

THESE

Présentée à
L'Université de Provence

(Aix-Marseille I)

Le 13 Mars 1991.

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université.
Mention : Sciences de la Terre.

par

SUDREAU Yves

Dépliage des unités para-autochtones
dans une nappe de couverture.

Utilisation du concept de coupes
équilibrées.

Etude de quelques cas dans la région
de Marseille.

Soutenue le 13 Mars 1991 devant la commission d'examen
composée de :

MM.	G.GUIEU	Directeur de thèse.
	P.GAVIGLIO	Rapporteurs
	G.MENARD	
	C.ROUSSET	Examineurs
	J.L. MUGNIER	

FORMATION DOCTORALE : Géologie, méthodes de recherche et applications.

LABORATOIRE DE GEOLOGIE STRUCTURALE ET APPLIQUEE.

Case 28, Centre Scientifique St-Charles, Université de Provence.

3 Pl. Victor HUGO, 13331 MARSEILLE Cedex 3.

Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné.

Viollet-le-Duc Eugène-Emmanuel.

Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle.

Que soient remerciées ici les personnes qui de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce travail. Tout d'abord, M. le Professeur GUIEU pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et permis de mener ce travail à son terme. Je n'oublierai pas ses remarques et ses réflexions ayant trait aussi bien à la géologie en général que sur mon sujet en particulier. M. le Professeur ROUSSET a accepté d'examiner le travail d'un de ses anciens étudiants. Je lui exprime ici ma profonde reconnaissance. Je remercie M. GAVIGLIO qui a sacrifié de son temps à la lecture de ce mémoire. Ces critiques tant sur la forme que sur le fond m'ont été très utiles. Sans les rencontres très fructueuses et enthousiastes que j'ai pu avoir avec M. MENARD de l'Université de Savoie et M. MUGNIER de l'Université de Grenoble, ce sujet n'aurait sûrement pas eu le même contenu. Je les remercie très vivement.

Je salue ici tous les membres du L.G.S.A et notamment P.ARLHAC pour son soutien moral en toute circonstance, P.PAPI et Mme LERIN pour leur amabilité et leur gentillesse.

Je n'oublierai surtout pas les amis qui ont accompagné ce périple ; Nordine, mon collègue de Fortune et d'Infortune, avec qui j'ai partagé les bons et les mauvais moments de ces dernières années ; Pierre qui m'a souvent accompagné sur le terrain et à la table d'une brasserie fort connue ; et les autres étudiant(e)s de ce labo ou de celui d'en face qui m'ont fait l'honneur de leur amitiés.

Par leur soutien, leurs encouragements et leur présence, mes frères et ma soeur m'ont bien aidé et me sont indispensables. Enfin et surtout, je dédie ce travail à mes parents ; à ma mère qui aurait du le lire et à mon père qui le feuillettera pour elle.

PLAN

I. <u>Introduction.</u>	p 5
II. <u>Géométrie des surfaces de chevauchement et coupes équilibrées.</u>	
Introduction.	p 6
Objet et intérêt des coupes équilibrées.	p 7
Conservation du volume au cours de la déformation.	p 8
Différences avec les coupes « classiques » et les coupes rérotectoniques	p 9
Classification.	p10
Nappe et Chevauchement.	p11
Nappes en rampe et plat, nappes du premier et second genre.	p11
Rampe et plat.	p12
Les éléments structuraux.	p13
Les séquences de chevauchement.	p15
Les règles.	p16
Méthodes d'interpolation des surfaces plissées.	p20
Dépliage.	p20
Facteurs compliquant l'équilibrage.	p23
Conclusion.	p24
III. <u>Présentation du secteur étudié.</u>	
Cadre géographique de la région étudiée.	p25
Structure géologique.	p25
Résumé de l'histoire géologique et de l'évolution tectonique.	p27
Problèmes de méthodologie liés au dépliage.	p30

IV. Dépliage des unités para-autochtones.

Le front nord de l'Etoile.

Aperçu sur la structure de l'autochtone chevauché.

La Nerthe septentrionale autochtone. p34

Le bassin de Gardanne. p34

Les unités tectoniques du chevauchement de l'Etoile. p35

L'écaille de Gardanne.

Structure géologique. p37

Dépliage cartographique avec les lignes de recoupement. p39

Dépliage en coupe avec un programme informatique. p42

Comparaison du dépliage en carte et du dépliage en coupe p43

La faille du Safre. p44

L'écaille apto-albienne de Simiane-Mimet. p44

Rapports entre l'autochtone, l'écaille de Gardanne
et l'écaille de Simiane-Mimet. p46

Le dépliage des unités para-autochtones. p47

L'écaille de Sousquières. p48

Rapports des unités para-autochtone avec l'allochtone. p49

Les unités para-autochtones du massif d'Allauch.

