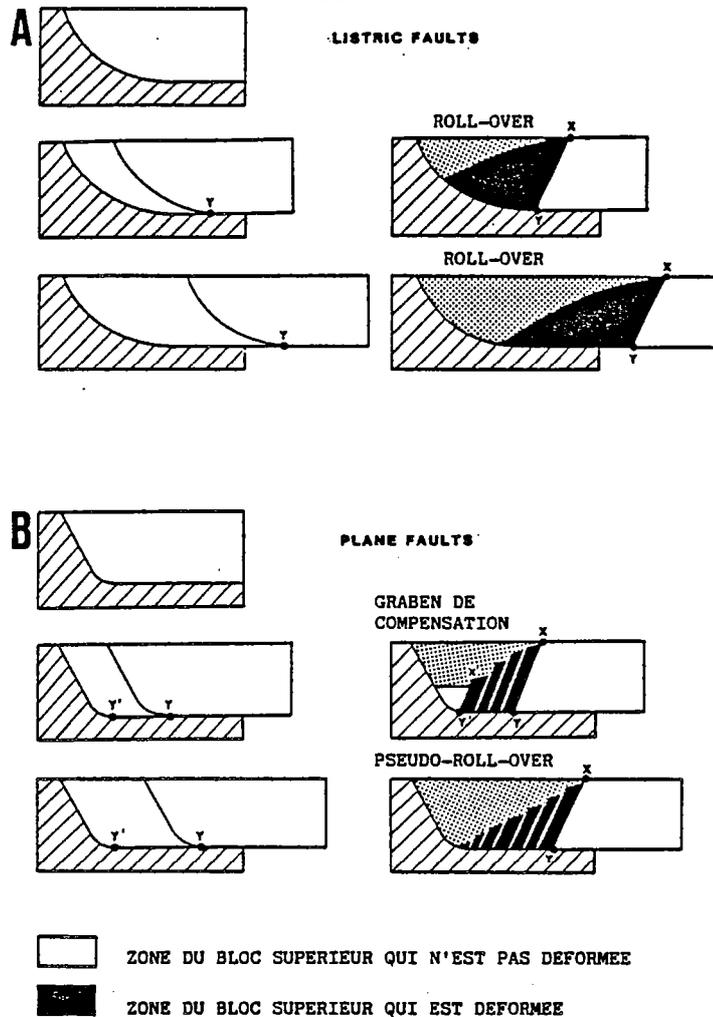
### III - LES FAILLES NORMALES ASSOCIEES A UNE SURFACE DE DECOLLEMENT

#### 1/ Les 2 types de configuration de failles

Les expériences en laboratoire montrent que, pour combler le vide potentiel créé par le déplacement du bloc supérieur, le mode de déformation le plus vraisemblable consiste en du glissement le long de plans inclinés à 60-65° fonctionnant en failles normales antithétiques à la faille majeure.

Dans le cas d'une faille listrique la déformation du bloc supérieur s'effectue suivant un mode de déformation assimilable à du cisaillement simple. En effet, en sismique ce type de structure montre généralement une absence de failles normales antithétiques à fort rejet. La compensation à 60° du vide potentiel implique donc que le point de tangence du roll-over (X) se projette à 60° sur la surface du bloc, à partir du point de départ virtuel du vide potentiel (Y).

Dans le cas d'une faille plane l'intensité de la déformation en cisaillement simple est plus faible. La déformation est en fait une combinaison entre une déformation pénétrative en cisaillement simple et une déformation fragile discontinue. Dans ce cas, une forme en roll-over n'apparaît que lorsque le point de recoupement du bloc supérieur arrive sur le décollement. Avant ce stade, le bloc dessine un graben se compensation. Le point Y se projette alors à 60° en X, et le point Y'en X'.



**Figure 2** : Les deux types de configuration de failles pour le modèle de failles normales avec décollement.

X, point de tangence ; Y, point de départ du vide potentiel s'il pouvait être conservé ; X', rupture de pente dans le bloc supérieur ; Y', rupture de pendage de la faille.

## 2/ Méthode de calcul

Afin d'adopter une construction géométrique en accord avec ce mécanisme de déformation, le bloc est virtuellement découpé en unités de surface ( $ds$ ), pentées à  $60^\circ$  de façon antithétique à la faille majeure (Fig.3). Le simple effondrement de ces unités de surface provoque le comblement du vide potentiel. La méthode consistera donc à reporter pour chaque longueur  $H_r$  les segments  $a, b, c, d$  à partir des points  $X_1, X_2, X_3$  en grandeur et en direction. ( $H_r$  correspond au rejet réel du bloc. Il correspond à la projection à  $60^\circ$  du point X sur l'horizontale)

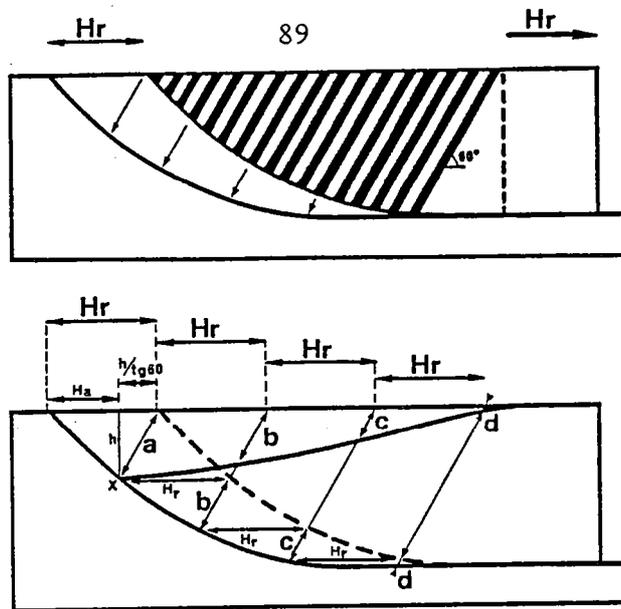


Figure 3 : Méthode de calcul du profil d'une faille normale associée au fonctionnement d'un décollement.

$H_r$ , rejet horizontal réel ;  $H_a$ , rejet horizontal apparent.

#### IV - MODELE EN DOMINOS

##### 1/ Description

Les blocs basculés montrent généralement un certain nombre de failles antithétiques. Ces failles antithétiques sont apparues pour résoudre les problèmes de volume résultant de l'écartement relatif entre ces 2 blocs. La déformation s'effectue de façon analogue aux failles planes associées au fonctionnement d'un niveau de décollement. L'évolution peut être décomposée comme sur la figure 4 : Stade I : La première faille à apparaître est la faille F1 sa vergence est conditionnée par le sens de cisaillement à l'interface fragile-ductile (Faugère - Brun 84). L'écartement relatif entre les deux blocs est à l'origine d'un problème de volume. Celui-ci est immédiatement annulé par la naissance d'une faille antithétique F'1. Le point de convergence (A) entre les deux failles étant situé à la limite fragile-ductile. Stade II : Le bloc 1 pivote et s'écarte du bloc 2, ce qui engendre un vide potentiel. Celui-ci est compensé par des failles antithétiques pentées à 60°, auxquelles s'associe une certaine déformation en cisaillement simple. Tout au long de l'expérience, il se crée ainsi un ensemble de failles antithétiques tel que, la plus ancienne soit la plus éloignée de la faille majeure (F1). La première faille antithétique F'1 qui est apparue est donc basculée avec le bloc, alors que la plus récente ne l'est pas.

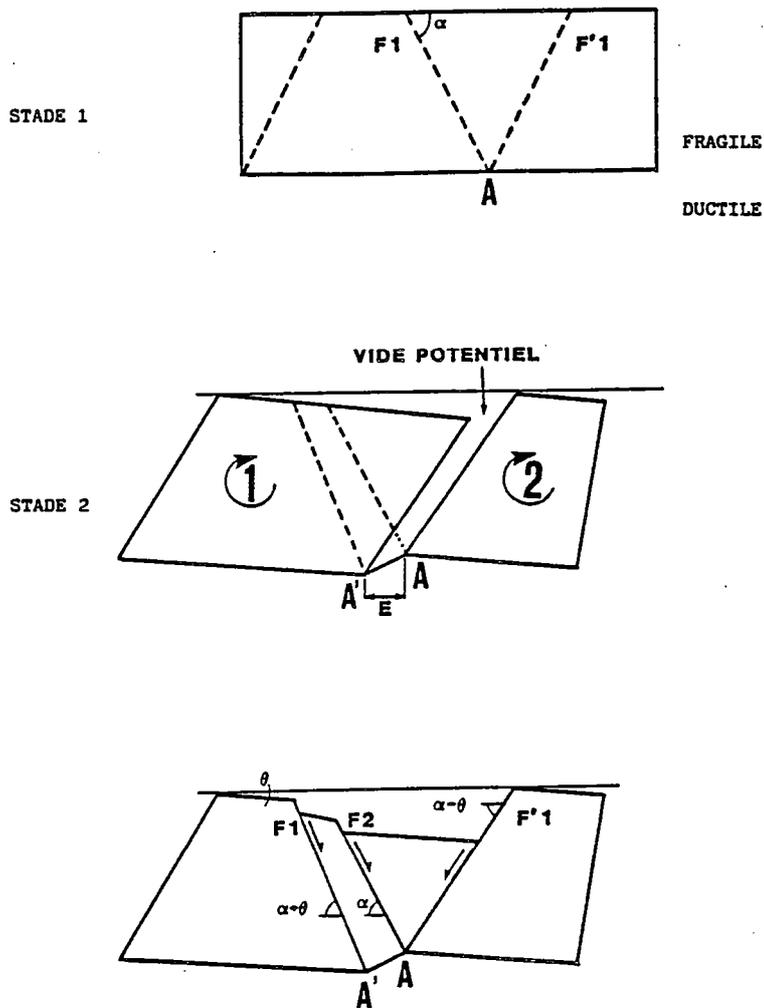


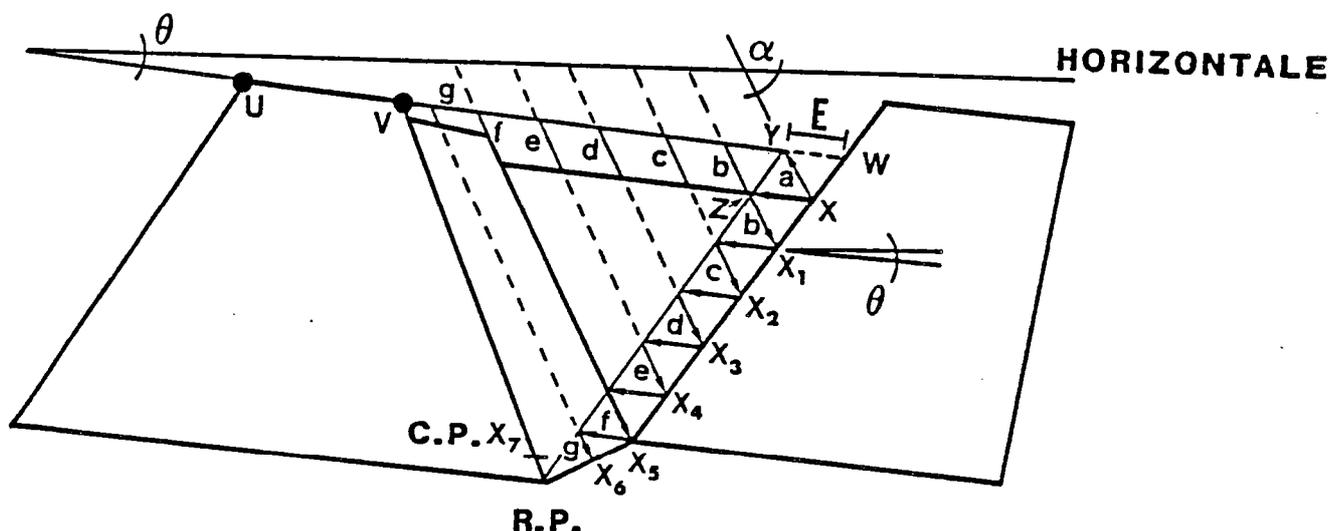
Figure 4 : Modèle d'évolution d'un domino

E, rejet horizontal ;  $\theta$ , angle de basculement du bloc ;  $\alpha$ , pendage des failles ( $60^\circ$ ).

## 2/ Méthode de calcul graphique.

La méthode est analogue à celle qui a été décrite pour les failles associées à un niveau de décollement. L'effondrement de la surface du bloc suivant un plan faisant un angle  $\alpha + \theta$  à partir du point  $A'$  et un angle  $\alpha$  à partir du point  $A$  (Fig.4) aboutit à la structure finale. Tous les points du bloc n'ont donc pas suivis des déplacements parallèles. Il est donc impossible de définir une méthode de calcul du profil des failles qui soit à la fois simple et rigoureuse. Néanmoins, le fait de considérer que tous les points du bloc se déplacent suivant un angle  $\alpha$  va constituer une bonne approximation. En raison de cette simplification, la profondeur du point  $A'$  sera sous-estimée, mais le point  $A$  sera bien défini. La méthode (Fig.5) consistera donc : 1/ à

définir la paléo-horizontale du bloc. Cette droite passe par les points U et V et se projette sur la faille majeure en un point W ; 2/ La projection à  $60^\circ$  du point X sur la droite qui passe par UVW, détermine le point Y. On reportera alors à partir du point X le segment E (YW) parallèlement à la droite UV. On obtient ainsi le point Z. En ce point, on reporte le segment b tel que ce segment face un angle de  $60^\circ$  avec l'horizontale. On définit ainsi le point  $X_1$  qui correspond à un point de la faille. On poursuivra cette construction jusqu'au point  $X_7$  qui correspond au point ultime du calcul.



**Figure 5** : Méthode de calcul du profil d'une faille normale dans un modèle en dominos.

E, rejet horizontal ;  $\alpha$ , pendage des failles ( $60^\circ$ ) ;  $\theta$ , angle de basculement du bloc ; C.P., point calculé ; R.P., point réel.

### CONCLUSION

A partir du pendage des failles en surface, de la géométrie de surface du bloc supérieur, ces méthodes permettent de calculer la géométrie des failles en profondeur. On peut donc définir la profondeur du niveau de décollement (dans le cas de failles associées à un décollement) ou la profondeur de la transition fragile-ductile (dans le cas d'un modèle de failles en dominos). Ces méthodes constituent le préalable à toute construction de coupes équilibrées en distension.

BIBLIOGRAPHIE

- BALLY, A.W., BERNOUILLY, D., DAVIS, G.A., & MONTADERT, L. 1981 :  
Listric normal faults. Oceanologica Acta. Actes 26ème Congrès  
International de Géologie, Colloque géologie des marges  
continentales, Paris, 7-17 Juillet 1980, 87-101.
- BRUN, J.P., CHOUKROUNE, P., & FAUGERE, E., 1985 : Les discontinuités  
significatives de l'amincissement crustal. Bull. Soc. Géol.  
France, 8, t. 1, N° 1, 139-144.
- COBBOLD, P.R., 1983 : Kinetamic and mechanical discontinuity at a  
coherent interface. J. Struct. Geol., 5, 341-349.
- DAVISON, I., 1986 : Listric normal fault profiles : calculation using  
bed length balance and fault displacement. Jour. struct. geol.,  
8, n° 2, 209-210.
- De CHARPAL, O., GUENOC, O., MONTADERT, L. & ROBERTS, D.G., 1978 :  
Rifting crustal attenuation and subsidence in the Bay of Biscay.  
Nature, 275, 706-711.
- FAUGERE, E., & BRUN, J.P., 1984 : Modélisation expérimentale de la  
distension continentale. C. R. Acad. Sci. Paris, 299, II,  
365-370.
- GIBBS, A.D., 1983 : Balanced cross-section construction from seismic  
sections in areas of extensional tectonics. J. Struct. Geol., 5,  
153-160.
- JACKSON, J.A., GAGNEPAIN, J., HOUSEMAN, G., KING, G.C.P.,  
PAPADIMITRIOU, P., SOUFLERIS, C. & VIRIEUX, J., 1982 :  
Seismicity, normal faulting, and the geomorphological development  
of the Gulf of Corinth (Greece) : the Corinth earthquakes of  
February and March 1981. Earth and Planet. Sci. Lett., 57,  
377-397.
- JACKSON, J. & MCKENZIE, D., 1983 : The geometrical evolution of normal  
fault systems. Journal Structural Geology, 5, 471-482.
- GIBBS, A.D., 1985 : Reply to Discussion of "Structural evolution of  
extensional basin margins". J. Geol. Soc. London, 142, 939-942.
- LE PICHON, X. & SIBUET, J.C., 1981 : Passive margins : a model of  
formation. Journal of Geophysical Research, 86, 5, 3708-3720.
- VERRAL, P., 1981 : Structural interpretation with application to North  
Sea problems. Course notes n° 3, Joint Ass. for Petroleum  
Exploration courses (U.K.).

LA TECTONIQUE PELLICULAIRE ET SES LIMITES EN PRATIQUE : EXEMPLES DES ROCHEUSES CANADIENNES  
ET DE L'ARDENNE.

F. MEILLIEZ

Laboratoire de Géologie, Université du Maine  
Route de Laval, F - 72017 LE MANS Cedex

Le point commun aux Rocheuses Canadiennes et à l'Ardenne est d'être un prisme sédimentaire écaillé, charrié sur son avant-pays. Il en résulte une cartographie semblable en première approche. A y regarder de plus près pourtant, la déformation régionale ne s'y est pas exprimée de la même façon. Ces quelques lignes essayent de déterminer "ce qui fait la différence".

1 - LES ROCHEUSES CANADIENNES :

**Les conditions géologiques régionales :**

Les Rocheuses Canadiennes sont formées par un volumineux prisme sédimentaire, constitué par une série quasi continue, datée du Protérozoïque supérieur au Jurassique. Du Jurassique supérieur au Paléocène, l'écaillage de cette série, migrant d'ouest en est, a alimenté un flysch lui-même en partie écaillé, transgressif sur le craton nord-américain.

La marge du craton s'est différenciée durant le Protérozoïque supérieur en vastes blocs transverses à sa direction (Mansy et al., 1986). La mégaséquence transgressive comporte un détritique à dominante pélitique (Groupe Miette), surmonté d'un ensemble arénacé (Groupe Gog) qui le déborde sur le craton. Ensuite, du Cambrien moyen au Jurassique s'est puissamment développé un régime de plate-forme carbonatée, entrecoupé de dépôts pélitiques relativement peu épais.

Une prospection sismique, conduite vers le 51ème parallèle (Bally et al., 1966), a mis en évidence le pendage, faible mais constant, du toit du socle vers l'ouest. L'écaillage de la série sus-jacente s'est donc produit sans raccourcissement crustal dans ce domaine. C'est pourquoi la coupe équilibrée, proposée par Price et Mountjoy en 1970, longue de 180 km, est une référence en tectonique pelliculaire.

### Les hypothèses utilisées pour le tracé :

Les observations de terrain et les très nombreux sondages suscités par l'exploitation pétrolière de l'Alberta, ont inspiré un modèle structural théorique pour l'écaillage de cette série. Les principes en sont les suivants :

- Le plissement cylindrique d'une série stratifiée compétente implique un problème d'accommodation en son coeur. Une solution est la formation d'une surface de rupture, dans une attitude voisine de la surface axiale du pli (Price, 1964).
- L'individualisation d'un pli dans une série stratifiée, implique un raccourcissement différentiel entre les couches qui le constituent et celles qui l'encadrent. La présence éventuelle de niveaux incompétents permet d'accommoder cette différence par glissement dans leur plan. Un couple anticlinal - synclinal se trouve ainsi isolé du reste de la série par deux "failles de détachement" (Dahlström, 1969a).
- Si la déformation régionale ne donne naissance à aucune autre structure que les plis et failles évoquées, alors le raccourcissement imposé ne change pas la longueur des couches compétentes (Dahlström, 1969b).

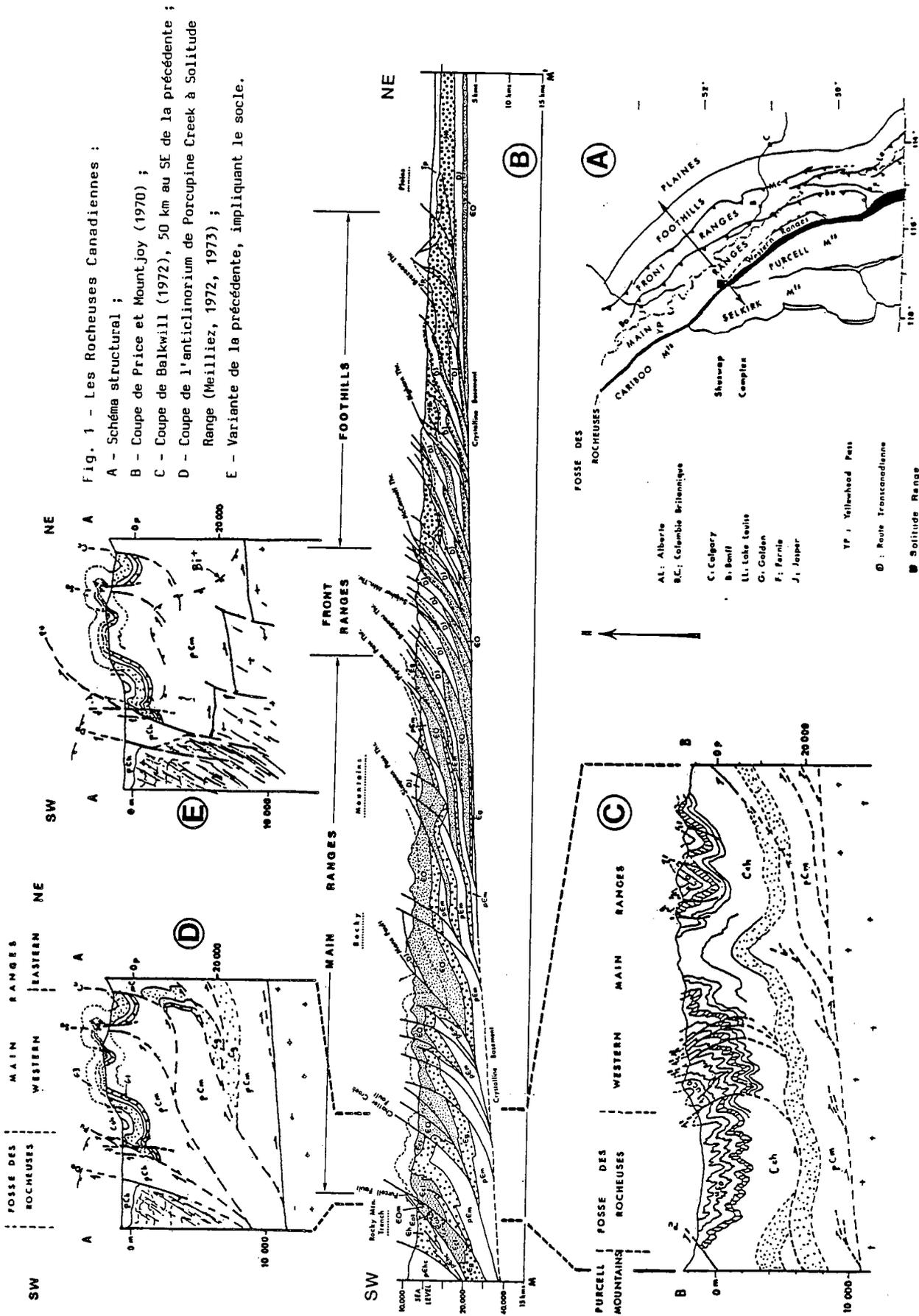
Dahlström (1970) a résumé ces principes et leurs conséquences, en montrant notamment le rôle des rampes longitudinales et transversales. Son approche descriptive l'amène à admettre qu'une faille de détachement n'est pas nécessairement associée à un pli. Il diffère en cela de Price (1964, 1967). Suppé (1983) a poussé l'analyse plus loin encore en développant des modèles quantitatifs.

En appliquant ces principes aux Rocheuses (fig. 1.a et b) Price et Mountjoy (1970) ont estimé à 50% le raccourcissement subi.

### Analyse de la coupe :

Les variations lithologiques et de puissance du prisme sédimentaire ont permis de distinguer, au niveau d'érosion actuel, du NE au SW, les unités structurales suivantes (fig. 1A et B) :

- Les Foothills se distinguent par un empilement d'écailles modestes, constituées par les faciès détritiques du Crétacé - Paléocène.
- Dans les Front Ranges, les écailles sont nettement plus grandes : les carbonates du Paléozoïque supérieur forment de vastes monoclinaux, surmontés d'un synclinal déversé, à coeur de Trias et Jurassique.
- Dans les Main Ranges, la série étant à son maximum d'épaisseur, les écailles sont très vastes, et amènent le Paléozoïque inférieur à l'affleurement.



On voit donc se répéter d'est en ouest le même motif d'écaille, modifié dans ses dimensions alors que s'épaissit la série. Celle-ci étant dominée par les niveaux compétents, l'observation vérifie les lois du plissement par flambage (Biot, 1957 ; Ramberg, 1959) qui lient longueur d'onde et épaisseur.

Plus surprenant est le fait que d'est en ouest, le socle s'enfonce alors que le niveau stratigraphique exposé est de plus en plus ancien. La situation est extrême dans les Western Main Ranges, près du Fossé des Rocheuses (fig. 1B et C), où affleure le Groupe Gog, resté solidaire du socle sous les Front Ranges.

Deux explications peuvent être proposées, l'une stratigraphique, l'autre structurale. Le Groupe Miette, sous-jacent au Groupe Gog, doit apporter sa contribution à l'épaississement de la série vers l'ouest. Ceci est vrai, mais insuffisant, à moins d'imaginer une surépaisseur pour laquelle aucun argument n'est disponible.

L'explication structurale oppose deux hypothèses. La première, adoptée par Price et Mountjoy (fig. 1B) applique scrupuleusement, jusqu'au Fossé des Rocheuses, les principes évoqués plus haut. La seconde fait valoir qu'un changement des conditions aux limites remet en cause cette application.

#### **Les dessous de l'anticlinorium de Porcupine Creek :**

La mégastructure la plus occidentale des Main Ranges est l'anticlinorium de Porcupine Creek, connu sur près de 500 km. Son faible plongement vers le SE fait affleurer le Groupe Miette de Yellowhead Pass à Solitude Range (fig. 1A). La coupe de Price et Mountjoy (1970), passant au SE de Solitude Range, laisse supposer qu'à l'épaississement stratigraphique des Groupes Miette et Gog s'ajoute un épaississement tectonique par superposition d'écailles, au-dessus d'un socle toujours indifférent.

Un travail plus détaillé, effectué environ 50 km au SE, adopte la même hypothèse (Balkwill, 1972). Mais il apporte un élément nouveau : tous les carbonates du Paléozoïque inférieur sont passés latéralement à un terrigène schistosé. Ce passage de faciès a longtemps été considéré comme une faille longitudinale, qui existe en effet vers le NW : la faille de Chatter Creek (Cook, 1970). Le changement lithologique a induit un changement de comportement rhéologique, et donc un changement de style structural. En particulier, le raccourcissement est en partie accommodé par la schistosité pénétrative et l'épaississement tectonique corrélatif (Balkwill, 1972). Il n'y a donc plus conservation de la longueur initiale des couches affectées par la schistosité.

On peut présumer sans risque que le Groupe Miette, à dominante pélitique, est lui aussi schistosé. Mais le Groupe Gog, quartzitique, pourrait encore servir de marqueur compétent. C'est ce qui justifie la coupe de Balkwill (fig. 1C).

#### Solitude Range :

Le Groupe Gog entier affleure axialement vers le NW, à Solitude Range (fig. 1A), où le problème se complique (Meilliez, 1972 ; 1973). Le Groupe Gog a aussi été impliqué dans le changement de faciès : la base reste quartzitique, le milieu devient très pélitique, et la partie supérieure est formée de grès argileux. En coupe, le profil de l'anticlinorium est celui d'un pli coffré, à flancs retournés. Dans le détail, le retournement n'est pas symétrique. En carte, l'anticlinorium est formé de plis en échelon au pas à droite, associés à des failles inverses, de même disposition. L'ensemble peut s'expliquer dans un contexte de transpression dextre, le flanc SW de l'anticlinorium étant progressivement coupé vers le NW par le chevauchement de Purcell (fig. 1D).

Il en ressort trois difficultés pour la construction d'une coupe équilibrée.

La première est géométrique : l'application stricte des conditions de départ implique que le hiatus entre la base du Groupe Gog et le toit du socle s'accroisse en s'éloignant vers le NW. La solution obligée est alors d'empiler des écailles (fig. 1D). Ceci entraîne une augmentation artificielle du raccourcissement en progressant vers le NW. C'est une solution de moins en moins raisonnable en approchant de Yellowhead Pass.

La deuxième est rhéologique : le chevauchement de Purcell supporte un complexe métamorphique mésozonal à catazonal. Un métamorphisme épizonal accompagne sa mise en place sur les Rocheuses de telle sorte que les lignes d'apparition de la biotite et du grenat franchissent le Fossé à partir de Solitude Range (Meilliez, 1972). Dans ces conditions il est difficile de soutenir l'indépendance du socle et de sa couverture vers 10 km de profondeur, d'où la variante de la figure 1E.

La troisième est cinématique : le rôle des coulissements, transpressifs dextres pour la plupart, est maintenant bien établi dans la Cordillère Canadienne (in Mansy, 1986). Le modèle cinématique régional de Van den Driessche (1986) va dans ce sens, et s'accommode des plis et failles de Solitude Range, en échelon au pas à droite. Une coupe équilibrée ignore les composantes de déplacement oblique sur son plan, et ne peut en rendre compte.

### Conclusion sur la coupe des Rocheuses :

Cette coupe montre un empilement d'écaillés, translaté sur un socle induré. La série sédimentaire, dominée par des faciès compétents, est donc rigide. Dans ces conditions, les longueurs des niveaux compétents ne sont pas modifiées par la déformation. Le raccourcissement est distribué entre la courbure des plis et le glissement sur les failles de détachement. Le prisme sédimentaire s'amincit vers l'avant-pays, au NE. Il en résulte que les plis et écaillés sont de dimension croissante vers le SW. Les aires peuvent être équilibrées en coupe, mais le calcul n'est pas simple en pratique.

Ces conditions favorables à l'équilibrage ne tiennent plus dès lors qu'un changement intervient. Une variation de faciès vers une lithologie incompétente (pélites) permet une déformation pénétrative (schistosité) qui absorbe une partie indéterminée du raccourcissement. La proximité d'un dôme métamorphique favorise l'écoulement plastique par rapport à la déformation par flambage et glissement. Les niveaux compétents ne se déforment plus alors à longueur constante. Enfin, des structures peuvent témoigner d'une composante de déformation oblique sur la direction générale du raccourcissement.

### 2 - LA COUPE DE L'ARDENNE :

A première vue, les cartes géologiques laissent supposer que l'Ardenne, allochtone, est structurée comme les Rocheuses Canadiennes. La transposition n'est pas aussi simple, car les conditions ne sont pas identiques :

- Le substratum de l'allochtone n'est pas un socle induré.
- Le point fixe de la coupe n'est pas déterminé.
- La coupe est traversée par une zone de cisaillement majeure, dont aucun critère ne permet d'estimer le rejet.
- La série stratigraphique forme un prisme s'épaississant vers l'arrière, mais elle est dominée par des lithologies incompétentes.

Avant d'examiner comment chaque point évoqué a influencé la construction de la coupe, il est nécessaire de présenter les documents qui ont contraint le dessin.

### Les conditions aux limites pour le dessin :

La coupe proposée (fig. 2), longue de 100 km, est théorique. Elle intègre les données d'affleurements, quasi continus le long de la vallée de la Meuse ; celles de trois sondages profonds, effectués sur la coupe ou à proximité ; celles de trois études de sismique profonde.

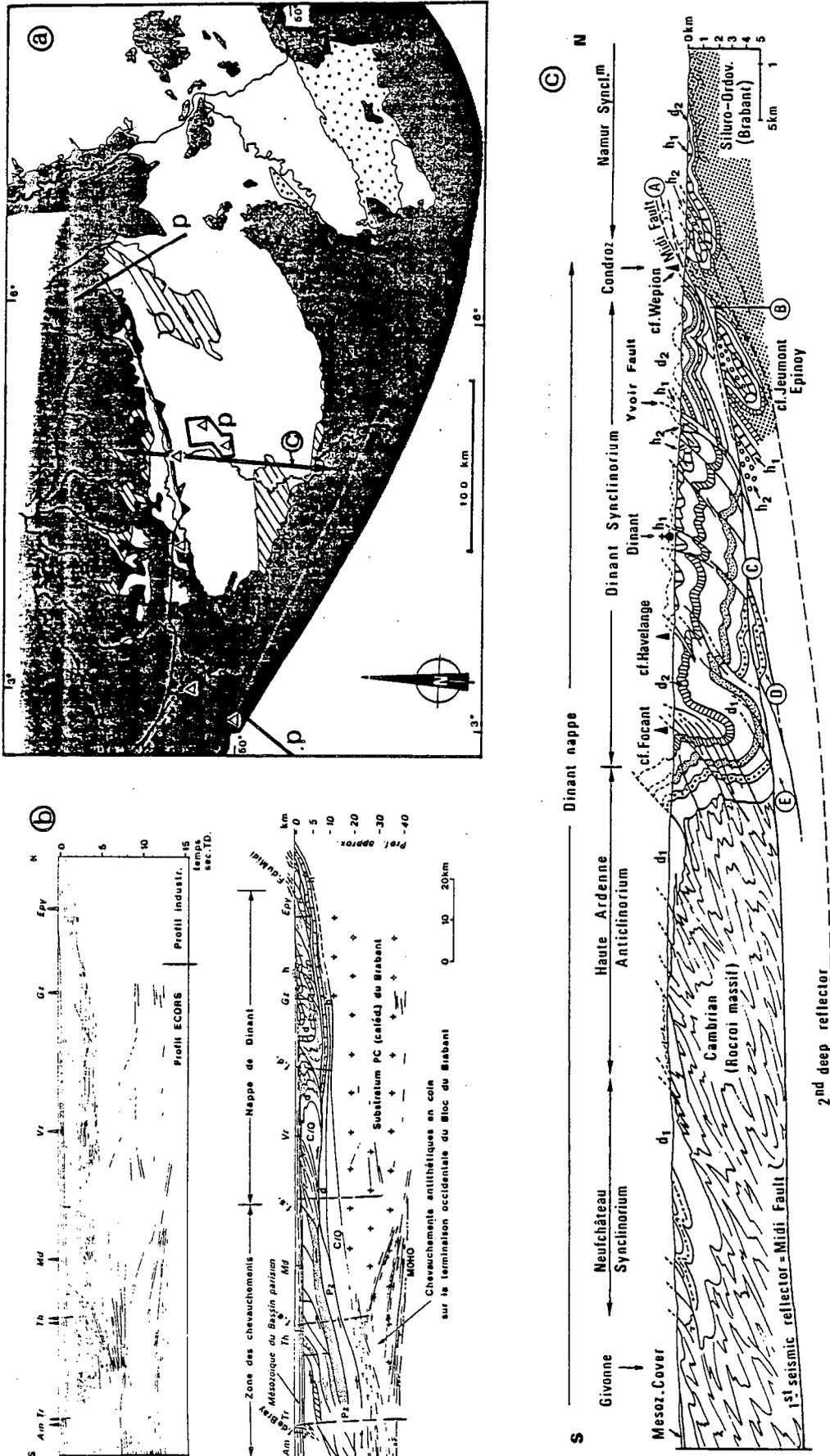


Fig. 2 - Coupe de l'Ardennes :

- a - Carte géologique simplifiée, avec le Paléozoïque inférieur (hachuré), supérieur (blanc), le Permien (pointillé), la couverture post - paléozoïque (gris) ; position des prospections sismiques (p) et des principaux sondages ( ) ;
- b - Partie nord du profil ECORS, d'après Cazes et al. (1985), in Raoult et Meilliez (1986) ;
- c - Coupe profonde de l'Ardennes le long de la vallée de la Meuse, d'après Raoult et Meilliez (1987).

Le profil sismique "ECORS - Nord" a été situé au SW des affleurements ardennais, le long d'une ligne calée par plusieurs forages industriels (Cazes et al., 1985). Ses résultats complets font l'objet d'une synthèse à paraître (Bois, sous presse). Le résultat utile ici est la mise en évidence d'une unité allochtone, délimitée à sa base par un réflecteur continu sur 125 km, très faiblement incliné vers le sud, jusqu'à la Faille du Pays de Bray qui le décale (fig. 2b). De là, ce réflecteur plonge fortement vers la croûte inférieure, où il s'enracine avec d'autres. Au nord du profil, l'émergence de ce réflecteur se confond avec la trace de la Faille du Midi, qui limite au sud le bassin houiller franco-belge.

Un second réflecteur apparaît 2 à 5 km sous le premier, et montre la même continuité. Son interprétation est encore discutée (cf infra). L'autochtone relatif, transparent sismiquement, affleure au nord du profil dans le Massif du Brabant.

Un profil analogue, réalisé en bordure orientale de l'Ardenne, présente les mêmes caractéristiques générales (Meissner et al., 1981). On peut donc supposer la continuité de ce réflecteur sous l'Ardenne, située entre les deux profils (Bless et al., 1982), hypothèse vérifiée par une étude sismique partielle dans la région de Dinant (Graulich, 1980).

#### **L'absence de socle induré :**

L'autochtone relatif est constitué par une série flyschoidé puissante, paléontologiquement datée du Cambrien inférieur au Silurien terminal. Il a été plissé et métamorphisé en-deçà de l'épizone, puis recouvert en discordance par une série condensée, datée du Dévonien moyen au Dinantien. Sur le bord sud, cette couverture, non schistosée, est monoclinale à l'affleurement et sur les profils sismiques. Vers le haut, elle passe en accordance au flysch houiller namuro - westphalien, synchrone de la mise en place de l'allochtone.

L'allochtone montre à l'affleurement plusieurs massifs de Paléozoïque inférieur (fig. 2a), de lithologie comparable à la série brabançonne. Le substratum est donc affecté par la tectonique tangentielle du Carbonifère supérieur. Le réflecteur marquant la base de la nappe n'est pas une surface stratigraphique privilégiée, mais une surface mécanique résultant d'un processus de rupture. Ce n'est pas, comme dans les Rocheuses, la surface de glissement d'un ensemble déformable sur un ensemble indéformable. Les principes énoncés par Dahlström (1970) et Suppé (1983) ne sont donc pas strictement applicables ici.

### Le point fixe est relatif :

Le problème de l'équilibrage de cette coupe est d'abord celui de la définition de ses limites. Alors que les résultats du profil sismique BELCORP ne sont pas encore connus, rien ne permet d'affirmer l'absence, sous la couverture monoclinale dévonienne du Brabant, d'un détachement profond à corrélérer avec le second réflecteur des autres profils. Il en résulte que le point fixe choisi pour la coupe pourrait avoir lui-même été déplacé avec une écaille de substratum. La coupe ne peut être équilibrée par rapport à un point fixe certain. Le raccourcissement ne peut donc être estimé que par valeur inférieure.

### La zone de cisaillement entre les réflecteurs :

Le profil ECORS - Nord a révélé des réflexions désordonnées entre les deux réflecteurs (Cazes et al., 1985). Raoult et Meilliez (1986, 1987) les attribuent à un empilement d'écailles et de plis déversés vers le nord. Ceci est conforme aux données des sondages qui ont traversé la Faille du Midi, et aux observations recueillies lors de l'exploitation houillère du Nord de la France et de la Belgique.

Cette exploitation a montré que la structure interne du bassin houiller est celle d'un prisme d'accrétion tectonique à vergence nord (Bouroz et al., 1961 ; Becq-Giraudon, 1983). La formation et la déformation de ce prisme sont liées à la progression de la Nappe de Dinant, du sud vers le nord (Briart et Cornet, 1863 ; Gosselet, 1888 ; Fourmarier, 1954).

La zone de déformation délimitée par les deux réflecteurs, émerge donc dans le bassin houiller. La déformation subie par cette zone peut se décomposer en un cisaillement simple et une translation, d'intensités inconnues. Il n'est donc pas possible d'équilibrer une coupe intégrant cette zone. En revanche, aucun décrochement important (> 100 km) n'a été argumenté jusqu'à présent.

Des écailles semblables à celles traversées en sondage, affleurent au mur de la Faille du Midi. Elles montrent une série de Paléozoïque inférieur, recouverte en discordance par une série dévono - carbonifère analogue à celle de la couverture brabançonne au nord. D'où la notion de Synclínorium de Namur, dont le flanc inverse, débité en écailles au mur de la Faille du Midi, chevaucherait son flanc normal. Aucun critère stratigraphique n'a pu, jusqu'à présent, permettre d'évaluer l'ampleur du raccourcissement au travers de cette zone.

L'essai d'équilibrage se trouve donc limité à l'allochtone.

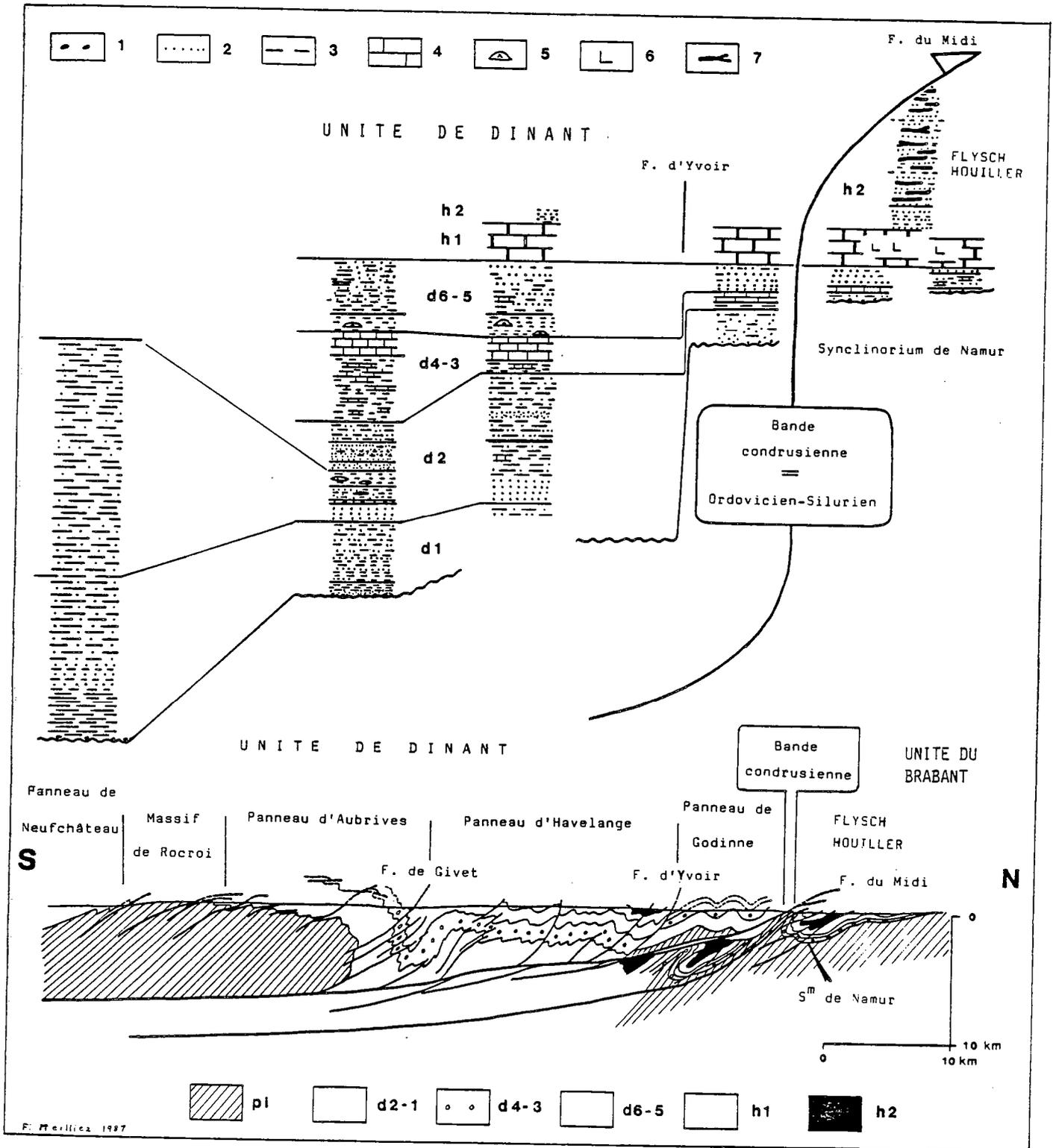


Fig. 3 - Coupe stratigraphique de l'Ardenne :

La série, différenciée, permet d'expliquer les variations de style structural, et montre le contrôle de certaines failles sur la sédimentation, comme la faille d'Yvoir.

- 1 - conglomérats, 2 - grès, 3 - argilite, 4 - carbonates, 5 - constructions récifales, 6 - évaporites, 7 - charbon.
- pi - Paléozoïque inférieur, d2-1 - Dévonien inférieur, d4-3 - Dévonien moyen, d6-5 - Dévonien supérieur,
- h1 - Carbonifère inférieur (Dinantien), h2 - Carbonifère supérieur (Silésien).

### L'équilibrage de l'allochtone :

Le premier réflecteur ayant valeur de surface tectonique, une première hypothèse a été de le considérer comme un décollement. Une estimation de la profondeur de ce décollement, par la méthode de Goguel (1965, p.167), à partir de 4 cartes géologiques, (Khatir, 1983, in Raoult et al., 1984) a montré que :

- le niveau virtuel du décollement est partout localisé dans les faciès pélitiques du Dévonien inférieur ;
- dans la partie septentrionale, les quelques forages ayant atteint la Faille du Midi s'accordent très correctement avec le décollement supposé ;
- le décollement supposé montre deux indentations qui pourraient, à titre d'hypothèse, être considérées comme des rampes tectoniques.

Dans la vallée de la Meuse, au nord de la Faille d'Yvoir (fig.2c), la série est mince et très arénacée (fig. 3). Son comportement rhéologique, plus rigide que celui de la série située au sud de la faille d'Yvoir, est analogue à celui de la série carbonatée des Rocheuses (cf supra). Là aussi, la position estimée du décollement s'accorde bien avec celle du premier réflecteur.

Par contre, au sud de la Faille d'Yvoir, une série puissante, dominée par les faciès pélitiques, ne renferme que 4 niveaux compétents (fig. 3). La schistosité pénétrative qui affecte tout l'allochtone, a donc, comme dans les Western Main Ranges (fig. 1C), absorbé une partie du raccourcissement. Les plis des niveaux compétents, observés à l'affleurement sont moins amples et plus nombreux qu'au nord. Ils sont d'ordre supérieur par rapport à ceux représentés sur la coupe. Pour ces deux raisons, le raccourcissement estimé ne peut être qu'une borne minimale de la valeur réelle.

La coupe a été construite en imposant la conservation des longueurs des quatre niveaux compétents, sur l'ensemble du Synclinarium de Dinant (fig. 2c). Un équilibrage des aires est ici utopique. L'ordre de grandeur du raccourcissement est de 35 à 40% (Raoult et Meilliez, 1986).

### La structure "synclinale" de Focant :

Cette bizarre structure profonde a été dessinée après de nombreuses discussions. Sa géométrie est étroitement contrainte : par les affleurements, par les sondages de Focant et d'Havelange, par la position du premier réflecteur sismique. Murata et Weber (1983) ont produit expérimentalement une structure tout à fait analogue.

Une variante interprétative consiste à faire passer un contact tectonique listrique dans le synclinal. La faible variation de puissance et de faciès observée de part et d'autre pourrait accréditer ce choix.

Quoiqu'il en soit, sous le sondage de Focant la place manque pour placer la totalité de la série, dont la base est nécessairement tronquée.

En guise de conclusion, la similitude des cartes géologiques entre des régions différentes, ne doit pas conduire à l'exportation d'un modèle standard. Les Siwaliks, l'avant-pays pyrénéen, le domaine subalpin, le Jura, sont d'autres régions aux cartographies analogues. Mais les conditions aux limites des unes sont plutôt de type "Rocheuses", tandis que celles des autres sont plutôt de type "Ardenne". Une de ces conditions est une bonne connaissance de la lithostratigraphie régionale qui permet ensuite de discuter de l'adaptabilité des modèles.

#### REFERENCES

- BALKWILL H.-R. (1972).- Structural geology, lower kicking Horse River region, Rocky Mountains, British Columbia. Bull. Can. Petrol. Geol., 20, pp. 608-633.
- BALLY A.-W., GORDY P.-L. & STEWART G.-A. (1966).- Structure, seismic data and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains. Bull. Can. Petrol. Geol., 14, pp. 337-381.
- BECQ-GIRAUDON J.-F. (1983).- Synthèse structurale et paléogéographique du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais. Mém. B.R.G.M., Orléans, n° 123, 71 p.
- BIOT M.-A. (1957).- Folding instability of a layered viscoelastic medium under compression. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 242, pp. 444-454.
- BLESS M.J.M., BOUCKAERT J. & PAPROTH E. (1983).- Recent exploration in Pre-Permian rocks around the Brabant Massif in Belgium, the Netherlands and the Federal Republic of Germany. Geol. en Mijnbouw, pp. 51-62.
- BOIS C. (1987, sous presse).- Le profil ECORS - Nord de la France. I.F.P., Technip, Paris.
- BOUROZ A., CHALARD J., DALINVAL A. & STIEVENARD M. (1961).- La structure du bassin houiller du Nord de la région de Douai à la frontière belge. Ann. Soc. géol. Nord, Lille, 81, pp. 173-220.
- BRIART A. & CORNET J. (1863).- Communication relative à la Grande Faille qui limite au sud le bassin houiller belge. Pub. Soc. Anciens Elèves Ec. Mines Hainaut, t. XI, Mons.

- CAZES M., TORREILLES G., DAMOTTE B., GALDEANO A., HIRN A., MASCLE A., MATTE Ph., PHAM VAN NGOC & RAOULT J.-F. (1985).- Structure de la croûte hercynienne du Nord de la France : premiers résultats du profil ECORS. Bull. Soc. géol. France, Paris, 6, pp. 925-941.
- COOK D.-G. (1970).- A Cambrian facies change and its effect on structure, Mount Stephen - Mount Dennis area, Alberta, British-Columbia. Geol. Ass. Can., sp. paper n° 6, pp. 27-40.
- DAHLSTROM C.-D.-A. (1969 a).- Balanced cross sections. Can. J. Earth Sci., 6, pp. 743-757.
- DAHLSTROM C.-D.-A. (1969 b).- The upper detachment in concentric folding. Bull. Can. Petrol. Geol., 17, n°3, pp. 326-346.
- DAHLSTROM C.-D.-A. (1970).- Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. Bull. Can. Petrol. Geol., 18, n°3, sept. 70, pp. 332-406.
- FOURMARIER P. (1954).- La tectonique, in Prodrôme d'une description géologique de la Belgique. Soc. Géol. de Belgique (éd.), Liège, pp. 609-744.
- GOGUEL J. (1965).- Traité de Tectonique, 2ème édition. Masson & Cie, Eds, Paris, 457 p.
- GOSSELET J. (1888).- L'Ardenne. Mém. serv. carte Géol. France, Paris, 881 p.
- GRAULICH J.-M. (1980).- Les structures profondes en Famenne constituent-elles des réservoirs de gaz ? in "Revue Générale du Gaz", n°4, pp. 165-172.
- MANSY J.-L. (1986).- L'évolution de la chaîne d'Omineca (Cordillère canadienne). Bull. Soc. géol. France, Paris, (8), 2, n°5, pp. 711-725.
- MANSY J.-L., MEILLIEZ F. & MERCIER E. (1986).- Esquisses stratigraphique et paléogéographique de la Cordillère canadienne au Protérozoïque supérieur. Bull. Soc. géol. France, Paris, (8), 2, n°5, pp. 727-734.
- MEILLIEZ F. (1972).- Structure of the southern Solitude Range (Rocky Mountains), British Columbia. Master of Science, Calgary (Canada). 106 p., 6 pl. h-t.
- MEILLIEZ F. (1973).- Etude géologique du secteur méridional de Solitude Range (Rocheuses), Colombie Britannique (Canada). Thèse 3ème cycle, Lille. 189 p. Univ. Lille.

- MEISSNER R.-H., BARTELTSEN H. & MURAWSKI H. (1981).- Thin-skinned tectonics in the northern Rhenish Massif, Germany. *Nature*, Londres, 290, 5805, pp. 399-401.
- MURATA H. & WEBER K. (1983).- Experimental study of subfluence tectonics in the Rheinische Schiefergebirge. Intracontinental fold belts. Martin & Eder (eds.), Springer-Verlag, Heidelberg. pp. 339-354.
- PRICE R.-A. (1964).- Flexural-slip folds in the Rocky Mountains, southern Alberta and British Columbia. *Seminars in tectonics*. Dept. Geol. Sciences, Queen's Univ., Kingston, Ontario, IV. p. 6.
- PRICE R.-A. (1967).- The tectonic significance of mesoscopic subfabrics in the southern Rocky Mountains of Alberta and British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, 4, pp. 39-70.
- PRICE R.-A. & MOUNTJOY E.-W. (1970).- Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca Rivers. A progress report. *Geol. Ass. Can.*, sp. paper n° 6, pp. 7-26.
- RAMBERG H. (1959).- Evolution of ptygmatic folding. *Nor. Geol. Tidsskr.*, 39, pp. 99-151.
- RAOULT J.-F. & MEILLIEZ F. (1986).- Commentaires sur une coupe structurale de l'Ardenne selon le méridien de Dinant. *Ann. Soc. Géol. Nord*, Lille, 105, pp. 97-109.
- RAOULT J.-F. & MEILLIEZ F. (1987).- The Variscan Front and the Midi Fault between the Channel and the Meuse River. *J. Struct. Geol.*, Oxford, 9, n°4, pp. 473-479.
- RAOULT J.-F., COLBEAUX J.-P., KHATIR A., LEDRU P., MEILLIEZ F., PIQUE A. & SOMME J. (1984).- Structures liées à la Faille du Midi et aux chevauchements nord-varisques. *Documents du B.R.G.M.*, Orléans n° 81 - 1, pp.33 - 56.
- SUPPE J. (1983).- Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Am. J. Sci.*, 283, pp. 684-721.
- VAN DEN DRIESSCHE J. (1986).- Cinématique de la déformation ductile dans la Cordillère canadienne : relations chevauchements - décrochements. *Bull. Soc. géol. France*, Paris, (8), 2, n°6, pp. 911-920.

QUELQUES PROBLEMES POSES PAR LA CONSTRUCTION DE COUPES  
EQUILIBREES DANS UNE REGION GEOLOGIQUEMENT TRES ETUDIEE.  
LE CAS DE LA PROVENCE.

C. TEMPIER

Laboratoire de Géologie dynamique et Pétrologie de la surface, U.A. CNRS 132,  
Faculté des Sciences de St-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 13.

Introduction

Le terme de coupe équilibrée (balanced cross section) a été introduit par Dahlstrom (1) mais reprend une notion déjà utilisée antérieurement en tectonique notamment par Goguel (2), exprimant le principe de la conservation de la matière dans les déformations orogéniques. Cette idée se traduit de façon simple dans le cas d'une déformation plane : la coupe doit pouvoir être "rétrodéformée" pour être ramenée à l'état initial, ce qui suppose que la surface d'une formation sur la coupe, ainsi que la longueur des couches compétentes n'ayant pas subi de déformations ductiles, doivent être conservées.

La méthode se prête donc bien à l'étude des couvertures sédimentaires plissées des avants-pays de chaînes. Elle permet de vérifier quelles sont les interprétations possibles et de proposer des valeurs ou au moins des ordres de grandeur du raccourcissement tectonique, donnée importante en tectonique globale.

L'application de cette méthode à la Provence, région très étudiée ayant fait l'objet de longues controverses, est intéressante, car des valeurs très divergentes de la portée des chevauchements affectant cette région ont été proposées depuis 15 ans et que les travaux antérieurs n'ont pas fourni de coupes générales interprétées en profondeur. Le style tectonique : déformations discontinues de type cassant ; panneaux de couverture décollés sur les évaporites triasiques, se chevauchant avec une géométrie de type "ramps and flats" ; plis rares et ne jouant qu'un rôle subordonné, absence de schistosité, correspond en principe au cas idéal pour la construction de coupes équilibrées. Les premières conclusions de ce travail ont fait l'objet d'une publication récente (3) et seuls seront développés ici les problèmes de méthodologie rencontrés dans la réalisation des coupes ; liés d'une part à la documentation disponible (peut-on construire une coupe équilibrée à partir des seuls documents publiés ?) et d'autre part à l'utilisation des concepts de base dans une région où prédominent des structures polyphasées non cylindriques affectant des formations calcaires.

Les documents

Les données nécessaires à la construction des coupes concernent la géologie de surface, la succession lithostratigraphique et les renseignements disponibles sur les structures profondes comme la forme et la position du toit du socle et du tégument.

### a) Géologie de surface

Les données de base sont fournies par la carte géologique. La Provence est actuellement entièrement couverte par les feuilles au 1/50 000, cependant un certain nombre d'éléments importants manquent souvent sur la carte dans la notice :

- le mode de déformation des roches (existence éventuelle de schistosités, de linéations d'étirement, de dissolutions importantes) ;
- les valeurs chiffrées du pendage de la stratification ou de la schistosité qui sont rares, absentes ou non représentatives ; il est très difficile de calculer le pendage des couches des grandes unités homogènes ainsi que celui des failles lorsque les contours sont mal tracés ou même décalés par rapport à la topographie !

### b) Succession lithostratigraphique

La connaissance précise de la puissance et de la succession des formations lithostratigraphiques est capitale pour la construction d'une coupe équilibrée. Elle est le plus souvent donnée, mais de façon sommaire et mal localisée dans la notice des cartes ; les formations épaisses et monotones sont le plus souvent négligées. Les thèses et monographies régionales donnent également le plus souvent des indications incomplètes. Par contre, les quelques coupes mesurées levées par les équipes de géologues pétroliers constituent, lorsqu'elles ont été conservées et peuvent être consultées des documents fiables et précis surtout en ce qui concerne les puissances. Les logs de forages, malheureusement encore peu nombreux sont également très utiles mais les subdivisions lithostratigraphiques et les diagraphies des sondeurs sont le plus souvent très difficiles à corréliser avec les coupures stratigraphiques de la carte géologique.

### c) Documents de subsurface

La réalisation d'une coupe équilibrée dans une couverture sédimentaire nécessite une bonne connaissance de la forme et de la position du toit du socle ou du tégument. Cette surface peut être déformée avec la couverture qui forme ainsi des plis de revêtement (thick skinned tectonics) ou être au contraire restée à peu près horizontale sous la couverture déplacée et déformée (thin skinned tectonics). Goguel (1) a montré que dans ce dernier cas les formations sous-jacentes au niveau du décollement n'apparaissent jamais dans le noyau des plis ou la base des unités chevauchantes, quel que soit le niveau de l'érosion. En Provence les termes antérieurs au Trias moyen ne sont pas impliqués dans les mouvements de la couverture sauf dans quelques cas particuliers ; le tracé de la coupe de la couverture est alors guidé par la profondeur du toit du tégument. Si la séquence sédimentaire ne comporte pas d'horizon incompetent pouvant jouer en niveau de décollement, des indications, même approximatives de la position du toit du tégument sont suffisantes : elles permettent de placer une ou deux fois l'épaisseur de la couverture sédimentaire entre la surface du sol et le toit du tégument (ou du socle). On peut ainsi montrer qu'en Provence la série sédimentaire ne peut être doublée sous les grandes unités synclinales grâce aux indications approximatives fournies par les profils de sismique réfraction donnés par Ménard (4), ce qui permet de contraindre la portée des chevauchements. Les données de forages, même très partielles, ont permis de confirmer l'absence de déformation du tégument sous les anticlinoriaux comportant des calcaires très plissés du Muschelkalk ("bandes triasiques") de Provence centrale et orientale, qui constituent des accumulations de formations incompetentes non engagées dans les chevauchements.

En conclusion, même dans une région très étudiée et bien connue comme la Provence, il reste difficile de construire des coupes équilibrées à partir des cartes et documents publiés particulièrement du fait du manque de données chiffrées de pendages et d'épaisseurs des couches ; aussi bien sur les cartes géologiques que dans les thèses et monographies régionales. Un travail complémentaire de terrain et une bonne connaissance critique des travaux sont indispensables. Les données de géophysique et de forages sont, bien sûr, toujours trop rares et d'accès difficiles, mais bien plus précises et permettent souvent une bonne approche des problèmes.

### Les phases tectoniques superposées

La réalisation de coupes équilibrées concerne généralement des régions de tectonique monophasée ou considérée comme monophasée. Dans le cas général d'une région ayant été affectée par plusieurs phases tectoniques d'ampleur comparable et non coaxiale, une coupe sera toujours oblique par rapport aux structures de l'une des phases et il est impossible de séparer les raccourcissements relatifs à chaque épisode. Si par contre les phases sont coaxiales, on prend en compte la déformation finie et la coupe peut être rétrodéformée, éventuellement par étapes en remettant chaque fois à l'horizontale les terrains discordants.

En fait, en Provence, de nombreuses phases tectoniques indépendantes ont été mises en évidence par des discordances locales ou des décharges détritiques, depuis l'Albien jusqu'au Miocène. Mais si on tente de reconstituer les structures formées au cours de ces divers épisodes, on s'aperçoit qu'à l'exception des chevauchements majeurs de l'Eocène supérieur, il s'agit de failles ou de plis peu accusés ou très localisés n'ayant occasionné qu'un raccourcissement très faible, bien inférieur aux erreurs de constructions sur les structures majeures et pouvant donc être négligé en première approximation. Ceci n'est pas contradictoire avec le fait que ces structures ont joué, lorsqu'elles sont antérieures à la phase majeure, un rôle important dans la localisation des chevauchements et décrochements.

Les documents publiés insistent en général sur l'existence de phases tectoniques superposées mais le plus souvent sans aucune hiérarchie ; il serait important que dans la description d'une phase de déformation mise en évidence par une discordance soit tentée une estimation du raccourcissement, donnée nécessaire pour le tracé de coupes régionales.

La portée des chevauchements très plats de type provençal a été souvent exagérée en prenant pour repère les klippes les plus distales ; une des raisons de surestimation est que les unités allochtones en position haute sont souvent affectées par des phénomènes d'extension, probablement gravitaires, contemporains des déplacements et difficiles à chiffrer car affectant les portions d'unités les plus érodées.

En conclusion la construction de coupes équilibrées dans une région affectée par plusieurs phases tectoniques nécessite une estimation du raccourcissement correspondant à chacune de ces phases. Elle n'est facile que si ces diverses déformations sont mineures vis-à-vis d'un épisode majeur de plis ou de chevauchements. Elle est possible si les phases sont coaxiales, mais par contre très difficile ou impossible s'il y a plusieurs familles de chevauchements de vergence différente (cas de l'arc de Castellane dans les chaînes subalpines ?).

### Les structures non cylindriques

La Provence est classiquement une région de structures non cylindriques présentant des amortissements latéraux très rapides. En effet des coupes parallèles espacées de 10 à 15 km sont en général totalement différentes ! De plus, les structures n'ayant pas toutes les mêmes directions axiales, certaines ne seront pas perpendiculaires à la coupe ce qui oblige théoriquement à une correction qui reste heureusement peu importante et peut en première approximation être négligée si cet angle est inférieur à 30°.

Certaines précautions sont donc nécessaires. Dans un premier temps ont été recherchées sur le terrain les directions de déplacement relatif des unités, sur les plans de chevauchement et les failles de décrochement obliques. Cette détermination n'est pas toujours possible car elle exige de bonnes conditions d'affleurements ; les résultats semblent valables car ils sont le plus souvent très cohérents pour une même unité ; mais des mouvements de rotation sont possibles. Cette première étude permet de choisir le tracé des coupes en dehors des unités trop obliques, des zones de relai tectonique ou des secteurs affectés par des phases plus tardives. Il faut noter que chaque coupe doit être traitée séparément car il n'est pas possible de projeter latéralement les données à plus de 1 à 2 km de distance.

Dans un deuxième temps a été tentée une rétrodéformation de la carte par découpage et dépliage (les plis, mineurs en Provence, ont été négligés dans certains secteurs). Cette méthode, déjà proposée par Goguel (5) pour l'Arc de Castellane, sous une forme un peu différente (quadrillage déformé) permet de lever des indéterminations, de vérifier la compatibilité des coupes entre elles, avec les sens des chevauchements et des décrochements observés sur le terrain et avec les directions de raccourcissement à l'échelle de l'affleurement déterminées par les méthodes microtectoniques (plans striés, fentes, fibres de calcite, stylolites). Ces directions sont, en Provence, assez constantes autour de N0 à N10, avec une dispersion de N170 à N25, confirme que le tracé de coupes orientées Nord-Sud est en gros valable.

### La déformation et les phénomènes de dissolution dans les calcaires

La construction d'une coupe équilibrée suppose, à priori, la conservation de la matière au cours des déformations et, en l'absence de schistosité, la conservation de la longueur des couches compétentes sur la coupe. Cependant l'analyse de terrain montre que les dissolutions de carbonates au niveau des stylolites est importante et que ces phénomènes se sont poursuivis pendant et après la phase tectonique majeure (les stylolites à pics verticaux recoupent souvent les stylolites à pics horizontaux ce qui indique qu'ils ne sont pas uniquement liés à la diagenèse précoce. D'autre part, le volume dissout se retrouve-t-il entièrement dans les remplissages de fentes ? Ce n'est pas sûr, au moins dans certains cas. Le bilan n'est pas connu et reste à faire ; il pourrait modifier de façon appréciable l'estimation du raccourcissement en région calcaire ; on ne peut pour le moment que poser le problème.

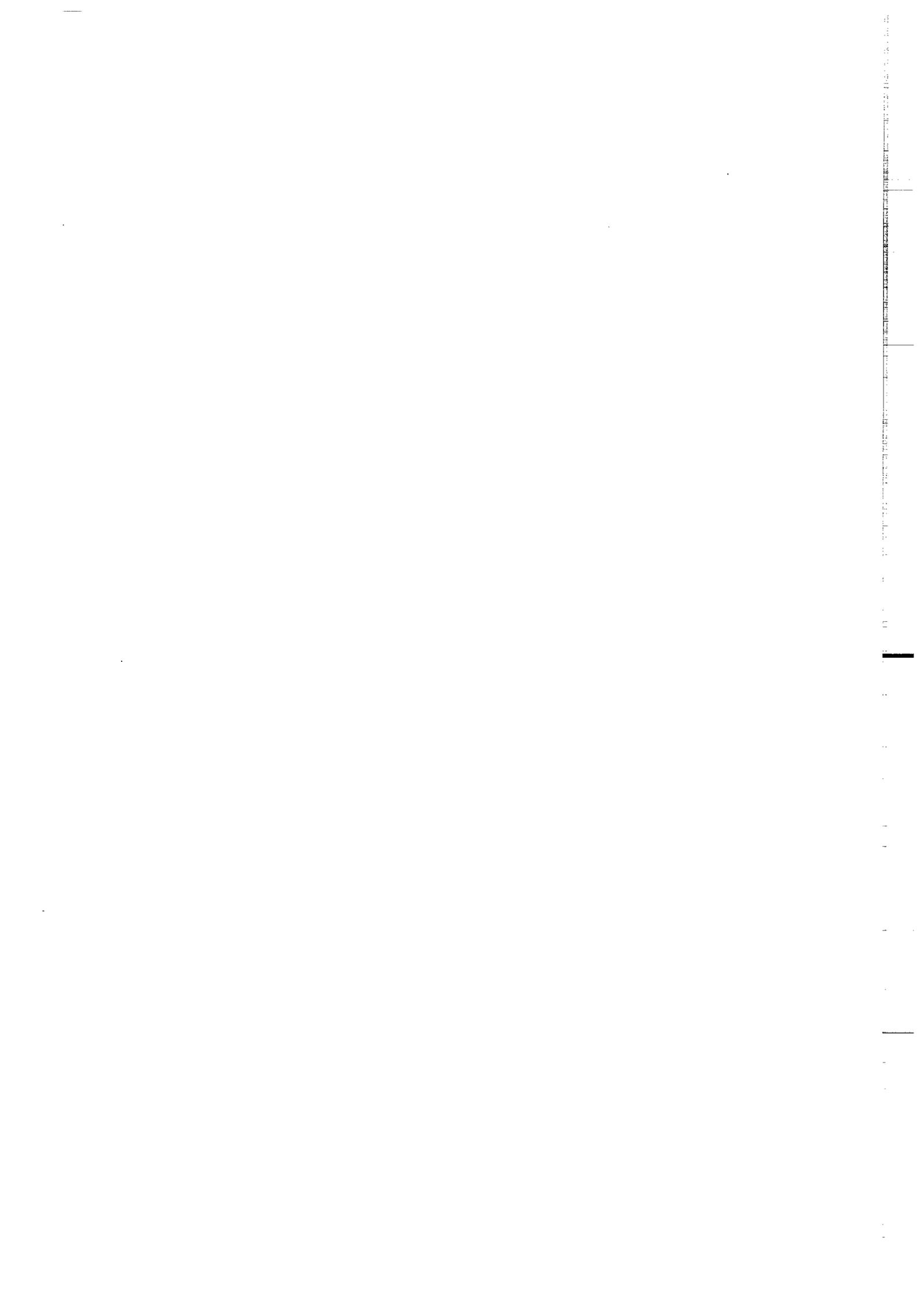
### Conclusion

L'application à la Provence de la méthode des coupes équilibrées a permis de soulever un certain nombre de problèmes relatifs d'une part aux documents disponibles qui se sont avérés insuffisants même dans une région très étudiée ; les données chiffrées de pendages et d'épaisseur des couches restant toujours insuffisantes sur les cartes et dans les travaux régionaux ; et d'autre part aux particularités géologiques locales : structures

polyphasées non cylindriques, importance des formations carbonatées. Des solutions partielles peuvent être proposées notamment la construction d'une carte rétrodéformée permettant de vérifier la compatibilité de coupes sériées entre elles lorsque les structures ne sont pas cylindriques. Mais les incertitudes qui subsistent, notamment le rôle de l'extension dans la partie haute des unités chevauchantes et le bilan des phénomènes de dissolution dans les calcaires doivent conduire à considérer avec prudence les chiffres obtenus pour les raccourcissements : les erreurs peuvent être supérieures à  $\pm 30\%$  même si les résultats d'ensemble sont cohérents pour une région donnée.

### REFERENCES

- 1 DAHLSTROM C.D.A. "Balanced cross sections", Canadian Journ. Earth Sci., vol. 6, p. 743-757, 15 fig., 1969.
- 2 GOGUEL J. "Traité de Tectonique", Masson éd., Paris, 383 p., 203 fig., 1952.
- 3 TEMPIER C. "Modèle nouveau de mise en place des structures provençales", Bull. Soc. géol. Fr., 8, t. 3, n° 3, p. 533-540, 4 fig., 1987.
- 4 MENARD G. "Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le Sud-Est de la France. Essai d'utilisation de données géophysiques", Thèse 3e cycle I.R.I.G.M., Grenoble, 178 p., 73 fig., 1979.
- 5 GOGUEL J. "Tectonique des chaînes subalpines entre la Bléone et la Durance", Bull. Serv. carte géol. France, t. 41, n° 202, 48 p., 26 fig., 2 cartes h.-t., 1939.



REFLEXIONS SUR LA CONSTRUCTION DE COUPES EQUILIBREES  
DANS LES ZONES EN RACCOURCISSEMENT

J. Déramond, P. Baby, G. Crouzet, M. Specht

Laboratoire de Géologie Structurale & Tectonophysique

Toulouse

La construction des coupes équilibrées est une façon rigoureuse de représenter les structures géologiques dans un plan généralement vertical. En fait, c'est surtout une manière efficace de faire le bilan des diverses données structurales (de surface, de forage, de sismiques) existant sur une région et d'envisager leur agencement. Grâce à de telles constructions, on peut montrer le manque ou la redondance d'informations, éventuellement de prévoir l'existence de structures particulières ou de faire des hypothèses sur leur géométrie. Il s'agit donc d'une vérification des données structurales. Avec un même nombre de données, il est parfois possible de construire plusieurs coupes, toutes étant géométriquement acceptables.

Les coupes sont contraintes par des données d'ordre géométrique ; les longueurs des diverses lignes (traces en coupe des divers plans) doivent être respectées ; les surfaces entre l'ensemble déformé et son équivalent initial doivent être également respectées ainsi que les relations angulaires (ainsi les angles entre les surfaces de failles et les directions de déplacement doivent obéir aux lois classiques de la rupture).

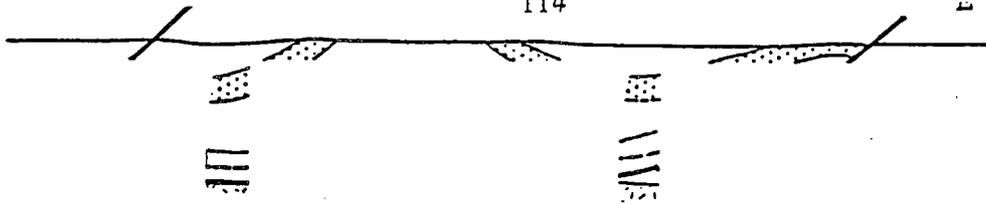
Dans des cas complexes, l'utilisation de données supplémentaires sont souvent nécessaires, ainsi le recours à des résultats d'études sédimentologiques peut faciliter l'élaboration de telles coupes.

Il n'existe pas de "recette" précise pour la construction de telles coupes équilibrées, il s'agit essentiellement de réflexions, de progressions par tâtonnement, de va-et-vient continus entre les données, l'état initial, la construction en cours. Les exemples qui sont proposés illustrent cette démarche complexe.

I - CONSTRUCTION D'UNE COUPE EQUILIBREE DANS UNE ZONE  
TECTONIQUEMENT PEU COMPLEXE.

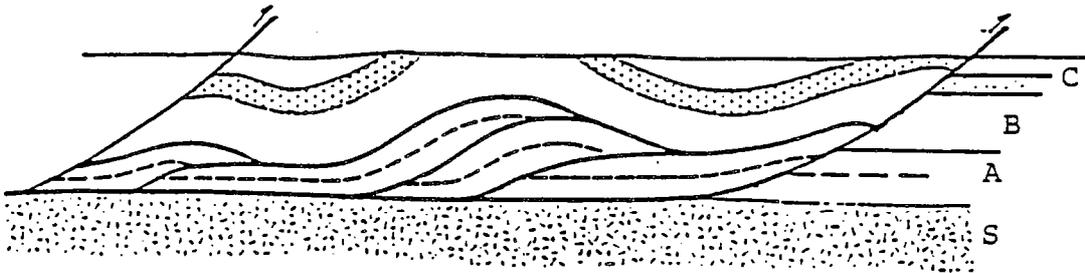
Cet exemple est adapté d'une coupe inédite reconstruite dans l'avant-pays andin, en Bolivie.

- Les données de forages et de surface (fig. 1a) montrent l'existence de deux chevauchements à pendage W (environ 40°). Entre ces deux



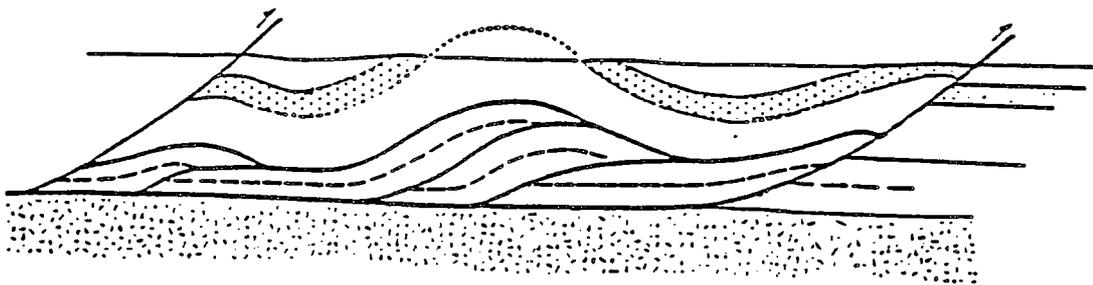
5 km

a



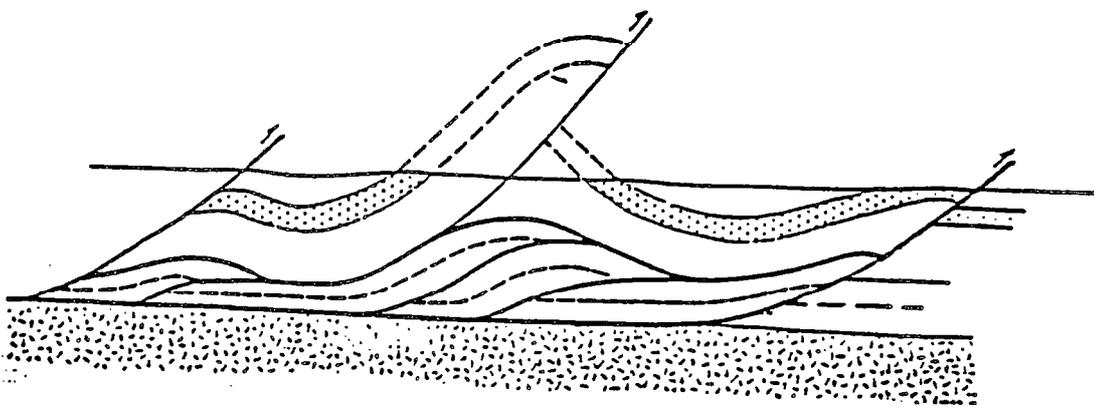
5 km

b



5 km

c



5 km

d

Fig.1.- Construction d'une coupe équilibrée

- a - Données
- b et c - Premier stade de construction
- d - Stade final.

Explications dans le texte.

chevauchements, on observe en surface un plissement des terrains affleurant par des plis de longueur d'onde plurikilométrique.

Deux forages montrent la limite supérieure du socle (S) situé à profondeur constante et apparemment horizontale, cela est confirmé par des données de sismique. La série stratigraphique est connue à la fois par des études de surface et par les forages représentés sur la coupe et réalisés également dans l'avant-pays non déformé.

- Le premier stade dans la construction de la coupe est de passer d'une structure horizontale en profondeur à une structure plissée en surface. Pour cela, on peut construire un duplex avec empilement antiformal ; les seules conditions sont la présence de deux niveaux de décollement, l'un à l'interface socle-couverture, l'autre au sommet de la couche A (fig.1b). Après cette construction, on peut compléter la partie manquante de la couche C en construisant un anticlinal érodé.
- A ce moment là, si la coupe est correctement construite, les lignes correspondantes aux différentes sections des plans de stratification doivent être de même longueur. Il apparaît clairement que ce n'est pas le cas dans la construction de la figure 1b et notamment la longueur de la section du niveau interne à la couche A est beaucoup plus longue que la longueur de la section des limites de la couche C.
- Une nouvelle construction doit être tentée. Il faut ajouter une structure qui allonge la section des limites de C. On peut proposer, comme sur la figure 1d, un nouveau chevauchement à pendage W en accord avec les modèles d'évolution des duplex proposés par Morley (1983). Une solution tout aussi valable consisterait à construire, à partir du toit de l'empilement d'écaillés, un chevauchement à plongement E qui fonctionnerait comme rétrochevauchement. Une telle éventualité a été aussi envisagée, dans ses modèles d'évolution, par Morley. Pour lever l'ambiguïté, liée à la présence d'un tel chevauchement, un retour aux données de terrain s'impose. Il devient nécessaire d'étudier de manière très précise la zone anticlinale centrale, pour essayer de retrouver les structures que nous avons reconstruites ou de voir s'il n'existe pas une zone encore plus complexe qui permettrait d'équilibrer les longueurs des différentes lignes.  
 Dans une telle coupe, un retour à l'état initial ne s'impose pas, car les structures impliquées sont relativement simples : la coupe est construite en comparant seulement deux longueurs.

## II - CONSTRUCTION D'UNE COUPE EQUILIBREE DANS UNE ZONE TECTONIQUEMENT COMPLEXE : LA ZONE NORD-PYRENEENNE ARIEGEOISE.

Le socle (ici du Paléozoïque) est impliqué dans la tectonique alpine en raccourcissement malgré la présence à l'interface socle-couverture d'un niveau de décollement constitué d'évaporites du Trias. La construction, proposée ici, consiste à retrouver l'état antérieur aux chevauchements, dernières structures ayant déformé de manière importante cette zone, tout en essayant de vérifier la validité de la coupe actuelle.

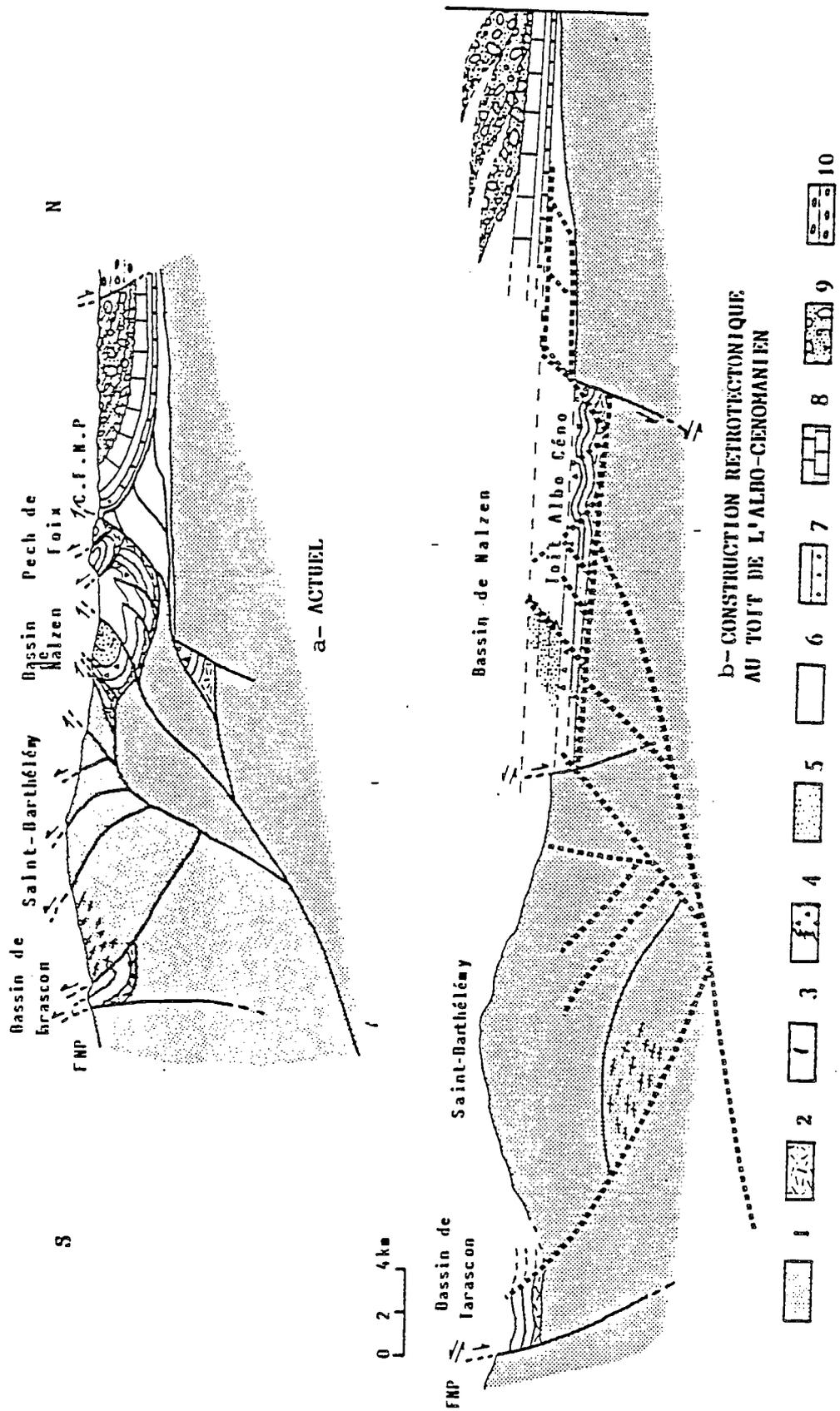


Fig.2.- Coupe équilibrée du versant nord des Pyrénées Centrales, à travers le bassin de Malzen.

1, Socle et Paléozoïque ; 2, Trias ; 3, Jurassique à Albien inférieur ; 4, Flysch albo-cénomannien ; 5, Flysch gréseux turono-cénomannien ; 5, Flysch gréseux turono-sénonien ; 6, Flysch marnes du Sénonien supérieur ; 7, Maestrichtien supérieur (grès et marnes rouges) ; 8, Calcaires paléocènes et nummulitiques ; 9, Foudingues de Palassou ; 10, Nolasses.

L'évolution stratigraphique de la zone prise en exemple montre qu'il existe ici de nombreuses variations d'épaisseur des couches surtout au Crétacé inférieur et que les chevauchements ont commencé à fonctionner après le dépôt de l'Albo-Cénomaniens. La construction se fera donc en prenant comme référence, le toit de l'Albo-cénomaniens qui peut être considéré comme grossièrement horizontal. A partir de cette ligne, la base de l'Albo-Cénomaniens, située au-dessous, n'est pas à une profondeur constante par suite des grandes variations d'épaisseur de cette série. En outre ces variations d'épaisseur s'accompagnent de variations de faciès (présence de brèches) révélatrices d'une tectonique synsédimentaire. Les caractéristiques sédimentologiques de ces brèches montrent qu'elles sont dues à un mouvement le long de failles extensives et/ou décrochantes. Les considérations sédimentologiques nous amènent donc à proposer un état initial, sur lequel on essaye de replacer les chevauchements connus actuellement. Après plusieurs essais, et aussi avec l'aide de données sismiques (industrielles ou profondes) on arrive aux deux coupes, actuelle et rétrotectonique, au toit de l'Albo-Cénomaniens, présentées à la figure 2a et 2b, obtenues par tâtonnement en comparant l'état actuel, l'état initial, en tenant compte en plus des données sédimentologiques. Le résultat final est la mise en évidence d'un grand chevauchement prolongeant en profondeur et vers le Sud le chevauchement frontal nord-pyrénéen évoluant en duplex de socle et recoupant une partie du bassin albo-cénomaniens qu'il transporte vers le Nord. Des structures antérieures (talus de failles normales) sont conservés au mur de ce grand chevauchement et se situent actuellement en profondeur recouvertes par les formations paléozoïques.

En conclusion à ces deux exemples, on peut dire que la construction des coupes équilibrées, méthode puissante de vérification de la validité des coupes structurales, nécessite un grand nombre de données. Elles montrent souvent les lacunes d'observation mais le géologue structural est tenté de donner malgré tout une solution, probablement valable mais certainement pas unique. Les détracteurs de cette méthode ont alors beau jeu, au vu d'informations plus récentes de critiquer ces constructions. Il faut cependant remarquer qu'une coupe équilibrée est le début d'une démarche rigoureuse dans une construction, la coupe géologique, qui ne reposait le plus souvent que sur des interprétations intuitives ou conjecturales.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- BABY P. et al. (1987).- Role des paléotectures albo-cénomaniennes dans la géométrie des chevauchements frontaux nord-pyrénéens. C.R.Ac.Sc (à paraître).
- DAHLSTROM G.D.A. (1970).- Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. Bull.Canad.Petrol.Geol., vol.18, n°3, p.113-125.
- ELLIOTT (1983).- The Construction of balanced cross-sections. Journ.Struct.geol., 5, n° 2, p.101.
- GRAHAM R., HOSSACK J., DERAMOND J., SOULLA J.C. (1987).- Géométrie les chevauchements. Bull.Soc.géol.Fr., (8), t.III, n° 1, p.169-181.

- MUGNIER J.L. (1984).- Déplacements et déformations dans l'avant-pays d'une chaîne de collision. Méthode d'étude et modélisation. Exemple du Jura. Thèse Docteur-Ingénieur, Grenoble, 163 p.
- MORLEY C. (1986).- A Classification of thrust fronts. A.A.P.G., 70, n° 1, p.12-25.
- SUPPE J. (1983).- Geometry and kinematic of fault bend folding. Am.J.Sc., 283, p.684-721.

## ETUDE DES TECHNIQUES DE RESTITUTION DE COUPES GEOLOGIQUES

## A PARTIR DE MODELES EXPERIMENTAUX

S. TRIBOULET  
SNEA(P)  
26 rue des Lilas  
64018 Pau CEDEX

J.F. BALLARD  
Université de Rennes 1  
Laboratoire de Géologie Structurale  
Campus de Beaulieu  
Avenue du Général Leclerc  
35042 RENNES CEDEX

## INTRODUCTION :

La restitution de coupes géologiques dans l'état antérieur à un épisode de déformation intervient dans le processus d'équilibrage de coupes et permet d'obtenir des coupes palinspastiques. Cette technique repose sur le principe de conservation de la matière, au cours de la déformation, dans le plan de coupe, celle-ci étant parallèle à la direction de raccourcissement. Concrètement, la restitution consiste en un dépliage des structures par remise à l'horizontale du toit des séries déformées, les relations angulaires entre les formations étant conservées ainsi que les longueurs de leur toits et bases, ou que leur surface (G. Ménard, J.L. Mugnier, ce volume). Le dépliage se fait progressivement à partir de l'avant-pays non déformé vers l'intérieur de la chaîne.

Une coupe est considérée comme équilibrée lorsque la coupe restituée ne présente ni déficit ni excès de matière, c'est-à-dire lorsqu'elle apparaît géométriquement cohérente. Le but de cette note est de montrer que certaines incohérences géométriques ne résultent pas d'un bilan de matière déséquilibré, mais du processus de restitution lui-même.

On utilise pour cela des modèles expérimentaux de systèmes chevauchants, réalisés par J.F. Ballard. Ils consistent en couches planes et horizontales de sable sec et de microbille de verre, disposées dans une boîte dont l'une des parois verticales est mobile ; celle-ci est poussée par un piston soumettant ainsi les matériaux à une compression uniaxiale horizontale. Toutes les structures se forment perpendiculairement à la compression. Il n'y a donc globalement pas de gain ou de perte de matière dans la direction de la compression entre l'état initial et l'état déformé. Par conséquent, une coupe transversale par rapport aux structures est une coupe équilibrée, dont on connaît, en outre,

l'état initial.

Le sable sec, dont l'angle de frottement interne est de  $30^\circ$  peut être assimilé à une roche compétente tandis que la microbille de verre, dont l'angle de frottement interne est d'environ  $20^\circ$  peut représenter une roche relativement incompétente. Elle est utilisée comme niveau de décollement potentiel (J.F. Ballard et al.).

Les figures 1 et 3 représentent les coupes transversales par rapport aux structures à travers les modèles expérimentaux 1 et 2. Les figures 2 et 4 sont le résultat des différentes restitutions. Elles sont à la même échelle que les figures 1 et 3. Les failles sont numérotées dans l'ordre d'apparition chronologique : les failles les plus loin du bord mobile sont les dernières apparues, la séquence d'apparition est donc conforme.

#### Remarques préliminaires :

- Certains niveaux du sable ont été colorés de façon à repérer la déformation ; cette coloration n'induit pas de variation du comportement mécanique du sable.

- Pour les deux modèles, la zone proche de la paroi mobile a subi une déformation intense ; cette zone a été laissée en blanc (fig.1 et 3) et n'a pas été prise en compte dans la restitution. On ne pourra donc pas comparer les longueurs ou la surface totale restituées avec les longueurs ou la surface totale initiales.

- Le niveau de sable tout-à-fait supérieur a subi une érosion gravitaire au cours de la déformation : le sable superficiel proche de la plaque mobile a glissé vers la plaque fixe et s'est accumulé en synclinaux sous les failles inverses. Ce niveau, laissé en blanc sur les figures 1 et 3 n'a pas été restitué.

- La couche de sable basale de chaque modèle n'a pas été restituée faute de marqueur permettant de localiser les failles à la base du modèle. Pour la même raison, les traces de failles dans cette couche basale ne sont pas représentées sur les figures.

#### I- MODELE 1 :

##### I-1 Description du modèle :

Avant déformation, le modèle est constitué, de bas en haut, de :

- 10 mm de sable sec ;
- environ 5 mm de microbille de verre ;
- 6 mm de sable sec.

Le raccourcissement horizontal appliqué au modèle est de 50% (fig.1).

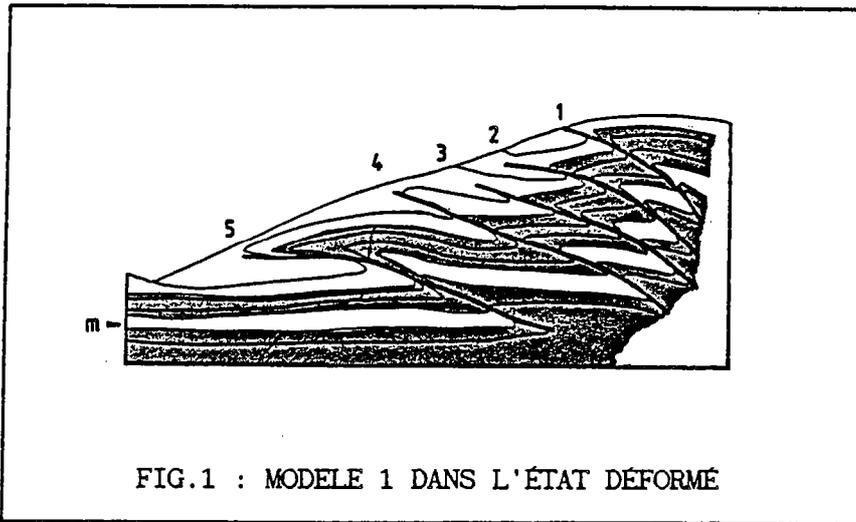


FIG.1 : MODELE 1 DANS L'ÉTAT DÉFORMÉ

## I-2 Restitution à l'état initial :

### I-2-1 Restitution par mesure des longueurs :

Cette technique repose sur l'hypothèse de conservation des longueurs des couches au cours de la déformation. Cela revient à supposer qu'elles ne sont pas le siège de déformations internes et que, par conséquent, les épaisseurs ne varient pas entre l'état initial et l'état déformé.

Les épaisseurs utilisées pour la restitution sont les épaisseurs mesurées sur le modèle déformé (fig.1) à gauche de la faille 5 et à droite de la faille 1.

Les longueurs des limites supérieures ou inférieures des différentes couches de composition homogène et des niveaux repères (niveaux colorés) sont mesurées entre l'extrémité non déformée du modèle et la faille 1, puis entre la faille 1 et la faille 2, etc... Les segments mesurés sont ensuite reportés bout-à-bout, à l'horizontale.

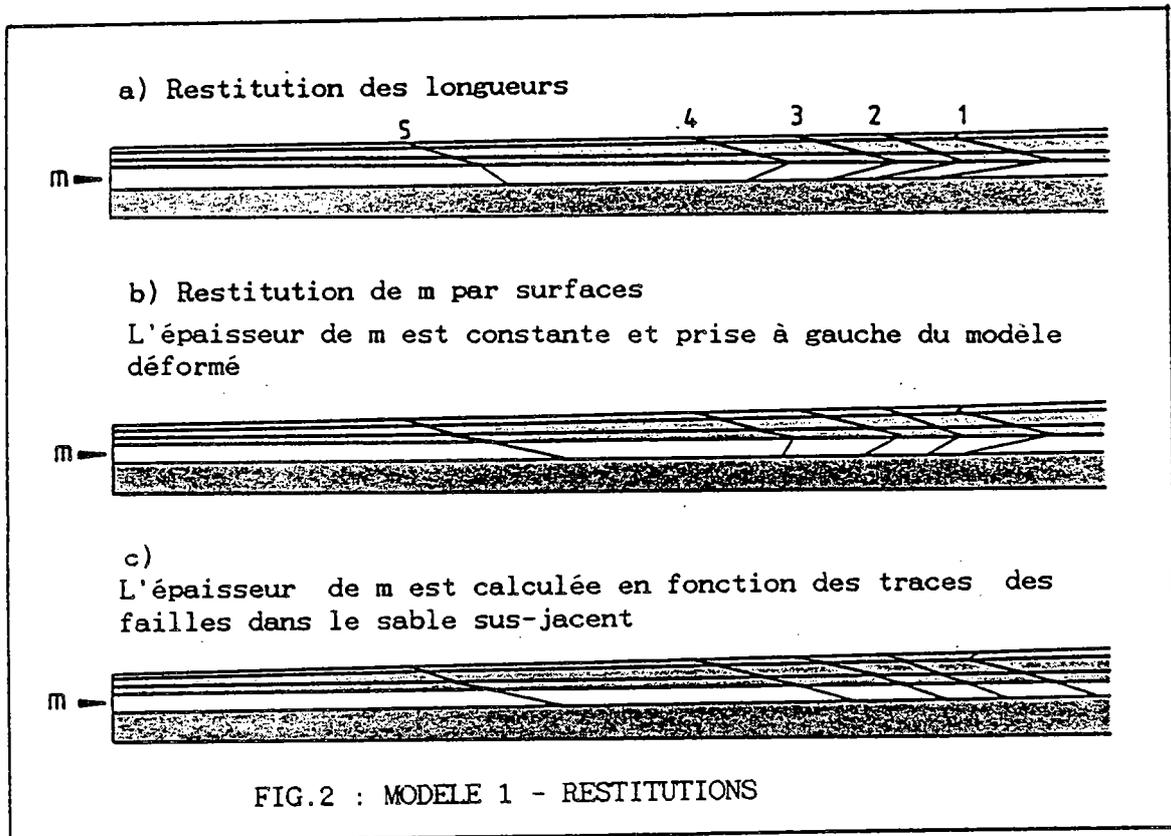
**RESULTATS** (fig. 2a) : Les traces de faille sont rectilignes dans le sable et font avec l'horizontale des angles de 25 à 32°. Cette restitution est donc compatible avec l'angle de frottement interne du sable.

**Remarque** : Les différents niveaux colorés du sable ont été dépliés un par un, bien qu'il ne s'agisse que de niveaux repères mécaniquement identiques. Dans ces niveaux, des traces de faille non rectilignes après restitution reflèteraient la présence d'une déformation interne, et non de mouvement banc-à-banc.

Dans la microbille (m), les traces de faille obtenues sont aberrantes. Ceci témoigne d'une déformation interne importante ; l'hypothèse de conservation des longueurs n'est donc pas vérifiée dans ce niveau.

I-2-2 Restitutions des surfaces pour le niveau de microbille :

a)- On suppose que l'épaisseur de la couche de microbille dans l'état initial est l'épaisseur moyenne de celle-ci dans la partie non déformée du modèle (entre le bord fixe et la faille 5), soit 5 mm. La longueur des segments de la base de la microbille est alors calculée à partir de cette épaisseur moyenne, des longueurs mesurées au toit de la microbille et des surfaces de microbille mesurées entre chaque faille sur le modèle déformé (fig.2b). On obtient de nouveau des traces de faille aberrantes, ce qui signifie que l'épaisseur de microbille n'était pas absolument constante au moment de l'apparition des failles.



b)- On suppose que les traces de faille sont rectilignes lorsqu'elles apparaissent. Connaissant d'une part l'angle entre les traces et l'horizontale, d'autre part les surfaces de microbille entre chaque faille, l'épaisseur de la microbille peut être calculée entre chaque faille (fig.2c).

Les épaisseurs calculées varient entre 4 et 5 mm. On obtient ainsi une coupe restituée de l'état initial pour laquelle les longueurs et les surfaces de la microbille sont conservées.

On remarquera l'influence de l'erreur (20%) commise dans l'estimation de l'épaisseur.

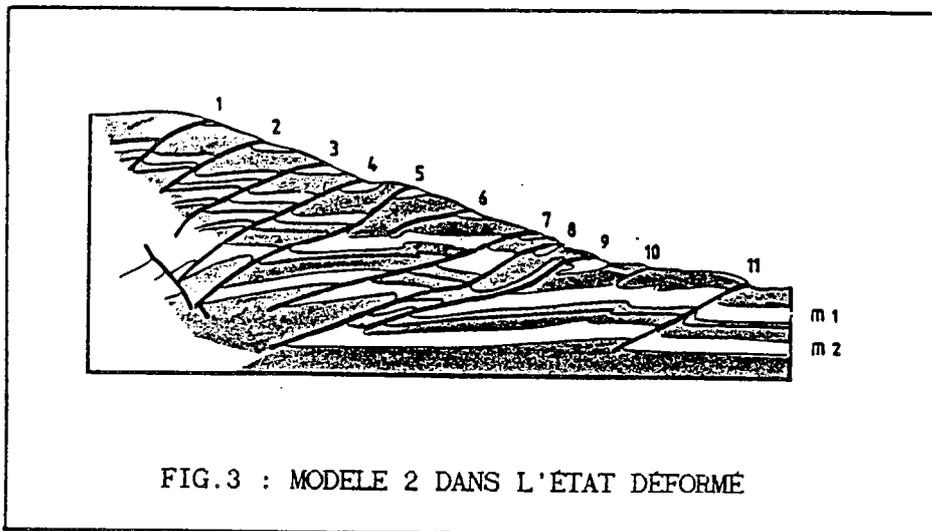
## II- MODELE 2 :

### II-1 Description du modèle :

Le sable et la microbille sont disposés comme suit :

- 7 mm de sable sec ;
- environ 5 mm de microbille de verre (m2) ;
- 5 mm de sable sec ;
- environ 5 mm de microbille (m1) ;
- 6 mm de sable sec.

Le raccourcissement appliqué au modèle est de 50% (fig.3).



### II-2 Restitution à l'état initial :

#### II-2-1 Restitution par mesures des longueurs :

Le procédé est le même que pour le modèle 1.

**RESULTATS (fig.4a)** : Dans la couche supérieure de sable, les failles font avec l'horizontale des angles compris entre 25 et 30°. La restitution par longueurs est donc plausible pour ce niveau. Les failles 7 et 8 sont plus faiblement pentées (respectivement 20 et 15°), ce qui traduit la présence de déformation interne entre les failles 6 et 9, qui, elles, ont des pendages "normaux".

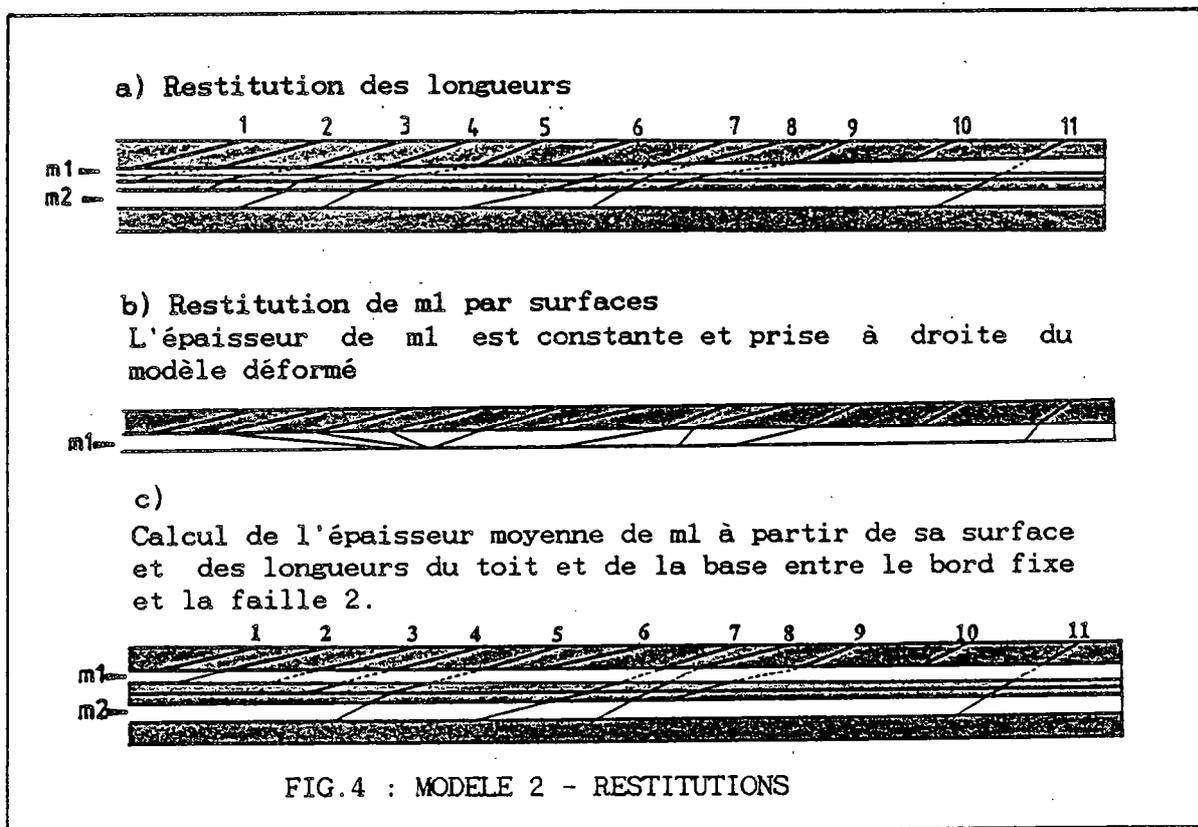
Le pendage des failles est assez faible dans la microbille m1. Ceci pourrait être interprété comme un témoignage de décollement à l'intérieur de ce niveau. Il est cependant évident que la surface de microbille n'est pas conservée par cette restitution, en particulier entre les failles 7 et 9.

II-2-2 Restitutions par mesures des surfaces de la microbille :

a)- On suppose que l'épaisseur de la microbille dans l'état initial est l'épaisseur de celle-ci entre le bord fixe et la faille 11 dans l'état déformé, soit 5 mm. On calcule la longueur de la base de la microbille de la même façon qu'au §I-2-2-a. Les traces de failles obtenues sont aberrantes (fig.4b). L'estimation de l'épaisseur n'est donc pas correcte.

b)- La microbille m1 étant comprise entre deux couches de sable c'est-à-dire deux niveaux à comportement cassant, on considère que les longueurs mesurées à son toit et à sa base sont les longueurs initiales. A partir de ces longueurs totales (mesurées entre le bord fixe et la faille 2) et de la surface totale de microbille mesurée entre le bord fixe de droite et la faille 1, on calcule l'épaisseur moyenne de microbille : 4,5 mm. On obtient ainsi une coupe restituée de l'état initial pour laquelle les longueurs et les surfaces de m1 sont conservées (fig.4c). On remarquera qu'à l'exception des failles 8 et 9, les traces de failles ainsi obtenues sont pratiquement rectilignes.

Là encore, l'influence de l'erreur (10%) commise dans l'estimation de l'épaisseur est notable.



### III- CONCLUSIONS :

- L'estimation de l'épaisseur initiale d'une série présentant de la déformation interne a une grande influence sur la coupe restituée. Pour de telles séries, il paraît préférable de faire appel, pour la restitution, à des hypothèses moins sensibles aux erreurs, concernant par exemple les traces de faille lors de leur initiation, ou les longueurs des formations compétentes sus ou sous-jacentes.

Lorsque la série incompétente est comprise entre deux formations compétentes (niveau ml du modèle 2), on calcule son épaisseur initiale à partir de sa surface et des longueurs de sa base et de son toit.

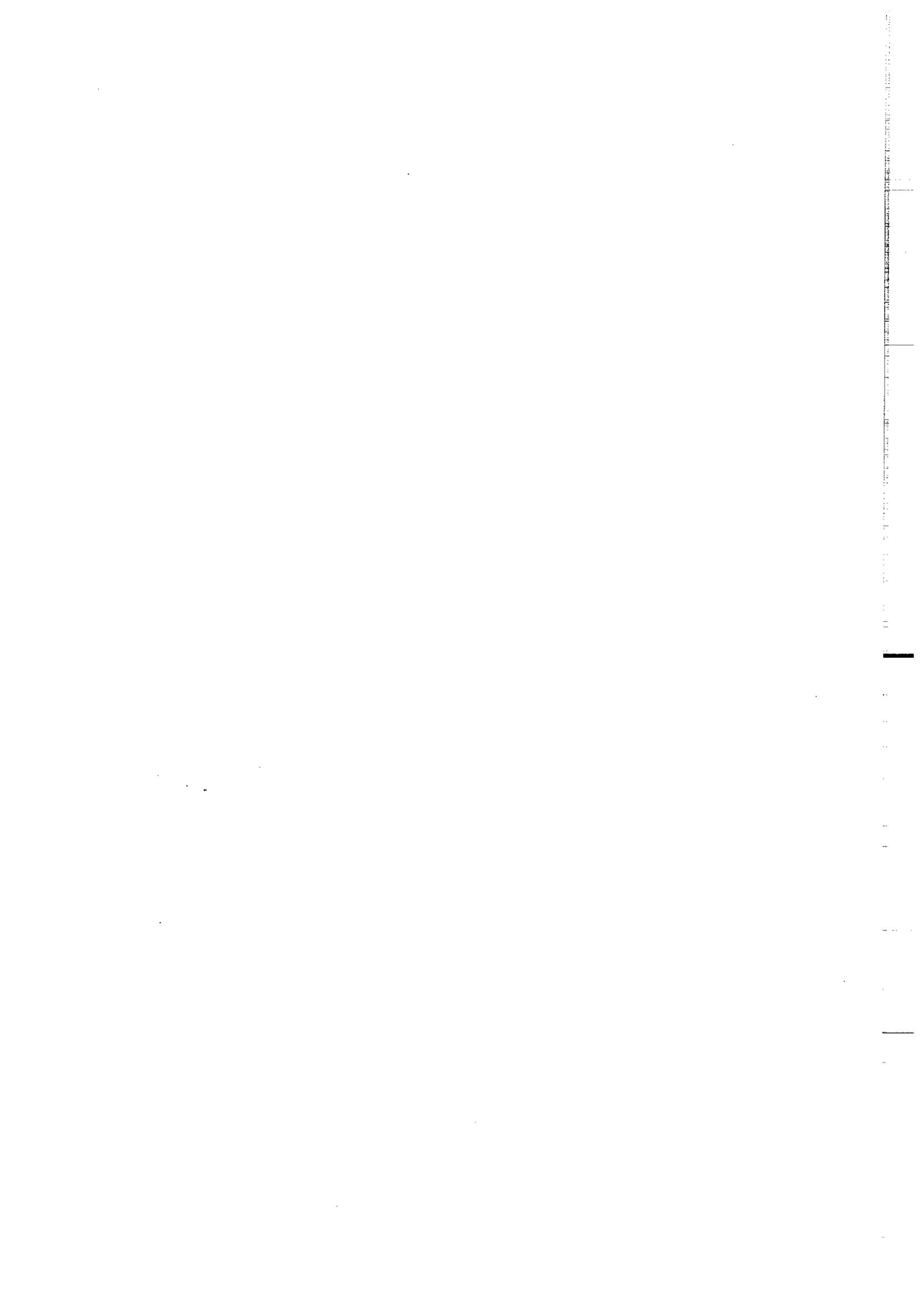
Lorsque la série incompétente est surmontée par une formation compétente (niveau m du modèle 1), on calcule son épaisseur initiale en supposant que les traces de faille sont rectilignes au début de la déformation. Ce procédé n'est pas applicable lorsque la déformation interne est antérieure à l'apparition des failles. Il est fréquent que l'on doive également postuler le pendage initial des failles inverses ou des chevauchements. Pour les séries compétentes, celui-ci est généralement compris entre 30 et 60° (Sibson, 1985). Bien qu'importante, cette marge d'incertitude a moins d'influence sur la coupe restituée qu'une épaisseur initiale mal estimée à 10% près.

- Une coupe palinspastique présentant des géométries aberrantes peut être la conséquence non d'une coupe mal équilibrée, mais d'une technique de restitution non appropriée (fig.2a,2b,4a,4b).

### Références bibliographiques :

J.F. Ballard et al. : in "Modélisation expérimentale", Ateliers du G.E.T., 7 Avril 1987, Mém. et Doc. du CAESS, Rennes.

Sibson : "A note on fault reactivation", Journal of Structural Geology, vol.7, N°6, p.751-754, 1985.



## COUPES EQUILIBREES CRUSTALES

par Gilles MENARD

L.G.I.T., Observatoire de l'Université de Grenoble,  
I.R.I.G.M., BP 68 St Martin d'Hères

Compte tenu de l'échelle du problème, il est clair que le poids relatif des données de surface par rapport aux données de subsurface est moindre dans ce cas que pour les coupes en séries sédimentaires. L'utilisation et l'interprétation des données géophysiques (principalement sismiques) deviennent ici une étape incontournable de la démarche de construction d'une coupe équilibrée crustale. Il en découle qu'il est nécessaire pour quiconque veut construire une coupe à cette échelle de travailler soit lui-même sur les données géophysiques soit en collaboration avec les géophysiciens afin de maintenir l'interactivité entre interprétation sismique et interprétation tectonique.

## 1 - Contraintes sur les paramètres utilisés.

## A - La géométrie crustale actuelle

La croûte est limitée vers le haut par le toit du socle et vers le bas par la discontinuité de Mohorovicic (ou moho). La géométrie du toit du socle, lorsque celui-ci est à faible profondeur, est déduite de la géologie de surface. La définition des grandes unités de socle et de leurs relations doit être établie à une échelle qui permet de lisser les déformations de faible longueur d'onde. La géométrie du toit du socle, lorsque celui-ci est en profondeur, peut être connue par la sismologie et les sondages. La prise en compte des ensembles sédimentaires ne se justifie que dans la mesure où leur déformation peut être reliée à celle d'ensembles de socle clairement définis. La géométrie de la base de la croûte (moho) peut être connue grâce à l'utilisation conjointe de la sismologie et de la gravimétrie, cette dernière permettant d'interpoler les renseignements plus précis mais discontinus fournis par la sismologie.

La connaissance de ces deux marqueurs (toit du socle et moho) est absolument nécessaire pour tenir les raisonnements sur les surfaces transférées (estimation du raccourcissement ou de l'extension de la croûte). Elle est toutefois en général insuffisante pour choisir le mécanisme par lequel est absorbé le raccourcissement ou l'extension (Fig. 1 et 2).

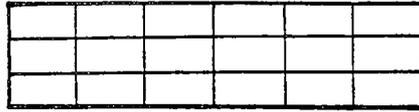
Dans certains cas favorables on peut utiliser également comme marqueur supplémentaire la limite croûte supérieure - croûte inférieure obtenue à partir des données sismologiques. La connaissance de ce marqueur (mise en évidence d'éventuels redoublements, variation d'épaisseur de la croûte inférieure) est par contre souvent une contrainte assez forte sur les modèles, qu'ils soient en compression ou en extension.

Il semble difficilement envisageable d'obtenir des renseignements beaucoup plus précis sur la structure de la croûte par les méthodes sismologiques de types "grands profils" : toutefois les profils de types "ECORS" (réflexion verticale) laissent l'espoir de trouver des marqueurs supplémentaires au sein de la croûte (surfaces de cisaillement en particulier dans la croûte supérieure).

## B - Le raccourcissement (ou l'extension)

Deux problèmes se posent en ce qui concerne le raccourcissement (ou l'extension) : tout d'abord celui du mécanisme par lequel il (ou elle) sont absorbés, ensuite celui de leur quantification.

ETAT INITIAL

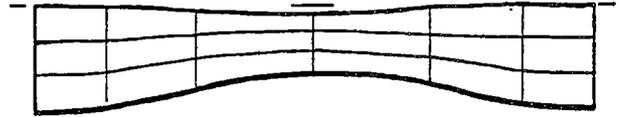
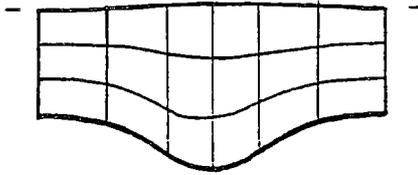


EPAISSISSEMENT

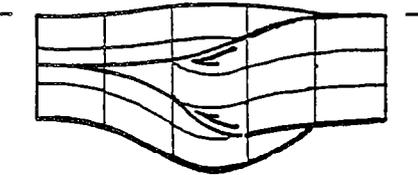
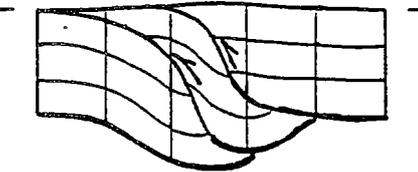
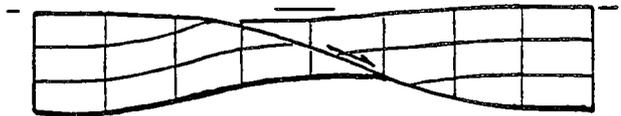
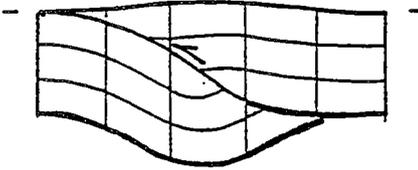
AMINCISSEMENT

SANS CHANGEMENT DE VOLUME

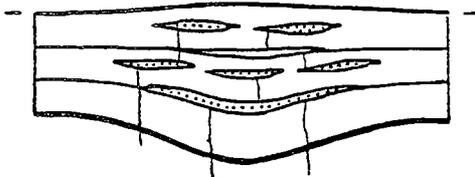
DEFORMATION INTERNE D'UN MILIEU CONTINU



DEPLACEMENTS SUR DES DISCONTINUITES



AVEC CHANGEMENT DE VOLUME



APPORTS MAGMATIQUES



EROSION SUBCRUSTALE

FIGURE 1 : MECANISMES DE DEFORMATION CRUSTALE

## a) Les mécanismes

Les modèles de déformation crustale, que ce soit en compression ou en extension peuvent se ranger en deux grandes catégories (Fig. 1). La première regroupe les modèles qui considèrent la croûte comme un milieu continu qui se déforme de manière homogène ou inhomogène. La seconde regroupe les modèles qui considèrent la croûte comme un milieu dans lequel le raccourcissement (ou l'extension) sont absorbés principalement par des déplacements importants le long de discontinuités, ces discontinuités pouvant être sans épaisseur (faille) ou plus ou moins larges (bandes de cisaillement ductiles). La prédominance des déplacements n'exclut pas une contribution plus ou moins importante de la déformation interne au raccourcissement.

Exemples : pour la compression, citons le cas des Pyrénées pour lesquelles les différentes approches ci-dessus sont envisagées (Fig. 2).

pour l'extension, citons le modèle de Mac Kenzie (1978) qui relie l'étirement à l'amincissement et à la subsidence ainsi que le modèle de Wernicke (1981) dans lequel l'étirement est absorbé par glissement sur un plan peu penté.

Tous les modèles précédemment évoqués ont en commun de raisonner à volume de croûte constant, ce qui autorise un équilibrage des structures.

Il existe toutefois des modèles qui introduisent des changements de volume au cours de l'évolution des structures. Pour les chaînes de montagne, citons le cas des chaînes liminaires (Andes) pour lesquelles d'importants volumes de roches magmatiques (sous forme de batholites ou de volcans) d'origine en partie infracrustale viennent s'ajouter à la croûte : il est clair qu'il est particulièrement délicat d'estimer ici le volume qui s'ajoute.

Pour les structures en extension, citons le cas de certains rifts comme celui de Suez (Moretti, 1987) ou de certaines marges comme celle de Nord Biscay (Avedik et al., 1981 ; Chenet et al., 1982) pour lesquels il est envisagé un amincissement se rajoutant à celui lié à l'extension. Cet amincissement pourrait se faire par l'incorporation de la partie basale de la croûte au manteau supérieur chaud associé à ces structures.

Dans ces modèles où le volume de croûte varie, il est difficilement envisageable de pouvoir contraindre suffisamment les différents paramètres intervenant dans l'équilibre.

Comme nous l'avons dit précédemment il est en général très difficile de trancher entre ces différents modèles avec la seule connaissance de la géométrie actuelle de la croûte.

Par contre la prise en compte de l'évolution cinématique et de ses implications, notamment en terme de migration de la déformation au cours du temps, est susceptible de permettre d'éliminer certains modèles. Par exemple dans le modèle de raccourcissement par aplatissement horizontal (Fig. 4-1) la zone de raccourcissement maximum et donc de surrection maximale doit migrer vers l'extérieur de la chaîne. Par contre dans le modèle de raccourcissement par écaillage crustal, l'existence de rampes éventuelles doit s'accompagner d'une migration du maximum de surrection (qui correspond à la zone située au-dessus de la rampe) vers l'intérieur de la chaîne (Fig. 4-1) Dans ce cas une bonne connaissance de l'histoire de la surrection d'une région donnée doit pouvoir permettre d'éliminer certains modèles.

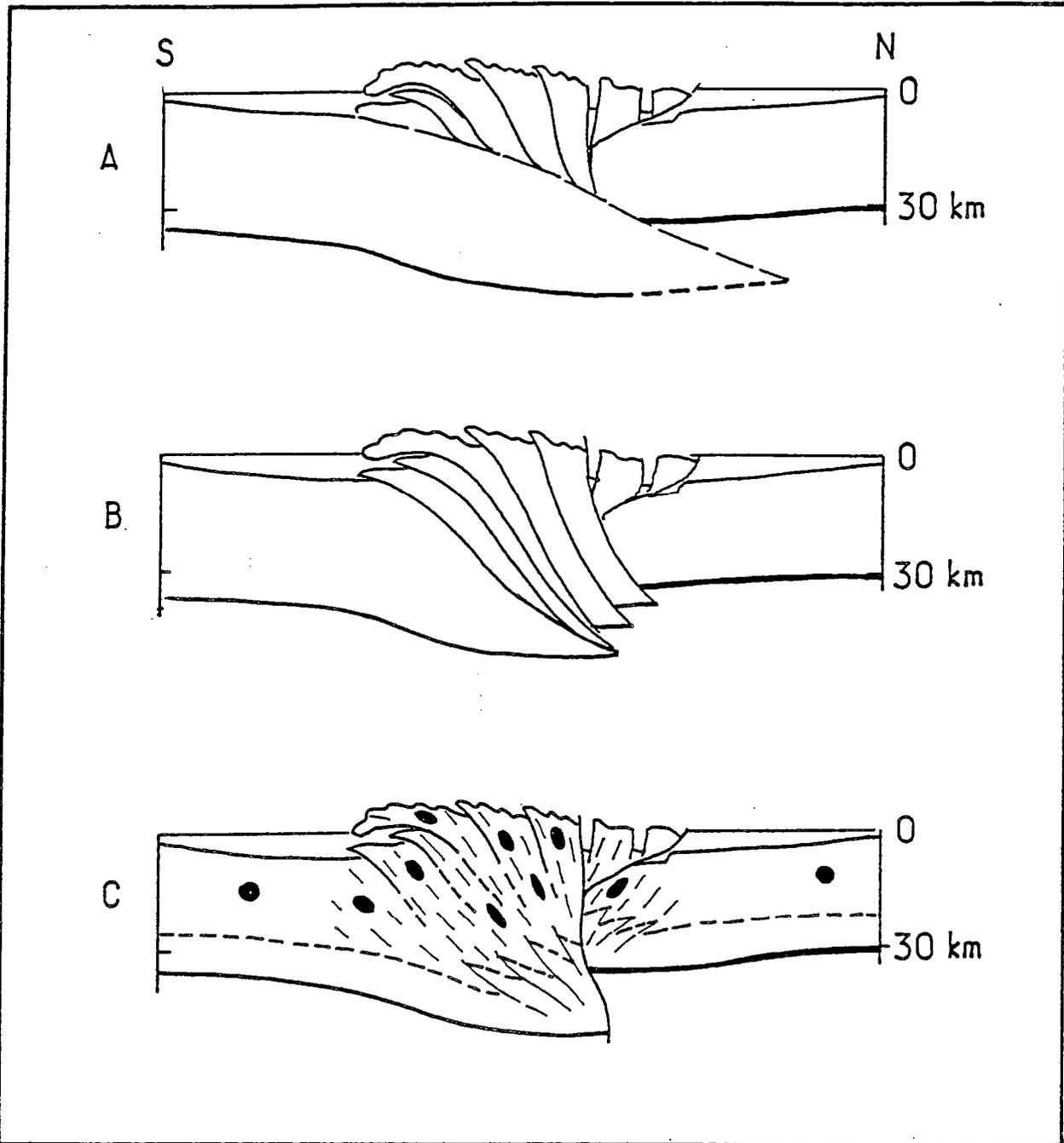


FIGURE 2 : HYPOTHESES STRUCTURALES POUR LA CHAINE  
DES PYRENEES

A-MODELE AVEC CHEVAUCHEMENT PEU PENTE

(modifié d'après Williams et Fisher 1984)

B-MODELE AVEC CHEVAUCHEMENTS FORTEMENT PENTES

(modifié d'après Déramond et al. 1985)

C-MODELE AVEC DEFORMATION INTERNE INHOMOGENE

(d'après Séguret et Daignière 1986)

Tous ces modèles sont compatibles avec la géométrie actuelle  
du moho.

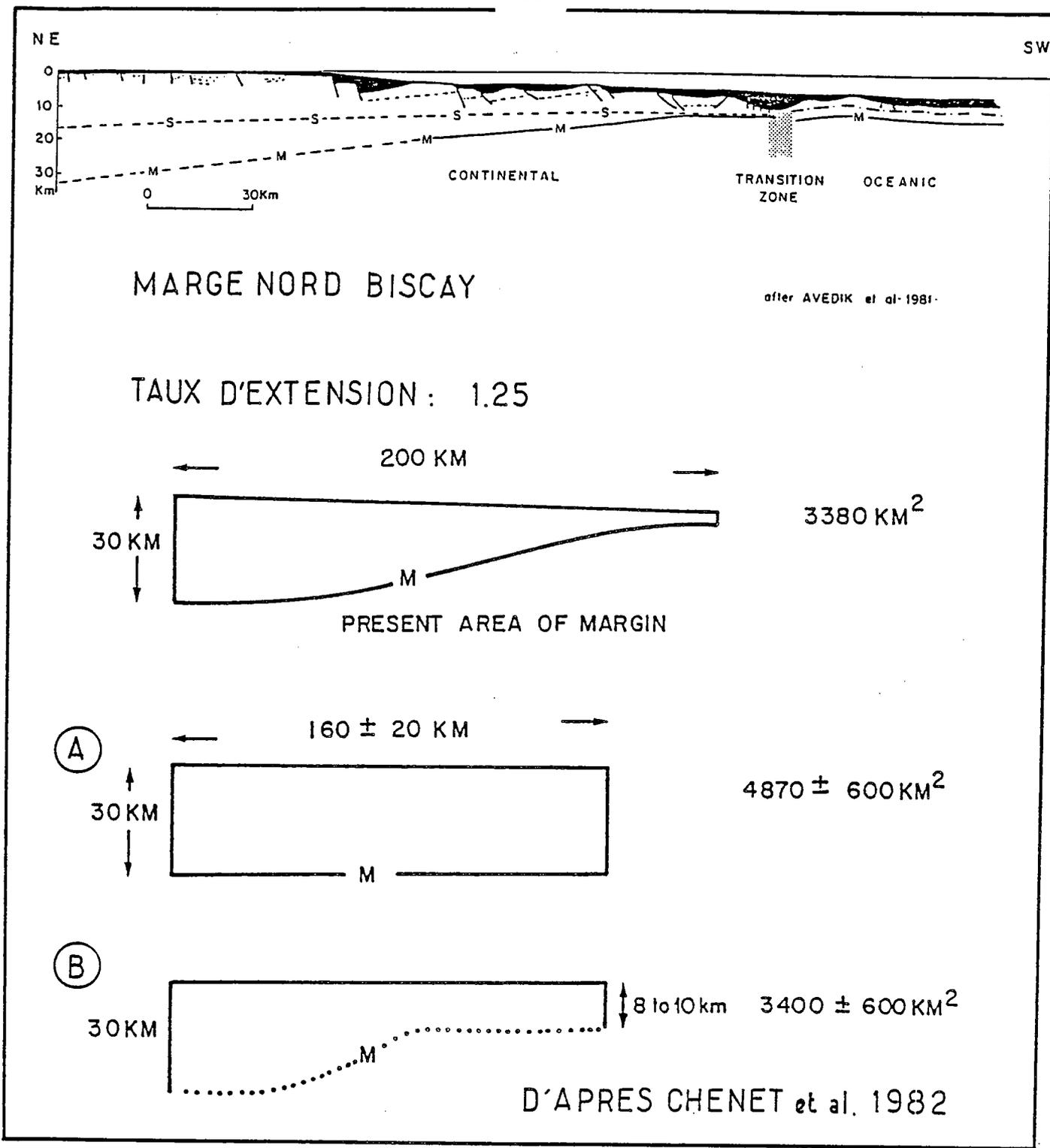


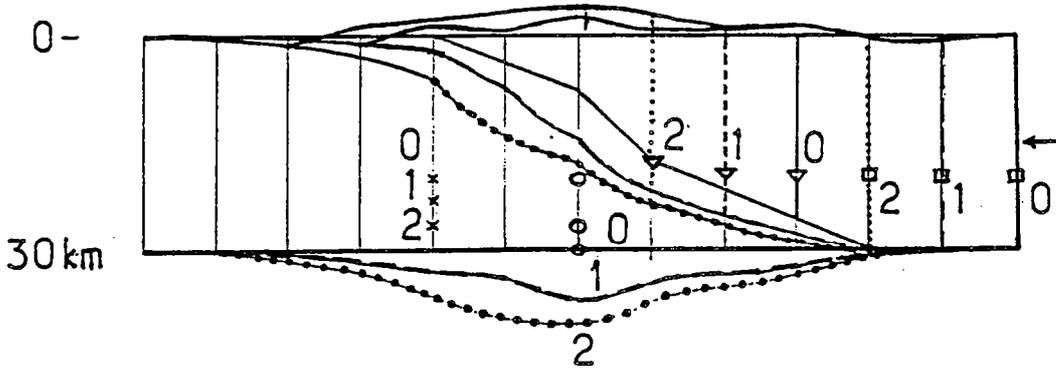
FIGURE 3 : PROBLEME DE LA CONSERVATION DE LA CROUTE LORS DE L'EXTENSION.

- A: HYPOTHESE D'UNE CROUTE INITIALE D'EPaisseur CONSTANTE  
IL MANQUE DE LA CROUTE
- B: HYPOTHESE D'UNE CROUTE INITIALE DEJA AMINCIE IL NE  
MANQUE PAS DE CROUTE.

MIGRATION DU MAXIMUM

SURRECTION

maximum de surrection entre 0 et 1      maximum de surrection entre 1 et 2



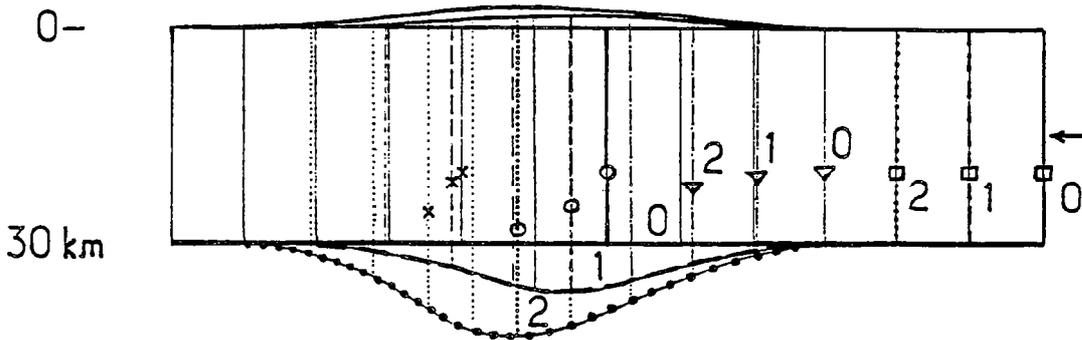
①

EPAISSISSEMENT PAR ECAILLAGE CRUSTAL

MIGRATION DU MAXIMUM

SURRECTION

maximum de surrection entre 1 et 2      maximum de surrection entre 0 et 1



②

EPAISSISSEMENT PAR APLATISSEMENT

0, 1, 2 = stades successifs de déformation

FIGURE 4: RELATION ENTRE MECANISME D'EPAISSISSEMENT ET MIGRATION DE LA SURRECTION

## b) L'estimation du raccourcissement (ou de l'extension)

Le raccourcissement global d'une chaîne ou l'extension crustale associée à un rift ou une marge peuvent être calculés par les raisonnements sur les surfaces transférées (voir chapitre antérieur). L'incertitude importante qui règne sur l'épaisseur initiale de la croûte n'autorise par cette méthode qu'une estimation de l'ordre de grandeur du raccourcissement (ou de l'extension).

Dans les régions où l'on peut faire l'hypothèse que le raccourcissement crustal (et l'épaississement qui lui est lié) se fait principalement par un mécanisme d'écaillage, l'estimation du raccourcissement associé à une surface de chevauchement particulière peut s'envisager de deux manières.

On peut connaître la flèche du chevauchement crustal lorsque les données sismiques permettent de suivre un des marqueurs comme le "moho" ou la limite croûte supérieure - croûte inférieure aussi bien dans le compartiment chevauchant que dans le compartiment chevauché.

L'autre manière consiste à passer par le raccourcissement induit dans la couverture par le chevauchement crustal. Ceci implique de pouvoir établir une relation entre le chevauchement crustal, son expression au niveau du socle et son prolongement dans la couverture. L'utilisation de coupes équilibrées au niveau des structures de couverture peut permettre de contraindre ainsi les coupes à l'échelle crustale.

La déformation interne associée au raccourcissement crustal peut théoriquement être prise en compte. Il faut alors s'imposer de conserver les surfaces et non plus les longueurs entre l'état avant déformation et l'état actuel. Toutefois la quasi-impossibilité d'obtenir des données susceptibles de contraindre ce paramètre en profondeur rend sa prise en compte très délicate dans la pratique.

## C - Les mouvements verticaux

Les mouvements verticaux qui accompagnent les déformations à l'échelle de la croûte sont particulièrement importants. Ils traduisent le maintien en équilibre isostatique des régions qui se déforment aussi bien en régime de compression que d'extension. Ils doivent être pris en compte dans les restitutions à des états antérieurs.

a) En compression, le raccourcissement s'accompagne d'un enfoncement de l'avant-pays (souvent bien décrit par un modèle simple de flexion lithosphérique) que l'on peut suivre grâce aux dépôts qui comblent la dépression au fur et à mesure qu'elle se crée (dépôts de bassins molassiques d'avant-pays). La connaissance de l'âge de ces dépôts permet en outre de dater les phénomènes tectoniques qui se déroulent dans la partie interne de la chaîne et qui sont la cause de la subsidence des bassins d'avant-pays.

La surrection qui accompagne le raccourcissement dans la partie interne de la chaîne peut être suivie par deux types de données.

- les datations radiochronologiques dans plusieurs cas donnent des âges de refroidissement de certains minéraux correspondant au moment où ces minéraux ont franchi certains isothermes. Citons parmi les méthodes les plus courantes

\* les datations par traces de fission sur apatite (120°C), zircon (240°C) et sphène (280°C).

\* les datations par K/Ar sur biotite (300°C) et muscovite (350°C)

\* les datations par Rb/Sr sur biotite (300°C) et muscovite (500°C)

- les mesures paléomagnétiques permettent de mettre en évidence les basculements associés au raccourcissement (la surrection est dans ce cas perçue en terme de surrection différentielle entre différents points). Ce type de mesures est réalisé dans différents contextes :

- \* sur des roches volcaniques post-tectoniques en filons ou en coulées (Lanza, 1977)
- \* sur des roches métamorphiques chauffées au-delà de la température de Curie de la magnétite (Heller, 1980)
- \* sur des roches métamorphiques réaimantées lors de la transformation pyrite pyrrhotite ( $\approx 300^{\circ}\text{C}$ ) (Rochette et Lamarche, 1987)

b) En extension la quantification de la subsidence nécessite de connaître l'épaisseur des sédiments déposés (et donc d'estimer la compaction) ainsi que la tranche d'eau sus-jacente.

#### D - L'état initial

Si dans le cas des coupes équilibrées en séries sédimentaires on peut souvent faire des hypothèses raisonnables sur la géométrie des séries avant les déformations en reconstituant le bassin initial ou en se référant à des domaines non déformés dans l'avant-pays, à l'échelle de la croûte, cette démarche n'est pas possible. Dans bien des cas les déformations affectent des domaines présentant initialement de fortes variations d'épaisseur : héritage de rifts intracontinentaux ou de marges passives par exemple. Dans ce cas la référence aux zones stables voisines n'est plus utilisable si ce n'est pour fixer une valeur maximale de l'épaisseur crustale avant déformation. On sera alors conduit à se référer plutôt aux structures actuelles équivalentes (rifts ou marges passives) en essayant de contraindre les épaisseurs crustales en prenant en compte l'épaisseur et la profondeur de dépôt des séries sédimentaires sus-jacentes.

Si les modèles auxquels on se réfère pour l'état initial sont importants pour contraindre la géométrie avant déformation, il le sont également pour contraindre la cinématique ultérieure, puisque des discontinuités acquises à ce stade sont susceptibles d'être réutilisées ultérieurement.

#### 2 - La construction des coupes

La construction des coupes à l'échelle crustale s'effectue selon le même principe que les coupes à l'échelle des séries sédimentaires, à savoir en dessinant simultanément l'état actuel et l'état restitué avant déformation en imposant la conservation des surfaces et/ou des longueurs à tous les éléments géométriques de la coupe entre les deux états.

Une difficulté pratique se rajoute toutefois au niveau du dessin de l'état restitué : c'est la prise en compte des mouvements verticaux qui nécessite souvent d'interpoler ou d'extrapoler à partir des quelques données dont on dispose pour contraindre ces mouvements. Le calage vertical de la structure restituée à l'état initial nécessite souvent de nombreux tâtonnements, ce qui alourdit d'autant la démarche de construction. Cette difficulté est amplifiée encore si l'on s'impose de restituer la coupe en plusieurs étapes.

**MODELISATION 2D INFORMATIQUE ET CINEMATIQUE DES CHEVAUchemENTS :  
EXEMPLE D'APPLICATION A LA STRUCTURE DU PINE MOUNTAIN**

Lionel ENDIGNOUX \* et Jean-Louis MUGNIER  
 Institut de Géologie Alpine et UA CNRS n°69  
 Rue Maurice Gignoux - 38031 GRENOBLE  
 \* Adresse actuelle : Institut Français du Pétrole ,  
 1 avenue du Bois- Préau 92506 RUEIL MALMAISON

INTRODUCTION

La modélisation informatique permet de faire un nombre important de calculs simples mais répétitifs (algorithme) à partir d'hypothèses de plus en plus complexes retenues pour le "modélisateur". Bien entendu, la qualité de la modélisation dépend, en dernier ressort de la quantité de données qui sont, dans notre cas particulier, la nature, l'épaisseur des séries stratigraphiques, les pendages des bancs et la première interprétation sismique. Pour résoudre le problème des coupes équilibrées, nous utiliserons les quatre hypothèses qui sont présentées dans le prochain paragraphe. Puis après une description succincte du modèle avec ses paramètres et ses inconnues, on illustrera son application, par essai/erreur sur l'exemple du chevauchement du Pine Mountain dans les Appalaches, traité par SUPPE (1983) et MITRA (1986). L'équilibrage "à la main" de la partie la plus externe de cette structure est détaillée par MUGNIER dans ce mémoire.

I - PRESENTATION DES HYPOTHESES

**a. Conservation des surfaces dans le plan de coupe**

Il faudra choisir un plan de coupe vertical et parallèle à la direction de transport, que l'on suppose donc constante dans le temps, en général perpendiculaire aux chevauchements et parallèle aux décrochements purs.

**b. Conservation des épaisseurs**

L'état initial est supposé sans variations latérales de faciès et d'épaisseurs stratigraphiques et la déformation doit se faire par glissement "banc sur banc", de manière isopaque. Ceci suppose que la série stratigraphique soit constituée d'une alternance de bancs compétents entrecoupés de lits incompétents qui permettent ce glissement.

Enfin on remarquera que la conservation des surfaces et des épaisseurs stratigraphiques est équivalente à celle des longueurs et des épaisseurs stratigraphiques.

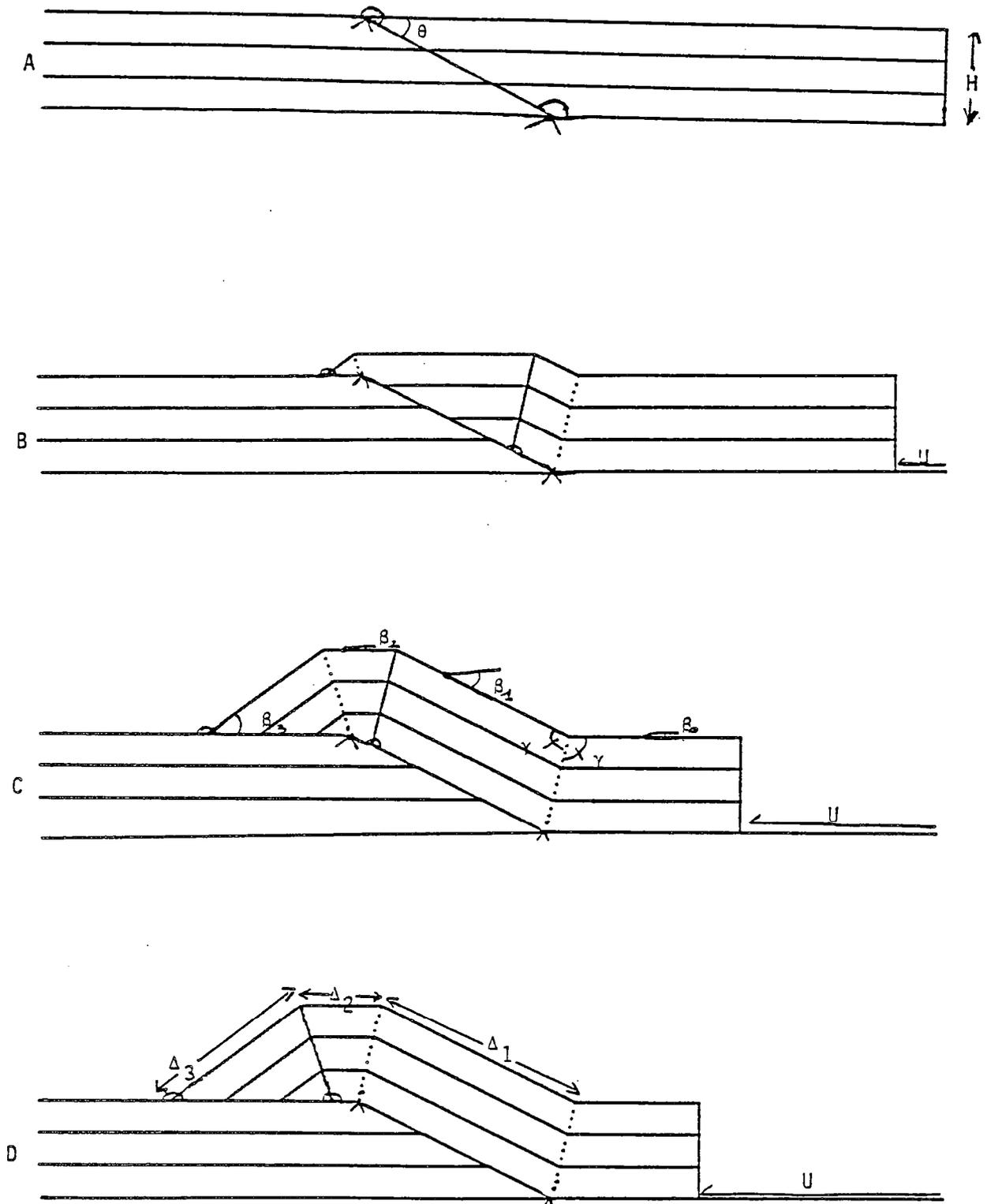


Figure 1: Inconnues et paramètres du décollement en marche simple.

( $\curvearrowright$  : point mobile;  $\times$  : point fixe;  $\text{---}$  : axe mobile;  
 .... : axe fixe)

### C. Géométrie des plans de chevauchements

On les considère comme des "lignes brisées" constituées de plats - parallèles à la stratigraphie - et de rampes - plans inclinés par rapport à la stratigraphie. De plus, le sens de transport "polarise" la région étudiée : d'un côté il existe une zone interne, déformée, d'où vient le déplacement le long des plans de chevauchements, et de l'autre une zone externe fixe, peu déformée. On suppose aussi que les chevauchements dans l'avant-pays ont tous la même vergence, et qu'ils remontent la série depuis l'interne jusqu'à l'externe.

#### d. Séquence de jeu des failles ; mémoire des structures développées durant la déformation

On fera l'hypothèse que les failles jouent successivement dans le même sens que le transport.

Enfin les pendages finaux dépendront non seulement de l'état initial mais aussi du chemin suivi par la matière durant la déformation ; ils en garderont une mémoire. C'est pour cette raison de non unicité du chemin de la déformation parcouru entre les états initial et final que le problème inverse se traite correctement à partir du problème direct couplé avec une méthode judicieuse d'essai/erreur.

## II - PRESENTATION DU MODELE

Il s'agit d'un "modèle de déformation isopaque direct" dans la mesure où l'on simule la déformation dans le sens où elle se produit. On pourra opposer (Fig.1) :

<u>Paramètres</u>	et	<u>Inconnues</u>
nk : nombre de failles np : nombre de points par faille $\theta$ : pendages de la faille H : épaisseur concernée Uk : déplacements le long de chaque faille par raccourcissement		$\beta$ : pendage finaux de la stratigraphie $\gamma$ : angles axiaux bissecteurs (car les plis sont isopaques). $\Delta_i$ : distance en "surface" entre deux axes

Les paramètres (nk, np,  $\theta$ , H) définissent l'état initial ou restauré, les inconnues ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\Delta_i$ ) l'état final déformé, et les derniers paramètres (Uk) le raccourcissement imposé entre les deux états.

L'algorithme utilisé relie les surfaces axiales (hinges) aux ruptures de pente des failles. Ces axes sont de deux types :

- les axes fixes (footwall hinge) en pointillé sur la figure 1 qui sont associés à l'autochtone.

- les axes mobiles (hanging wall hinge) en traits pleins sur la figure 1 qui suivent le mouvement de l'allochtone.

De plus on notera que les inconnues (pendages, angles axiaux, distances entre axes) associées à chaque banc, évoluent pendant le raccourcissement et dépendent des paramètres ( $\theta$ , H, U) associés à chaque banc mais aussi du chemin "parcouru" par ces mêmes bancs comme on le voit sur

la Fig.2. Classiquement, un modèle de déformation inverse partirait de l'état final comme paramètre ; bien qu'un tel modèle soit à première vue plus proche du problème géologique, nous n'avons pas retenu une telle approche, car les algorithmes analytiques décrivant le problème inverse ne pourraient avoir de mémoire.

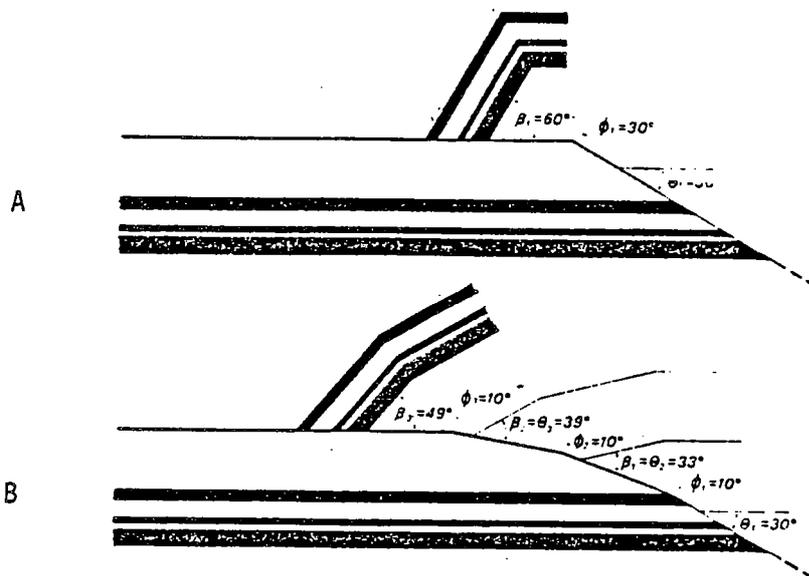


Figure 2 : Illustration de la mémoire du chemin parcouru (SUPPE 1983)

Les bancs en noir, dans les deux figures présentent au départ un même pendage de la faille par rapport à la stratigraphie ( $\theta_1=30^\circ$ ) ; ils doivent à la fin atteindre le même plat final, pour l'un (A) en une seule étape, pour l'autre (B) en trois étapes. Cette différence de chemin de la déformation donne un pendage pour A ( $60^\circ$ ) moins doux que pour B ( $49^\circ$ ).

### III - APPLICATION AU PROBLEME DU CHEVAUCHEMENT DU PINE MOUNTAIN

#### a. Situation - Données

Le chevauchement du Pine Mountain est situé dans les Appalaches. La carte structurale (cf. Fig. 3) montre une direction générale de transport  $28^\circ\text{N}$ . Parallèlement à cette direction de transport le long de la ligne A - B, on a rassemblé (cf. Fig.4) les données géologiques : pendages, nature et âge des terrains et les données d'un puit : Brooks well.

En première analyse de cette coupe, on reconnaît en partant du sud-est un redoublement normal, d'une partie du Wallen Valley Thrust, puis un anticlinal légèrement dissymétrique : le Powell Valley Anticline (cf. Fig. 4). On va tenter de déplier cette structure, en premier lieu dans la zone externe (l'anticlinal) puis dans la zone la plus interne (chevauchement du Wallen Valley).

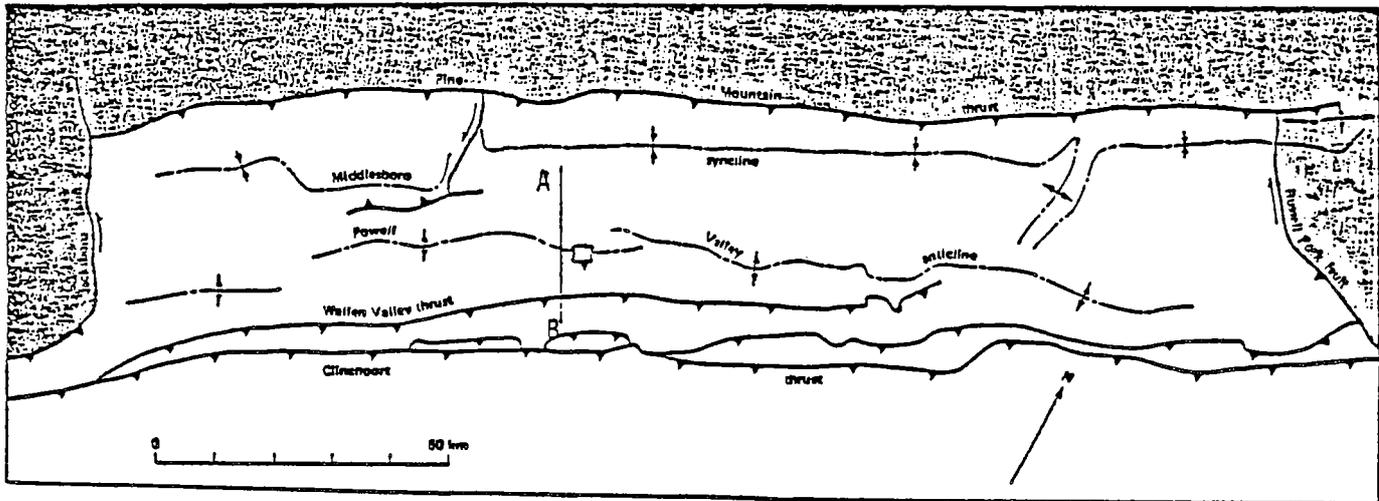


Figure 3: Carte structurale ( SUPPE 1984)

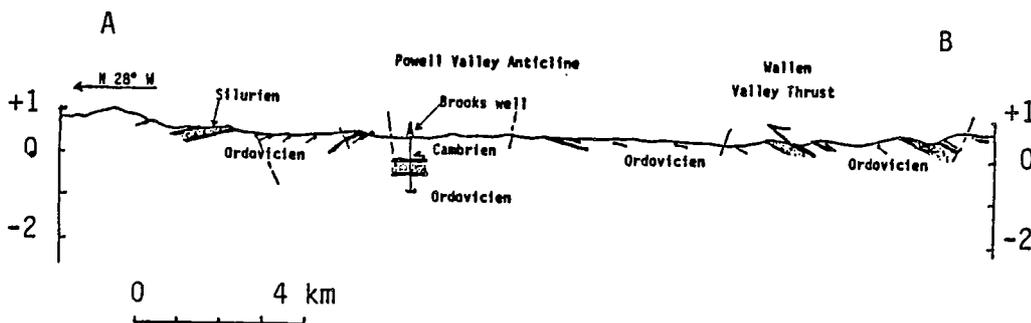


Figure 4: Données de terrain (d'après SUPPE 1983).

### b. L'anticlinal

La profondeur stratigraphique  $H$  de décollement est connue grâce au puit. Le pendage de la marche simple que l'on prendra est celui apparaissant tout de suite en arrière de l'anticlinal ; enfin on ajustera le déplacement  $U$  suivant la valeur des distances  $\Delta i$  entre axes. On obtient ainsi la structure de la Fig. 5a. Cependant ce résultat n'est pas satisfaisant : il ne tient pas compte des variations de pendages de part et d'autre de l'anticlinal ; deux solutions plus détaillées peuvent être envisagées :

1) Complicar la marche simple en y ajoutant deux points de rupture de pente, judicieusement placés, transformant ainsi la marche simple en faille en S (Fig. 5b).

2) Ajouter une faille plus externe, jouant peu, parallèle à la précédente et former ainsi une structure en duplex : on augmente ainsi la profondeur absolue du plan de décollement inférieur (Fig. 5c)

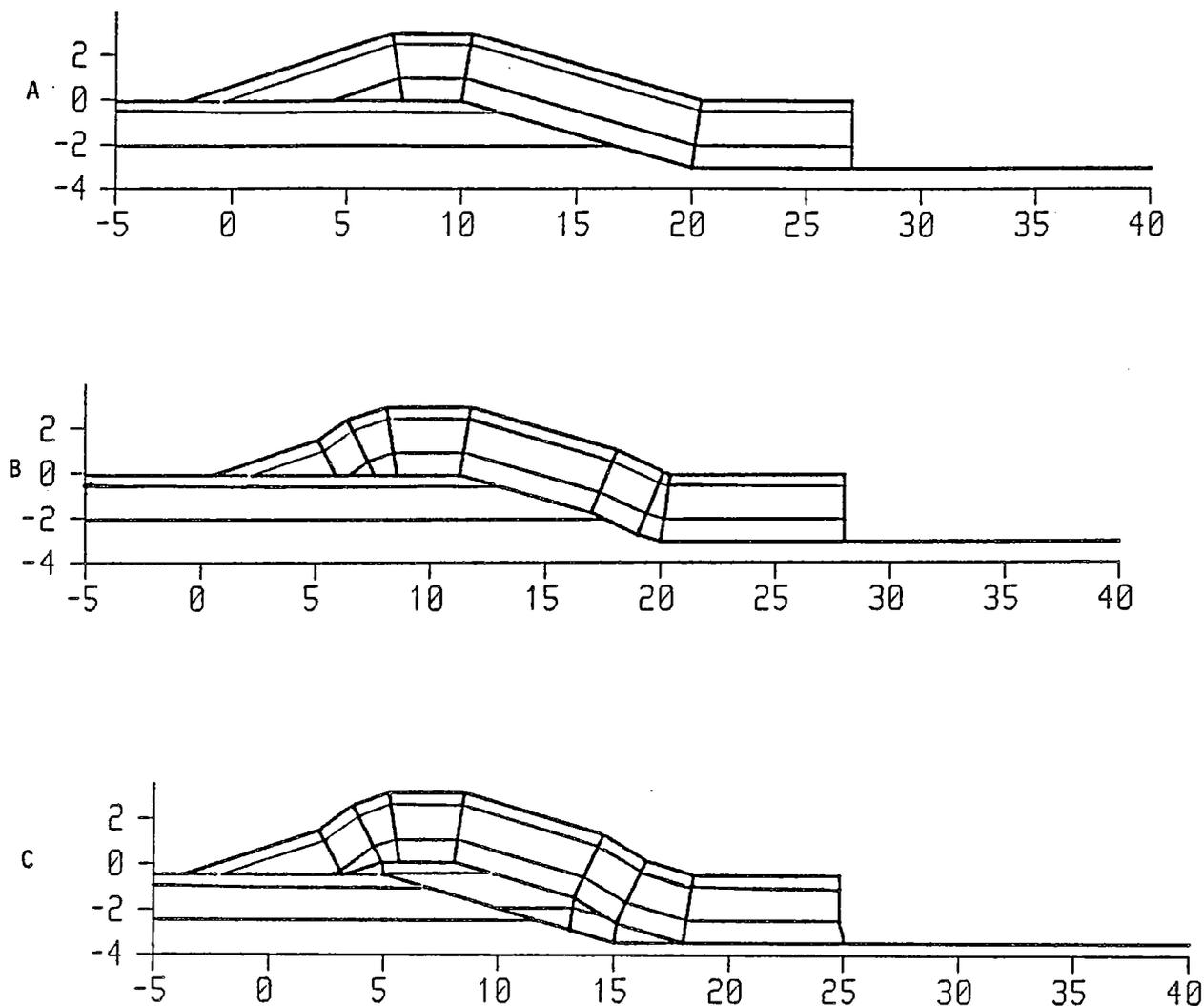


Figure 5: Simulations du POWELL VALLEY ANTICLINE:

A: marche simple ( $U=13$  km)

B: faille en S ( $U=12$  km)

C: duplex ( $U=15$  km)

On s'aperçoit qu'avec le duplex la distance séparant les deux charnières synclinales les plus externes est plus grande que sans duplex, ce qui s'accorde mieux avec les données cartographiques qui indiquent un axe synclinal situé assez loin en avant du Powell Valley Anticline et en dehors des coupes présentées sur les figures 4 et 7. Donc la solution avec un duplex est la plus vraisemblable.

#### c. Le redoublement de la série à l'arrière de l'anticlinal

Ce chevauchement plus interne est supposé avoir joué avant celui qui est responsable de l'anticlinal. D'après les données de terrain (Fig.4), il met en contact deux plats intermédiaires par rapport à ceux évoqués pour l'anticlinal principal.

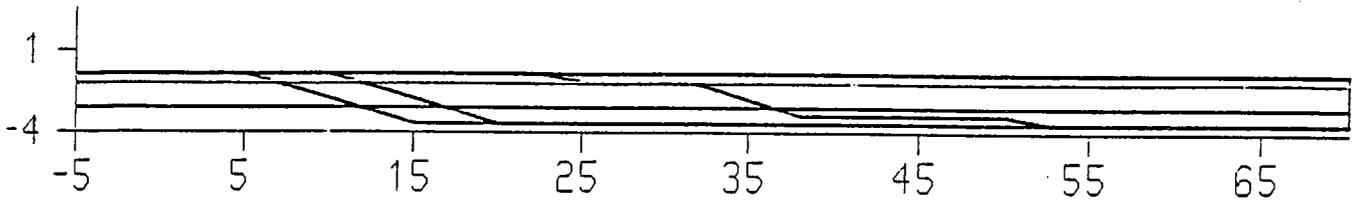


fig 6a: état initial

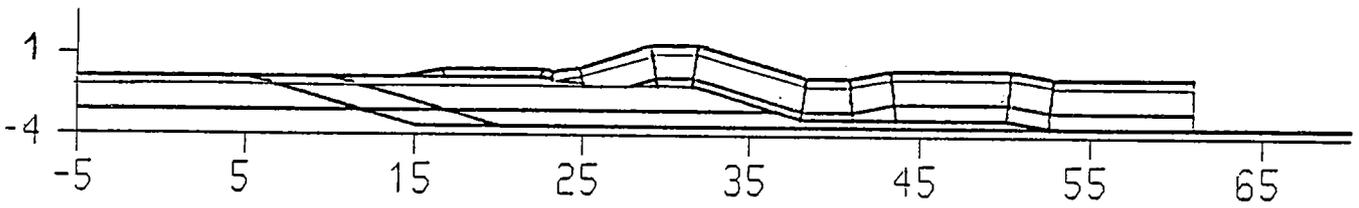


fig 6b: chevauchement du Wallen Valley (U=9 km).

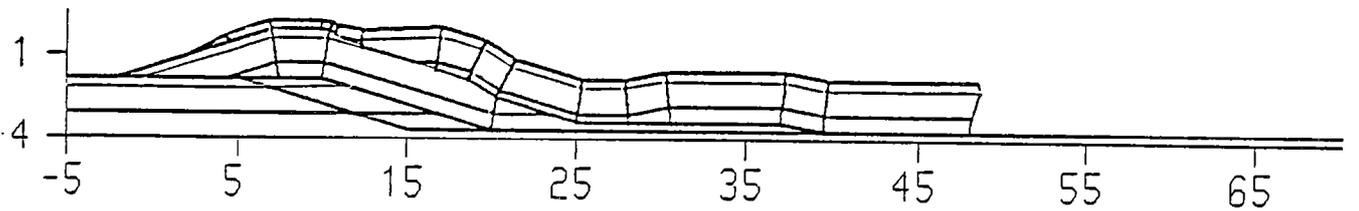


fig 6c: chevauchement du Pine Mountain (U= 13 km).

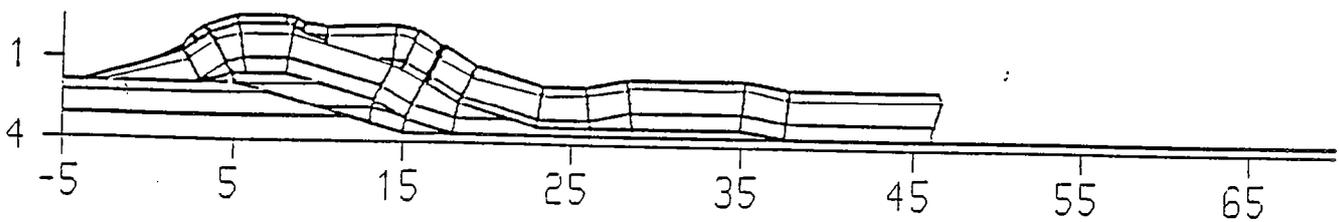


fig 6d: chevauchement de Bales (U= 2 km).

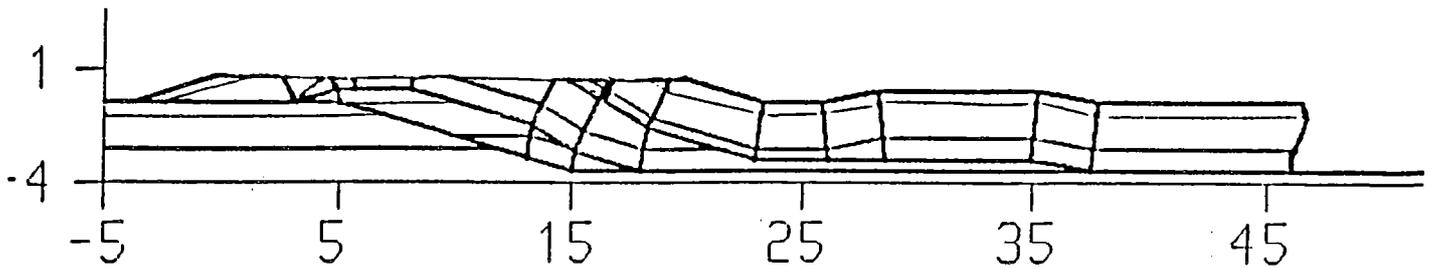


fig 6e: état final après érosion à 800 mètres d'altitude.

Figure 6: Simulation du développement de la structure frontale des Appalaches du Sud.

De plus, l'érosion ayant découpé les sommets de la structure, on connaît très mal l'extrémité avant du chevauchement, et donc la solution présentée ici ne sera pas parfaite. Nous rajouterons comme dernière étape une érosion post-tectonique enlevant les reliefs situés au dessus de 800 mètres (cf. Figure 6).

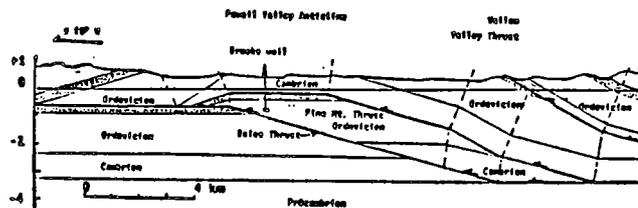


Figure 7: Interprétation proposée par SUPPE( 1983).

#### d. Conclusion

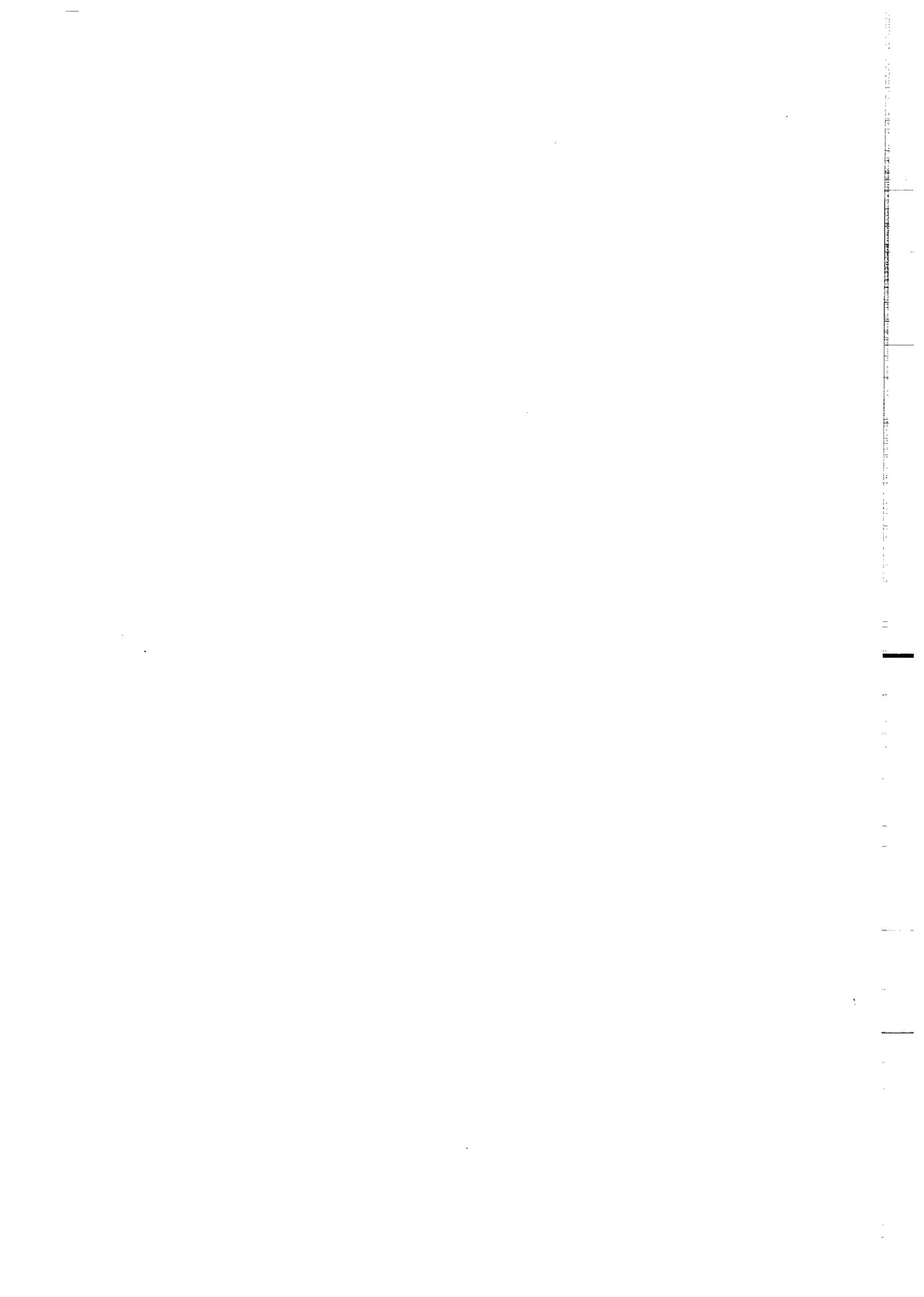
Au cours des paragraphes précédents, nous avons étudié successivement les structures du chevauchement du Pine Mountain, de l'externe vers l'interne, donc des plus jeunes aux plus anciennes, et nous avons simulé dans le sens direct leur formation. Nous avons finalement proposé une "bande dessinée" retraçant les principales étapes de l'évolution cinématique qui conduit à la géométrie finale et donc à une interprétation de la coupe. Celle-ci est analogue à celle proposée par SUPPE (1983) sur la figure 7.

Le modèle informatique et cinématique utilisé est un outil d'aide à l'interprétation des structures profondes. Mais c'est également un modèle cinématique qui permet de quantifier à tout moment un certain nombre de grandeurs, - raccourcissement, cisaillement à l'arrière, déformation d'un maillage - qui peuvent servir à tester les modèles thermiques et mécaniques, à progresser dans la compréhension des processus physiques associés à la mise en place des structures chevauchantes.

## REFERENCES

1. MITRA S.  
Duplex Structures and imbricate Thrust systems geometry, structural positions and hydrocarbon potential.  
AAPGG, Vol 70, n°9 (Sept.1986), p. 1087-1112
2. SUPPE J.  
Geometry and kinetatics of fault bend folding.  
Am.s.Sci., vol. 283 (Sept. 1983), p. 684-721.
3. SUPPE J.  
Principles of structural geology. Chapitre 8, 1984, p. 254-300

Ce travail a été financé par l'Institut Français du Pétrole dans le cadre de la convention de recherche "Déformation des bassins d'avant-pays". Le logiciel utilisé est en cours de développement sur les centres de calcul de l'IFP et du C.I.C.G. (Grenoble).



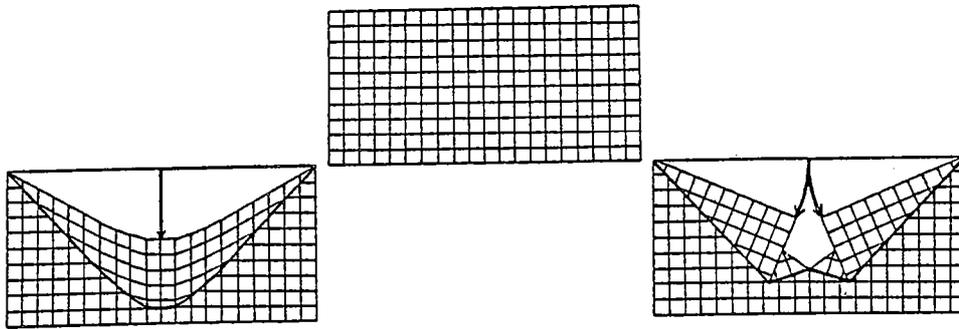
## L'EQUILIBRAGE ET LA RESTAURATION EN CARTE DE COUCHES PLISSEES ET FAILLEES

J.P. GRATIER

L.G.I.T., Observatoire de l'Université de Grenoble,  
I.R.I.G.M., BP 68 St Martin d'Hères

Lorsqu'on veut dessiner des structures géologiques, sur une coupe, les données disponibles sont en général si fragmentaires qu'il est presque toujours nécessaire de faire des interpolations (conscientes ou non !) entre des informations relativement ponctuelles. La méthode dite de l'équilibrage des coupes géologiques a simplement pour but d'imposer un choix conscient de ces règles d'interpolation qui doivent respecter une certaine compatibilité géométrique entre les données. Ainsi des contraintes sur le dessin des structures apparaissent si l'on respecte par exemple la conservation du volume des massifs rocheux au cours de leur déformation. La méthode, et ses limites, ont été clairement expliquées dans les différents textes précédents. Le but du présent exposé est de proposer un certain nombre de nouvelles méthodes d'équilibrage qui doivent être utilisées lorsque les hypothèses de base pour la construction des coupes équilibrées ne sont plus valides. Il s'agit, en fait, de tentatives d'extension des méthodes d'équilibrage à des structures en trois dimensions. Enfin au-delà d'un nécessaire équilibrage géométrique des structures nous discuterons brièvement de la nécessité de respecter une certaine compatibilité avec les lois fondamentales de la mécanique.

Une des hypothèses les plus contraignante pour la construction de coupes géologiques équilibrées est la nécessité de traduire la conservation du volume des massifs rocheux (entre leur état initial et leur état actuel déformé) en une conservation des surfaces sur les coupes géologiques. Cette nécessité implique par exemple que la valeur de la déformation perpendiculaire à la coupe géologique soit nulle, ou au moins ait une valeur homogène sur l'ensemble de la coupe. Dans la plupart des cas cela implique que la méthode d'équilibrage des coupes géologiques ne s'applique qu'à des structures cylindriques (à une échelle régionale). Cette limitation importante exclue notamment l'application de cette méthode à l'étude des zones d'amortissement longitudinal de plis ou de failles, et à celle de l'ensemble d'une structure arquée. D'une manière générale, il est exclu d'utiliser cette méthode pour l'étude de structures géologiques hétérogènes dans le plan horizontal (voir Fig.1). En fait pour traiter de telles structures il est nécessaire de raisonner non pas en coupe mais en carte, en travaillant sur des surfaces plissées-faillées.



**FIGURE 1** - Exemples de structures non cylindriques, vues en carte, lorsqu'une couverture (carrés) est déplacée par rapport à un socle (blanc) (par pli couché et chevauchement) avec un amortissement latéral du déplacement.

- Dans le cas de droite : cette couverture ne présente pas de changement d'épaisseur (donc ne change pas de longueur dans son plan moyen) ce qui implique une mise à nu du socle sous-jacent de part et d'autre d'une déchirure : les principes des coupes équilibrées ne sont pas respectés parce que les directions de déplacement de la couverture (par rapport au socle) changent dans l'espace et dans le temps.

- Dans le cas de gauche pour que le socle ne soit pas découvert le long d'une déchirure, (il l'est seulement à l'arrière), il faut que la couverture change d'épaisseur (donc change de longueur dans son plan moyen) ce qui ne permet pas non plus de respecter les principes des coupes équilibrées même si la direction de déplacement reste ici bien parallèle dans l'espace et dans le temps.

Deux approches peuvent être envisagées pour l'équilibrage de telles structures hétérogènes en carte lorsqu'on souhaite simplement équilibrer une couche réfractée plissée et faillée sans changement d'épaisseur (type barre calcaire très compétente).

- Une première approche consiste à discrétiser l'ensemble d'une région à déformation hétérogène en plusieurs éléments finis horizontaux à déformation homogène. Le problème peut être traité comme l'on fait Schwerdtner (1977) et Cobbold (1979) pour l'étude de déformation interne hétérogène. Une application à des études régionales a été proposée par Gratier et al., (1987) sur l'exemple des Chaînes Subalpines françaises, la taille des éléments homogènes étant de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres de côté.

- Une deuxième approche consiste à analyser géométriquement la surface d'une couche plissée-faillée et à tester sa dépliabilité par un programme de calcul qui permet de rabattre sur un plan horizontal un ensemble d'éléments finis plans composant la surface considérée. La taille de ces éléments plans dépend alors de la courbure de la surface considérée. Selon les possibilités d'obtenir une surface initiale continue et horizontale, on évalue ainsi la "qualité" du premier dessin de la couche, et on améliore ensuite ce dessin en ajustant au mieux les contraintes imposées par les données avec celles imposées par la nécessité de pouvoir restituer la couche dans son état initial horizontal. Ces deux approches sont brièvement présentées ci-après.

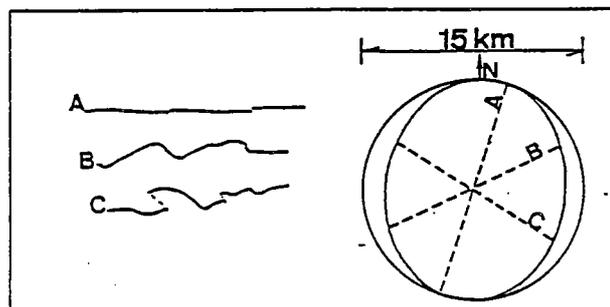
## I - COMPATIBILITE DEFORMATION-DEPLACEMENT ET RESTAURATION D'UNE COUCHE PLISSEE-FAILLEE PAR DISCRETISATION EN ELEMENTS FINIS HORIZONTAUX

### a) Principe de la méthode

Schwerdtner (1977) et Cobbold (1979) ont proposé une méthode qui permet la restauration, dans son état initial, d'une zone à déformation interne continue et hétérogène. Elle consiste, à partir de la connaissance des trajectoires de déformation finie dans cette zone, à la diviser en plusieurs éléments finis homogènes limités par ces trajectoires. La connaissance des valeurs de déformation finie, dans chaque élément, permet alors de restituer la forme initiale de chacun de ces éléments, ceci dans un premier temps sans modifier leur situation ni leur position. Cette première restitution introduit évidemment entre les éléments (restitués dans leur forme initiale) des trous et des recouvrements que l'on doit ensuite minimiser en leur autorisant des translations et des rotations rigides. On obtient alors une restauration des structures déformées dans leur état avant déformation. S'il est, en plus, possible de trouver, sur le secteur considéré, une ligne qui n'a subi ni translation ni rotation rigide on peut même reconstituer les déplacements finis de chacun des éléments en comparant leur position avant et après déformation.

### b) Application à l'étude d'une région plissée-faillée

Dans l'application de cette méthode à l'étude d'une région plissée-faillée, qui a été proposée par Gratier et al. (1987), la difficulté tient à la nécessité d'estimer des valeurs de déformation finie représentatives à une échelle régionale. Lorsqu'on dispose d'une couche compétente plissée et faillée sans changement d'épaisseur on peut résoudre ce problème en mesurant les valeurs du rapport longueur finale sur longueur initiale de cette couche suivant 3 ou 4 coupes géologiques diversement orientées (Fig.2). On peut ainsi calculer l'ellipse de déformation finie horizontale pour différents secteurs (qui peuvent même se recouper), puis estimer l'évolution des trajectoires de déformation finie sur toute la région. Pour une meilleure comparaison entre secteurs, il est préférable d'utiliser la même valeur de la longueur initiale pour tous ces secteurs. Le choix de cette valeur doit être compatible avec le fondement de la méthode c'est à dire qu'elle doit être suffisamment grande pour que la déformation puisse être considérée, dans chaque secteur, comme homogène et continue.

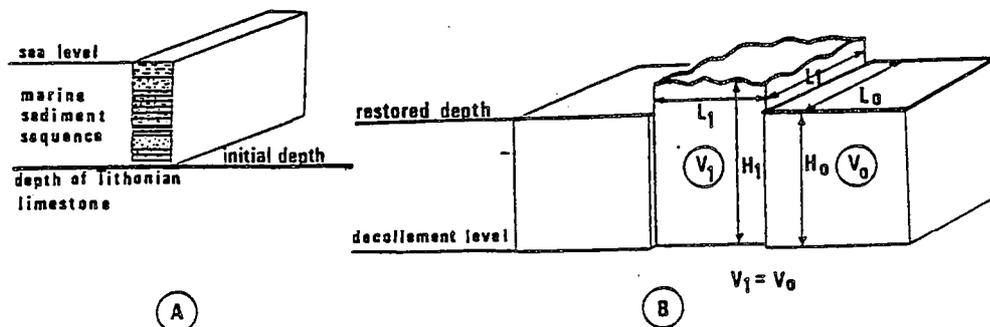


**FIGURE 2** - Exemple schématique de la mesure des déformations d'une couverture sédimentaire plissée et faillée, à une échelle régionale, par la mesure des rapports longueur finie/longueur initiale d'une couche compétente, sur trois coupes verticales (à gauche) diversement orientées. On obtient ainsi une ellipse de déformation finie horizontale (à droite), représentative pour un secteur plurikilométrique. Lorsqu'on dispose de telles mesures sur l'ensemble d'une région, on peut tracer les trajectoires de déformation finie qui permettent d'imposer les limites des éléments finis homogènes et les valeurs de déformation dans ces éléments (Fig.4).

En pratique une taille de référence des secteurs d'un ordre de grandeur supérieure au déplacement sur les failles est généralement suffisante (soit 15 km dans l'exemple étudié, par Gratier et al., 1987, concernant le domaine Subalpin : Chartreuse, Vercors, Diois, Baronnies). Il est également possible de prendre en compte l'effet des décrochements si le déplacement sur ces failles reste d'un ordre de grandeur inférieur à la taille des secteurs. Connaissant les valeurs de déformation sur l'ensemble de la région étudiée, il est possible, en suivant la démarche proposée par Schwerdtner et Cobbold, de tracer les trajectoires de déformation finie, de définir des éléments finis limités par ces trajectoires (d'une taille équivalente à celle des secteurs de mesure de la déformation), de les restituer dans leur état initial, puis de les ajuster au mieux pour reconstituer un état initial de l'ensemble de la région. Si on se fixe la position d'une ligne on peut alors reconstituer les déplacements sur l'ensemble de la région.

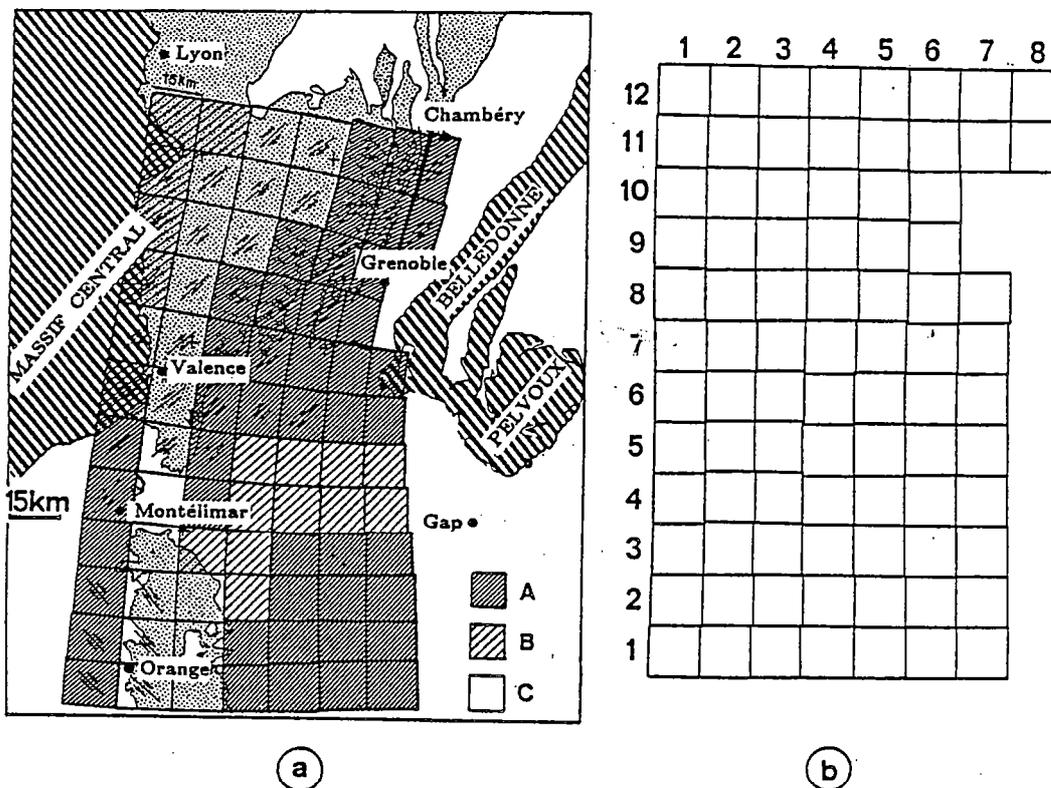
Il est important de souligner le point suivant. Si on pouvait être sûr que les trajectoires de déformation restituées dans l'état initial définissent toujours une grille cartésienne, on pourrait ajuster les valeurs (et l'orientation) des déformations de chaque élément de manière à ce que tous les éléments déformés soit la transformation de carrés initialement identiques. Malheureusement, comme l'on bien montré Cobbold (1979) et Cobbold et Barbotin (1987) ce n'est que dans certain cas particulier que les trajectoires de déformation, restituées dans l'état initial, définissent une grille cartésienne. Dans le cas général, des trajectoires de déformation curvilignes ne sont pas restaurées en une grille cartésienne. On ne peut donc pas, avec les seules valeurs de déformation finie horizontale, strictement équilibrer les déformations (c'est à dire ajuster les valeurs de déformation les unes aux autres). On peut simplement, en reportant ces valeurs, tester leur compatibilité.

On pourrait, par contre, accroître très sensiblement la précision sur les valeurs de déformation horizontale en les "équilibrant" avec les valeurs de déformation verticale. En postulant une déformation à volume constant on peut ajuster au mieux, non plus des éléments, mais des blocs de même volume côte à côte. Le problème est cependant qu'il est souvent assez difficile d'estimer précisément ces valeurs de déformation verticales. Leur calcul implique de connaître le niveau du plan de décollement et le niveau initial de la couche référence (Fig.3). Si le premier est assez souvent accessible (par des données géophysiques), le second ne l'est que très rarement. Les séries sédimentaires présentent en effet presque toujours des variations régionales d'épaisseur. Il reste cependant toujours possible de comparer, pour tous les blocs, la profondeur de la couche repère après son dépliage, avec la profondeur de cette même couche repère nécessaire pour permettre le dépôt des formations marines qui la surmontent (voir Fig.3).



**FIGURE 3** - Règles de conservation du volume déformé, au dessus d'un plan de décollement, qui impliquent de connaître indépendamment la profondeur de ce plan de décollement et celle du niveau initial de la couche référence (ici, Tithonique). Lorsqu'on ne connaît pas précisément cette dernière profondeur, on peut la calculer à l'aide des valeurs de déformation horizontale (profondeur "restituée", Fig.3B) puis la comparer avec la profondeur minimale de cette couche référence requise pour le dépôt de la série marine susjacente (profondeur "initiale", Fig.3A). On estime ainsi des "résidus" d'altitude qui doivent être expliqués par d'autres processus que le simple décollement couverture sur socle, (on pourra voir pour cela l'exemple de la Fig.8).

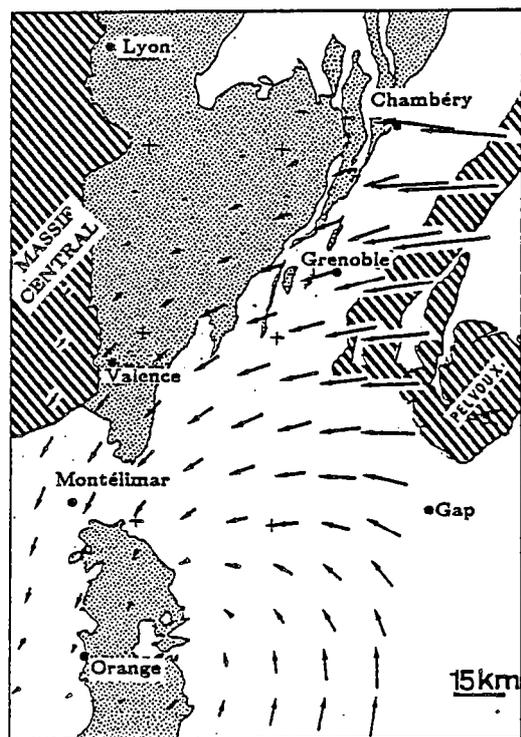
Pour appliquer cette méthode aux Massifs Subalpins une trentaine de cartes géologiques, ont été utilisées. Elles ont permis la réalisation de coupes géologiques, dont certaines ont pu être équilibrées grâce à des données complémentaires sur les structures profondes obtenues par des profils sismiques (Mugnier et al. 1987, Thouvenot et Ménard 1987, Arpin, 1988, lorsque la validité des hypothèses pour la construction de ces coupes était respectée). L'analyse quantitative de la déformation d'une couche calcaire compétente (Tithonique) a permis d'obtenir une carte de la déformation finie de ces Massifs Subalpins, composée de 84 éléments à déformation homogène (Fig.4a). La restauration de ces éléments dans leur état avant déformation est donnée dans la Fig.4b.



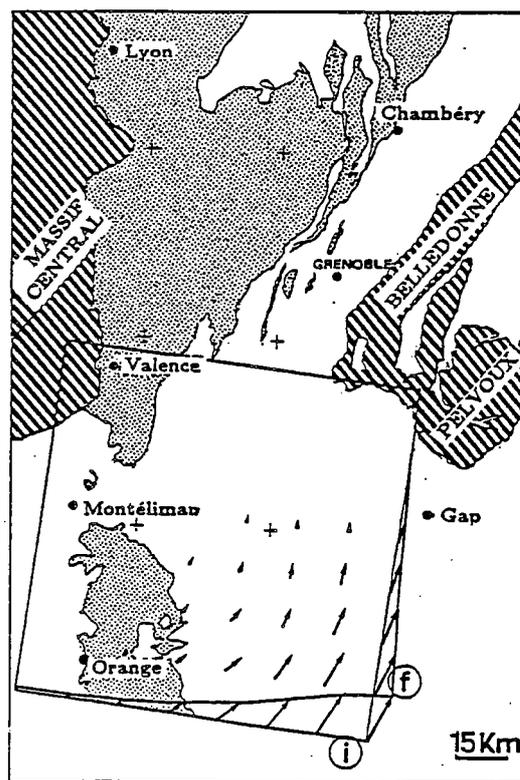
**FIGURE 4 (a)** - Représentation de l'ensemble de la déformation horizontale finie des Massifs Subalpins par la décomposition de la région en 84 éléments finis homogènes horizontaux. Les limites de ces éléments sont parallèles aux trajectoires de déformation, les valeurs des déformations principales sont connues dans chaque élément (voir Fig.3). Un certain indice de qualité des données a été utilisé pour distinguer les éléments bien contraints en orientation et en valeurs de déformation (hachures serrées) ; de ceux bien contraints seulement pour les valeurs de déformation (hachures espacées, quand par exemple les deux valeurs de déformation principales horizontales sont proches) ; et de ceux enfin plutôt mal contraints (blanc) par manque d'affleurement ou de données profondes. La restauration de ces 84 éléments dans l'état initial de la région (Fig.4b). Il reste ensuite à fixer la translation et la rotation rigide de l'ensemble de la région pour tracer les déplacements finis. Nous avons pour cela considéré comme fixe l'élément le plus proche de Lyon et la ligne N95 passant par Chambéry ; Hachures = Socle ; Pointillés = Tertiaire.

La limite Nord du domaine (prolongement stable du Massif central) ayant été considérée comme fixe les déplacements des limites Est, Sud et Ouest ont pu être estimés. Ceci a été fait soit pour l'ensemble de la déformation (Fig.5) soit en décomposant cette déformation en deux parts successives : déformation Pyrénéo-Provençales (Fig.6) puis déformation Alpine (Fig.7). Ainsi pour cette dernière, et pour la limite Est constituée par les grands chevauchements de socle de Belledonne et du Pelvoux, une rotation anti-horaire de 15 à 20° a été calculée pour ces massifs, associée à leur déplacement vers l'Ouest et le Sud-Ouest. On peut montrer également qu'à l'intérieur du domaine étudié des failles normales synsédimentaires fonctionnent ensuite en failles inverses ou en décrochement. Elles imposent des conditions aux limites locales et donc des directions locales de déplacement.

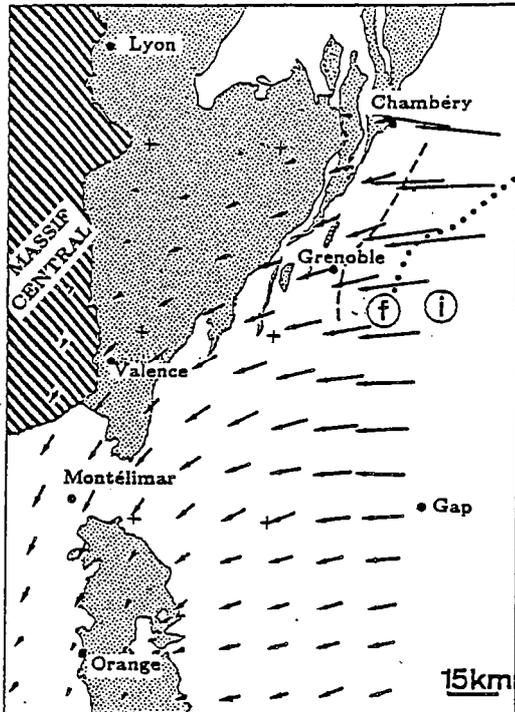
Enfin la comparaison de la profondeur du Tithonique après restauration, avec celle nécessaire au dépôt des séries marines susjacentes (voir Fig.3) permet de révéler un excès d'altitude des massifs subalpins, avec un maximum de 1000-1500 m centré sur Vercors-Sud et Diois (Fig.8), qui pourrait être associé à un grand chevauchement crustal sous ces massifs.



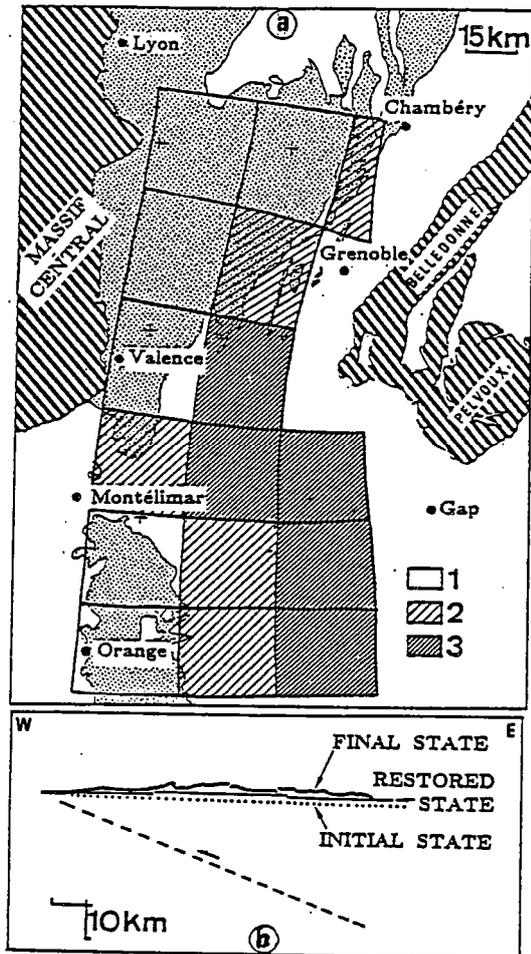
**FIGURE 5** - Carte des déplacements totaux finis intégrant l'ensemble de la déformation horizontale des massifs subalpins. Les flèches joignent simplement les sommets des éléments finis avant (Fig.4b) et après (Fig.4a) la déformation ; Hachures = Socle ; Pointillés = Tertiaire dans l'état actuel.



**FIGURE 6** - Carte des déplacements attribués à la phase Pyrénéo-Provençale (sur des critères d'analyse structurale des plis du Diois-Baronnies).



**FIGURE 7** - Carte des déplacements de la phase Alpine (déduite de la différence entre déplacements totaux finis et déplacements Pyrénéo-Provençaux). On notera aussi, en pointillé, le tracé de la ligne de chevauchement socle/couverture du massif de Belledonne avant et après la restauration des déformations de la couverture sédimentaire. Le massif de Belledonne entre son état initial (i) et actuel (f) aurait ainsi subi une rotation antihoraire de 15-20° associée à sa translation vers l'Ouest de plusieurs dizaines de kilomètres.



**FIGURE 8a** - Carte de répartition des excès d'altitude des massifs subalpins. Ces valeurs ont été calculées par la différence entre la profondeur du Tithonique après son dépliage (profondeur restaurée) et la profondeur nécessaire de ce même tithonique pour permettre le dépôt de la série marine susjacente (profondeur initiale), voir Fig. 3. Cet excès d'altitude peut s'expliquer par un chevauchement crustal profond. (Fig. 8b) qui "soulèverais" une partie des massifs subalpins.

D'une manière générale, le champ des déplacements Alpains finis, déduit de l'analyse des déformations des Massifs Subalpins, révèle ainsi une expulsion latérale de ces massifs, associée à leur rotation anti-horaire, et limitée par de grands décrochements senestres le long de la marge stable (Massif Central). Une telle approche d'équilibrage et de restauration des structures en carte est, par exemple, la seule méthode d'analyse pour ce type de géométrie avec structures arquées associée à la terminaison de chaînes de montagne.

## 2 - EQUILIBRAGE ET RESTAURATION AUTOMATIQUE D'UNE SURFACE GEOLOGIQUE PLISSEE ET FAILLEE PAR DISCRETISATION DE LA SURFACE EN ELEMENTS FINIS

### a) Principe de la méthode

On considère une couche géologique compétente, initialement horizontale, et qui a été ensuite plissée et faillée. Si une analyse structurale permet d'assurer que la déformation de cette couche s'est effectuée sans changement d'épaisseur, la couche plissée-faillée est strictement dépliable, c'est à dire qu'elle peut être restaurée dans son état initial continu et horizontal, comme une feuille de papier, froissée et déchirée, que l'on repasse.

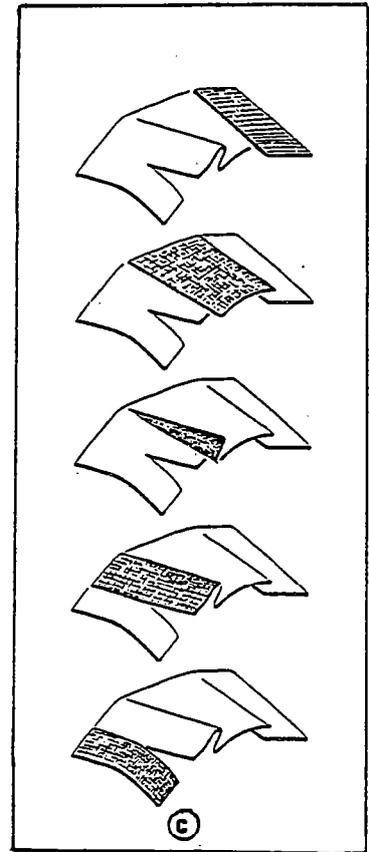
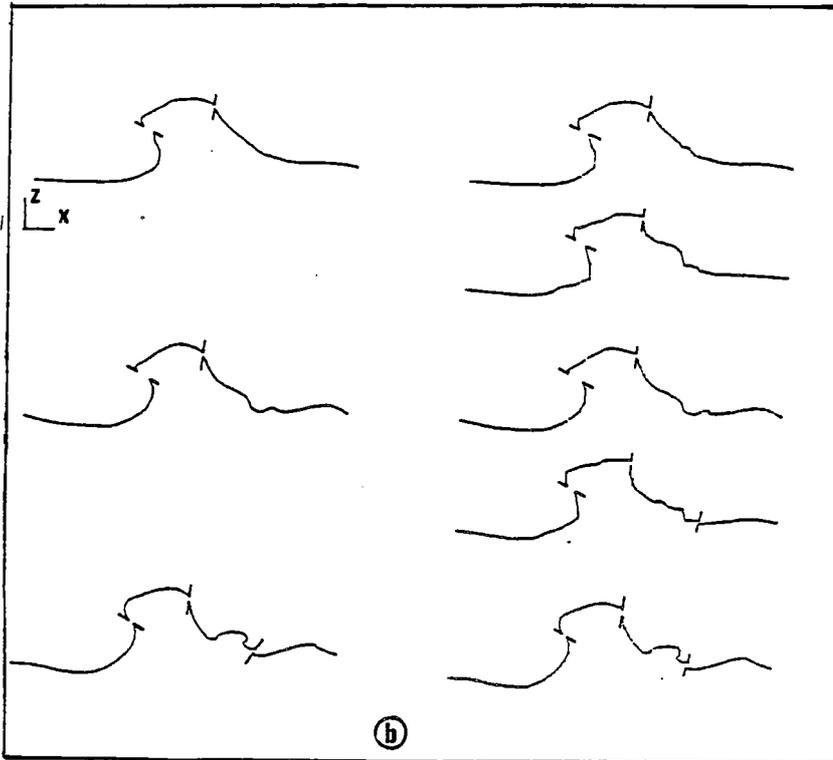
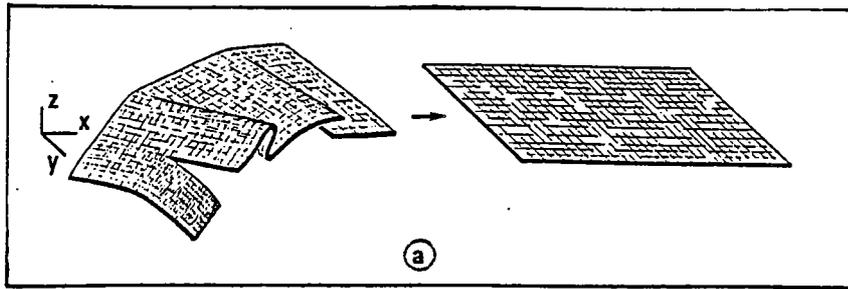
Le problème, en géologie, est que l'on ne dispose pas, en général, du suffisamment de données pour pouvoir dessiner sans incertitudes une telle surface. Même dans les cas les plus favorables, ou lorsque l'on dispose de données de surface (affleurements), et de profondeur (sondages, géophysique) il est presque toujours nécessaire, pour dessiner les couches géologiques de procéder à des interpolations entre les sites comportant des données fiables. Equilibrer une surface revient donc finalement à s'imposer une règle pour ces interpolations, règle qui autorise la restauration de la surface dans son état initial continu et horizontal. Comme pour les coupes équilibrées, il n'existe pas de méthode directe qui permette de contraindre, dès le premier dessin, la forme de la surface pour qu'elle soit dépliable. Nous proposons plutôt de procéder à une méthode d'essais-erreurs, analogue sur le principe à la démarche d'équilibrage en coupe.

### b) Application de la méthode

Un premier essai d'application de cette méthode est en cours sur des structures géologiques associant des plis et des failles. La démarche utilisée se décompose en trois étapes : numérisation de coupes sériées, interpolation (automatique) pour dessiner une surface repère, test (automatique) de la possibilité de restauration à l'horizontale de cette surface. Le cycle est repris si le dépliage n'est pas satisfaisant jusqu'à l'obtention d'un résultat acceptable qui permet de considérer la dernière surface dessinée comme géométriquement équilibrée. On peut exposer brièvement cette démarche avec quelques détails.

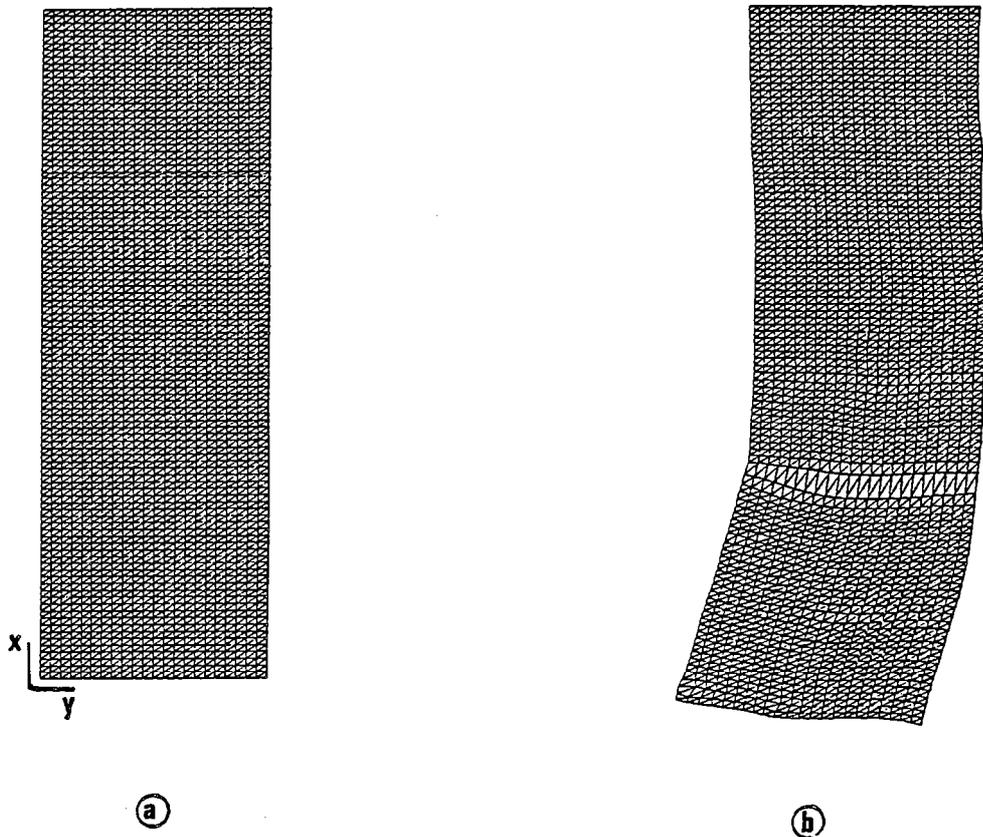
Comme pour les coupes équilibrées, la première étape consiste à dessiner une couche repère, (plissée-faillée sans changement d'épaisseur), à l'aide des données géologiques et géophysique. Mais ceci doit être fait, bien sur, sur plusieurs coupes sériées, en accordant une grande importance à la compatibilité latérale des structures géologiques d'une coupe à l'autre. L'amortissement latéral de toutes ces structures doit notamment être clairement défini.

La définition de la surface repère est ensuite obtenue par des programmes de numérisation des coupes, puis d'interpolation entre ces coupes (selon diverses procédures, au choix). La difficulté, avec des couches géologiques plissée-faillées, est que, sur une même verticale, la couche peut apparaître plusieurs fois (en cas de plis couchés ou de failles inverses). Aucun logiciel graphique actuel ne permet de traiter directement ce problème. Par contre nous avons fait un essai satisfaisant en découpant une surface géologique complexe, en plusieurs domaines de surface pour lesquels la relation entre l'altitude de la couche et les coordonnées horizontales était unique (Fig.9). Les domaines continus plissés et limités par des failles sont ensuite traités indépendamment puis ajustés les uns aux autres après leur restauration à l'horizontale.



**FIGURE 9** - Dessin schématique d'une surface de couche géologique (Fig. 9a) avec des structures de plis et de failles classiques : de gauche à droite : faille normale, plis couchés, faille inverse). On peut obtenir une telle surface à partir de coupes sériées numérisées en utilisant des logiciels graphiques d'interpolation. Par exemple sur la Fig. 9b, à partir des coupes de la colonne de gauche, un logiciel peut calculer une surface plissée et faillée, représentée par les coupes de la colonne de droite. Mais si, sur une même verticale, il y a plusieurs valeurs possibles de l'altitude de la couche (cas des plis couchés sur des failles inverses) la surface doit être décomposée en plusieurs domaines traités indépendamment (Fig. 9c) puis ajuster ensuite les uns aux autres après leur dépliage.

Pour tester la possibilité de restauration d'un domaine à l'horizontal une première approche a consisté à décrire la surface plissée-faillée par un ensemble d'éléments finis plans et à tester l'ajustage de ces éléments lorsqu'ils sont rabattus sur un plan horizontal. Une telle méthode d'ajustage automatique d'éléments plans a déjà été utilisée en géologie, pour d'autres applications que le traitement d'une surface, par Etchecoppar (1974) et Cobbold (1979). Le problème consiste à minimiser les vides et les recouvrements entre les éléments, chacun est ajusté par rapport à ses voisins, par exemple par des translations et des rotations rigides qui permettent de minimiser la valeur de la somme des distances entre les sommets d'un élément à ajuster et ceux du trou défini par ses voisins. Tous les éléments sont ainsi successivement ajustés une première fois, puis la procédure est réitérée, autant de fois qu'il est nécessaire pour que l'ajustage progresse. En général cependant l'ajustage ne devient jamais parfait, il faut donc définir aussi en critère d'ajustage "tolérable" à partir duquel on peut considérer que la couche est bien restaurable (Fig.10). Si l'ajustage n'est pas possible, dans la limite du critère choisi, il faut modifier les coupes et recommencer toute la procédure jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant.



**FIGURE 10** - Lorsqu'on dispose d'une surface géologique plissée du type de celles présentées dans la Fig.9b, composé d'un ensemble de points de coordonnées xyz, on peut représenter cette surface par un ensemble d'éléments finis triangulaires. La fig.10a montre une vue en carte d'un domaine dans son état actuel déformé (pour des raisons pratiques les coordonnées xy définissant une grille cartésienne). La fig.10b montre le même domaine, aussi vue en carte, lorsque tous les triangles composant la surface ont été rabattus à l'horizontal puis ajustés par minimisation des trous et des recouvrements. La superposition des deux états avant (10b) et après (10a) déformation permet, si on peut considérer un des éléments comme fixe, de tracer les directions de déplacements finis associées au plissement et au faillage de la surface.

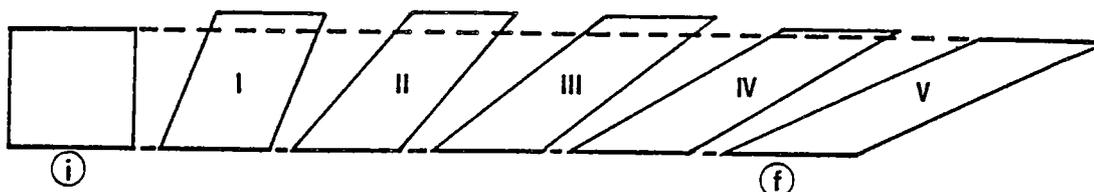
Comme pour les coupes équilibrées la solution obtenue n'est pas forcément unique mais elle est équilibrée parcequ'elle respecte à la fois toutes les données et une règle pour l'interpolation entre ces données qui dérive d'une hypothèse clairement formulée de conservation de la surface au cours de déformation.

Bien qu'en l'état actuel des méthodes d'acquisitions de données le cas soit peu fréquent on peut concevoir aussi une autre application de cette méthode. Si le dessin de la surface est parfaitement contraint par les données, des tests de dépliage, intervenant sur une couche dont on ne connaît pas précisément le comportement, permettrons de préciser les secteurs où cette couche a subi des changements d'épaisseur (donc des déformations localisées) qui peuvent être intéressantes à repérer pour des problèmes de circulation de fluides.

### 3 - COMPATIBILITE DES STRUCTURES EQUILIBREES AVEC LES LOIS FONDAMENTALES DE LA MECANIQUE : REGLE DE L'UTILISATION DU MINIMUM D'ENERGIE

Comme cela a déjà été dit dans les textes précédents une structure équilibrée (en coupe ou en carte) n'est qu'une solution géométriquement possible dont la qualité dépend avant tout de celle des données. Il reste qu'il serait souvent nécessaire de s'imposer d'autres règles pour le dessin de telles structures. Une approche radicalement différente des précédentes est suggérée à la lecture du remarquable ouvrage de Nadai (1950). On sait que lorsqu'on ne dispose que de l'état d'un matériau avant et après sa déformation il y a une infinité de chemins de déformation possibles pour aller d'un état à l'autre (voir notamment Ramsay, 1967). Nadai (1950) montre clairement que tous les chemins de déformations ne consomment pas la même quantité d'énergie et que pour déformer un matériau, il existe un chemin de déformation qui exige le minimum d'énergie et donc qui devrait être suivi dans la nature de préférence à tous les autres (pour un type de comportement et pour des conditions aux limites données).

L'important est que ce chemin n'est pas toujours celui qui nous paraît le plus simple. Ainsi sur l'exemple de la figure 11, pour passer de l'état (i) à l'état (f) on pourrait penser qu'un cisaillement simple est le plus économique. Nadai montre qu'il n'en est rien et que, par exemple, pour un matériau ayant un comportement plastique la somme des produits contrainte-déformation, qui représente l'énergie de déformation finie consommée, est minimale pour un chemin qui implique d'abord un certain épaissement du matériau puis le retour à l'épaisseur initiale qui accompagne un mouvement de cisaillement qui n'est alors plus simple du tout.



**FIGURE 11** - Séquence de déformation progressive consommant le minimum d'énergie de déformation pour produire un cisaillement simple fini : le chemin de déformation le plus économique implique que la couche s'épaississe au début (I), jusqu'à un maximum (II), puis que l'épaisseur redevienne progressivement égale à l'épaisseur initiale (de III à V), tout cela avec une surface constante, et pour une couche au comportement plastique, Nadai (1950).

On voit ainsi une possibilité de tester la compatibilité de la cinématique d'une déformation avec les lois fondamentales de la mécanique. Il est pour cela nécessaire de calculer l'énergie de déformation consommée lors d'une déformation progressive. Il faut s'assurer notamment que les hypothèses sur cette cinématique des déformations, qui sont souvent extrêmement importantes dans le dessin des structures équilibrées, sont bien telles que l'énergie minimale a été consommée pour obtenir une structure donnée. Ainsi la règle qui consiste à raisonner sur des couches d'épaisseur constante n'est pas forcément valable, d'un point de vue énergétique, pour certaines couches de matériaux au comportement plastique même si l'épaisseur finie est finalement égale à l'épaisseur initiale. Il reste cependant que la principale difficulté, soulignée par les rares auteurs qui ont essayé d'apprécier l'énergie de déformation consommée pour le développement de structures géologiques (Goguel 1948, Elliott 1976, Mitra et Boyer 1986) est d'estimer le type de comportement mécanique du matériau qui va fixer les relations contrainte-déformation.

Ainsi le choix d'un comportement plastique, par tous ces auteurs, permet l'utilisation d'un seuil de contrainte constant (seuil de plasticité) donc une valeur de contrainte constante dans le calcul des produits contrainte-déformation nécessaire pour estimer l'énergie de déformation. Cela simplifie évidemment beaucoup les calculs. Mais lorsqu'on considère les bilans énergétiques estimés notamment par Elliott (bilan entre énergie fournie au massif par changement du potentiel gravitaire et énergie consommée par la déformation interne) on voit que le seuil utilisé (200 bars) ne correspond pas vraiment au seuil de plasticité que l'on peut mesurer sur les roches. Une loi de comportement de type visqueux (newtonien) serait probablement mieux adaptée au comportement des roches sédimentaires dans la nature. Cela permettrait, en plus, de mieux intégrer les problèmes liés à la vitesse des déformations.

## CONCLUSION

Les deux méthodes de restauration et d'équilibrage de surfaces géologiques plissées et faillées présentées ici ne le sont qu'à titre d'exemple de ce qu'il paraît souhaitable de rechercher dans ce domaine, mais d'autres possibilités existent. La finalité des deux méthodes est assez différente. La première est applicable, à court terme, sans moyen de calcul sophistiqué. Elle permet d'analyser les relations déformation/déplacement sur de grandes régions à déformation hétérogène (structures arquées) comportant par exemple des centaines de plis et de failles. La seconde, au contraire, qui implique l'utilisation d'un mini-ordinateur avec des logiciels graphiques est relativement onéreuse. Elle permet d'équilibrer des surfaces complexes mais pour des raisons d'économie de moyens et de temps de calcul les structures étudiées resteront limitées, à moyen terme, à des ensembles de quelques dizaines de plis et de failles. D'une certaine façon ces deux méthodes sont donc aussi complémentaires. La première permet de tester assez rapidement la compatibilité des données sur une grande région, la seconde permet de préciser la géométrie des structures dans quelques secteurs particulièrement intéressants.

A terme, il faut penser aussi que l'équilibrage simplement géométrique des structures (en coupe, en carte ou même en volume) devra être complété par l'assurance d'avoir choisi une cinématique des déformations progressives qui soit, d'un point de vue énergétique la plus économique possible. Cela permettra d'inclure le respect des lois fondamentales de la mécanique comme une règle supplémentaire dans les interpolations entre les données géologiques qui resteront, pour longtemps encore, soit relativement ponctuelles (affleurements, sondages) soit pas très bien contraintes dans leurs positions (profils sismiques)

Il reste enfin que, quelque soit la sophistication des méthodes dite d'équilibrage, ou même de test de compatibilité des données avec les lois fondamentales de la mécanique, la qualité des données est primordiale. Il ne faut pas oublier que l'acquisition des données est toujours prioritaire sur leur traitement !... La validité d'une structure équilibrée restera donc toujours, avant tout fonction de la qualité et de la densité des données géologiques et géophysiques.



## BIBLIOGRAPHIE

- ARPIN R., 1987 - Déformation et déplacements des Massifs Subalpins de Vercors et Chartreuse. Thèse Univ. Grenoble.
- COBBOLD P., 1979 - Removal of finite deformation using strain trajectories. J. Struct. Geol. 1, p.67-72.
- COBBOLD P., BARBOTIN E., 1987 - Kinematic significance of fanning strain trajectories. J. Struct. Geol. in press.
- ELLIOT D., 1976 - Energy balance and deformation mechanism of thrust sheets. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1283, p.289-312.
- ETCHECOPAR A, 1974 - Simulation par ordinateur de la déformation progressive d'un agrégat polycristallin. Thèse Univ. Nantes.
- GOGUEL J., 1948 - Introduction à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre. Mem. Serv. Géol. Carte France.
- GRATIER J.P., MENARD G., ARPIN R., 1987 - Strain-displacement compatibility and restoration of the subalpine massifs of the Western Alps. Fermor Lecture, Londres, à paraître dans numéro spécial J. Soc. Geol. Londres : "Alpine Tectonics".
- MITRA G., BOYER S.E., 1986 - Energy balance and deformation mechanisms of duplexes. J. Struct. Geol. 8, p.291-304.
- MUGNIER J.L, ARPIN R., THOUVENOT F., 1987 - La construction de coupes équilibrées : méthodes et applications au nord du massif subalpin de la Chartreuse. Géodynamica Acta, 1; p.125-137.
- NADAI A.L., 1950 - Theory of flow and fracture of solid. MacGraw Hill ed.
- RAMSAY J.G., 1967 - Folding and fracturing of rocks. MacGraw Hill ed.
- SCHWERDTNER W.M., 1977 - Geometric interpretation of regional strain analysis. Tectonophysics. 39, p.515-531.
- THOUVENOT F., MENARD G., 1987 - Allochtony of the Chartreuse Subalpine massif : seismic constraints. Submitted to J. Struct. Geol.



Dans la même collection :

- N°1 - H. MARTIN - Nature, origine et évolution d'un segment de croûte continentale archéenne : contraintes chimiques et isotopiques. Exemple de la Finlande orientale. 392 p., 183 fig., 51 tabl., 4 pl. (1985). 140F.
- N°2 - G. QUERRE - Paléogéographie de la croûte continentale à l' archéen : les granitoïdes tardifs (2,5-2,4 Ga) de Finlande Orientale. Pétrologie et géochimie. 226 p., 74 fig., 41 tabl., 3 pl.(1985). 85F.
- N°3 - J. DURAND - Le Grès Armoricaïn. Sédimentologie. Traces fossiles. Milieux de dépôt. 150 p., 76 fig., 9 tabl., 19 pl. (1985). EPUISE
- N°4 - D. PRIOUR - Genèse des zones de cisaillement : Application de la méthode des éléments finis à la simulation numérique de la déformation des roches. 157 p., 106 fig., 7 tabl., (1985). 55F.
- N°5 - V. NGAKO - Evolution métamorphique et structurale de la bordure sud-ouest de la "série de Poli". Segment camerounais de la chaîne panafricaine. 185 p., 76 fig., 16 tabl., 12 pl. (1986). 70F.
- N°6 - J. DE POULPIQUET - Etude géophysique d'un marqueur magnétique situé sur la marge continentale sud-armoricaine. 159 p., 121 fig., 5 tabl. (1986). 55F.
- N°7 - P. BARBEY - Signification géodynamique des domaines granulitiques. La ceinture des granulites de Laponie : une suture de collision continentale d'âge Protérozoïque inférieur (1.9-2.4 Ga). 324 p., 89 fig., 46 tabl., 11 pl. (1986). 115F.

- N°8 - Ph. DAVY - Modélisation thermo-mécanique de la collision continentale. 233 p., 72 fig., 2 tabl. (1986). 95F.
- N°9 - Y. GEORGET - Nature et origine des granites peralumineux à cordiérite et des roches associées. Exemples des granitoïdes du Massif Armoricaïn (France) : Pétrologie et géochimie. 250 p., 140 fig., 67 tabl., (1986). 100F.
- N°10 - D. MARQUER - Transfert de matière et déformation progressive des granitoïdes. Exemple des massifs de l'Aar et du Gothard (Alpes centrales Suisses). 287 p., 134 fig., 52 tabl., 5 cartes hors-texte (1987). EPUISE
- N°11 - J.S. SALIS -Variation séculaire du champ magnétique terrestre. Direction et Paléointensité sur la période 7.000 - 70.000 BP dans la chaîne des Puys. 190 p., 73 fig., 28 tabl., 1 carte hors-texte (1987). 90F.
- N°12 - Y. GERARD - Etude expérimentale des interactions entre déformation et transformation de phase. Exemple de la transition calcite-aragonite. 126 p., 42 fig., 3 tabl., 10 pl. (1987). 75F.
- N°13 - H. TATTEVIN - Déformation et transformation de phases induites par ondes de choc dans les silicates. Caractérisation par la microscopie électronique en transmission. 150 p., 50 fig., 1 tabl., 13 pl. (1987). 95F.
- N°14 - J.L. PAQUETTE - Comportement des systèmes isotopiques U-Pb et Sm-Nd dans le métamorphisme éclogitique. Chaîne Hercynienne et chaîne Alpine. 190 p., 88 fig., 39 tab., 2 pl. (1987). 95F.
- N°15 - B. VENDEVILLE - Champs de failles et tectonique en extension : modélisation expérimentale. 392 p., 181 fig., 1 tabl., 82 pl. (1987). 265F.

- N°16 - E. TAILLEBOIS - Cadre géologique des indices sulfurés à Zn, Pb, Cu, Fe du secteur de Gouézec-St-Thois : Dévono-Carbonifère du flanc Sud du Bassin de Châteaulin (Finistère). 195 p., 64 fig., 41 tabl., 8 pl. photo., 8 pl. h.texte. (1987). 110F.
- N°17 - J.P. COGNE - Contribution à l'étude paléomagnétique des roches déformées. 204 p., 86 fig., 17 tabl., (1987). 90F.
- N°18 - E. DENIS - Les sédiments briovériens ( Protérozoïque supérieur ) de Bretagne septentrionale et occidentale : Nature, mise en place et évolution. 263 p., 148 fig., 26 tab., 8 pl. (1987). 140F.
- N°19 - M. BALLEVRE - Collision continentale et chemins P-T : l'unité pennique du Grand Paradis (Alpes Occidentales). 340 p., 146 fig., 10 tabl., (1986). 145F.
- N°20 - J.P. GRATTIER - L'équilibrage des coupes géologiques. Buts, méthodes et applications. Atelier du Groupe d'Etudes Tectoniques le 8 Avril 1987 à Rennes. 165 p., 82 fig., 2 tabl. (1987). 85F.



BON DE COMMANDE

A retourner à :

Centre Armoricaïn d'Etude Structurale des Socles  
 Mémoires et documents du CAESS  
 Université de Rennes I - Campus de Beaulieu  
 35042 - RENNES Cédex (France).

NOM .....  
 ORGANISME .....  
 ADRESSE .....

Veillez me faire parvenir les ouvrages suivants :

N°	Auteur	Nb Exemplaires	Prix Unitaire	TOTAL
Frais d'envoi :				
1 volume : 15,00 F.				
			Total	
			Frais d'envoi	
			Montant total	

Veillez établir votre chèque au nom de l' Agent comptable de l'Université de Rennes I et le joindre au bon de commande.

**Imprimé au CAESS**

**Dépôt Légal**

**2ème trimestre 1988**

## RESUME :

Des ateliers du GET ont pu être tenus à Rennes le 7 et 8 avril 1987 grâce à l'amabilité de nos collègues de cette université que nous remercions de leur accueil. A la suite de ces ateliers, l'un sur les modèles analogiques l'autre sur l'équilibrage des coupes géologiques, les conférenciers ont bien voulu écrire des articles à vocation pédagogique sur ces deux thèmes. Le présent livret réuni une douzaine d'articles sur les buts et les méthodes d'équilibrage des structures géologiques, avec plusieurs applications qui permettent de discuter de la méthode et de ses perspectives.

Les buts et la méthodologie générale de construction des coupes équilibrées sont introduits par G. Ménard, qui donne notamment les hypothèses de base, la démarche à suivre, les domaines et les limites d'application de cette méthode.

Des exercices d'application sont ensuite proposés, sur des exemples concrets. Ainsi J.L. Mugnier donne d'abord, de manière très détaillée, toutes les étapes de la construction d'une coupe équilibrée, ainsi que toutes les informations et observations à collecter pour une telle approche. L'importance des différents paramètres sur lesquels on peut jouer pour équilibrer une coupe et celle du choix d'un modèle de déformation sont ensuite soulignées dans deux exercices de G. Ménard. L'importance de la géométrie des failles est enfin discuté par J.L. Faure et M. Séguret pour l'équilibrage des coupes en distension.

Des applications de cette méthode à plusieurs régions permettent ensuite une discussion sur les problèmes pratiques posés par la construction de ces coupes équilibrées, sur des exemples très variés, comme ceux des Rocheuses Canadiennes et de l'Ardenne (F. Meiller), de la Provence (C. Tempier), de l'Avant Pays Andin (Bolivie) et des Pyrénées (J. Deramond et al.), et même pour un test d'application, au dépliage de structures expérimentales (S. Triboulet & J.F. Ballard).

Des perspectives d'avenir sont enfin dégagées dans les trois derniers articles. G. Ménard discute d'abord de l'application de la méthode à l'échelle de la croûte terrestre, L. Endignoux & J.L. Mugnier présentent ensuite une modélisation informatique permettant de construire très rapidement des coupes équilibrées à partir de données imposées. J.P. Gratier propose enfin une extension de la méthode d'équilibrage au traitement et à la restauration, en carte, de couches plissées et faillées, qui implique également l'utilisation de programmes informatiques.

L'acquisition de données sur les structures profondes, de la Terre est très onéreuse et on ne peut pas espérer disposer, avec les moyens géophysiques actuels, à la fois d'une bonne précision sur la situation et la géométrie, les discontinuités profondes ponctuelles resteront, longtemps encore, nécessaire. La méthode de l'équilibrage des structures géologiques est, en ce sens, une méthode de traitement des données qui permet simplement de tester leur cohérence géométrique et de rechercher le meilleur compromis possible entre toutes ces données (surface et profondeur) et des hypothèses explicites clairement formulées. Comme toutes les méthodes de traitement de données, la fiabilité des résultats obtenus est donc directement dépendante de la qualité de l'acquisition de ces données. Le développement d'une telle méthode est lié à celui de l'exploration géophysique des structures profondes qui, au vu des lacunes existantes (particulièrement soulignées par les tentatives d'équilibrage), ne peut qu'être vivement encouragé.

**Mots-Clés :** Tectonique; coupes équilibrées, traitement des données.