Structure géologique. p51

L'aire centrale. p51

Les séries entraînées. p52

La série renversée entre Allauch et les Bellons p53

La série renversée entre la Treille
et le Jas de Fontainebleau. p54

Entre le Jas de Fontainebleau et
les Gavots (Unité du Bec-Cornu). p54

Mise en évidence d'une paléotopographie. p55

La série renversée de la Sainte-Baume. p57

V. Conclusions. p61

Références bibliographiques. p62

INTRODUCTION

L'objet de ce travail est de présenter un dépliage des unités para-autochtones entraînées sous une nappe.

L'exemple choisi est celui du charriage de la nappe de l'Etoile et des structures qu'il a induit. Depuis plus d'un siècle, cette région a été bien étudiée par les géologues et ces structures ont fait l'objet de longues controverses.

Il m'a paru intéressant de confronter les données connues avec des méthodes nouvelles. Ces méthodes nouvelles concernent l'analyse de la géométrie des surfaces de chevauchement et du concept de coupes équilibrées, qui lui est attaché.

Avec cette confrontation, l'objectif essentiel est de comparer les conceptions propres au modèle régional tel qu'il s'est forgé avec des conceptions plus générales, car applicables à toutes structures charriées, et plus précises puisqu'elles introduisent certaines règles immédiates et simples.

Dans ce cadre, il faut souligner que le dépliage s'effectuera en s'appuyant sur ces règles. Mais en l'absence de données permettant d'estimer de manière géométrique les déplacements, le dépliage sera fondé sur des différenciations stratigraphiques entre les structures autochtones, para-autochtones et allochtones.

Les règles et méthodes propres aux coupes équilibrées, nous permettront d'étayer certaines hypothèses.

Ainsi dans une première partie, sera proposé un éventail des différents concepts, méthodes et règles liées aux coupes équilibrées et à la géométrie des surfaces de chevauchement.

Ensuite le dépliage des structures para-autochtones du Front Nord de l'Etoile, de celles situées autour du Massif d'Allauch et de celles de la Sainte-Baume sera développé, après avoir brièvement replacé ces structures dans le cadre géologique régional.

GEOMETRIE DES SURFACES DE CHEVAUCHEMENT ET COUPES EQUILIBREES.

INTRODUCTION.

L'obligation classique de restituer l'aspect complet d'une forme structurale d'après des observations fragmentaires aboutit à établir une démarche modélisante de reconstitution des structures.

Dans le cadre de l'analyse des structures tangentielles, la méthode dite des « coupes équilibrées » correspond à cette nécessité. Cette méthode a pris naissance et s'est développée ces vingt dernières années à partir de l'exploitation pétrolière des Montagnes Rocheuses canadiennes (DAHLSTROM 1970). Le même style de structures peut s'y observer sur des centaines de kilomètres permettant par la répétition d'observations et leur comparaison de dégager des généralités, un modèle et des règles. De plus, la prospection pétrolière par ses profils géophysiques et ses sondages profonds a pu valider les relations profondes déduites des études de surface.

Les conceptions actuelles sur les nappes de charriage s'appuient sur des principes géométriques, physiques, cinématiques et aussi géologiques, formulés sous formes de règles, l'objectif étant de codifier et de normaliser l'analyse des structures.

La méthode des coupes équilibrées utilise des techniques de construction de coupes, des modèles d'interpolation et une classification des éléments structuraux, établis pour faciliter l'interprétation et le dépliage.

A l'ancienne approche d'étude des nappes, basée sur l'analyse de la forme et de la constitution du corps de la nappe, les coupes équilibrées ajoutent une classification et une meilleure caractérisation des surfaces de chevauchement (BOYER 1982).

OBJET ET INTERET DES COUPES EQUILIBREES.

La méthode des coupes équilibrées est en fait un ensemble de démarches diverses dont l'objet est la reconstitution des structures déformées et éventuellement la restauration de l'état initial de ces mêmes structures.

Différentes approches guideront l'interprétation des structures.

L'analyse des relations géométriques entre les éléments structuraux, à l'aide de règles valables sous certaines conditions, aboutit à les classer, à les regrouper dans des systèmes de chevauchements.

L'analyse structurale (microtectonique notamment) permet de déterminer la direction de déplacement des nappes et des écailles, pour ensuite proposer des schémas de branchements et des séquences de mises en place.

A partir de cette analyse, une représentation de la géométrie est élaborée au travers de coupes (verticales, voire horizontales ou inclinées), de cartes de projection ou de bloc-diagrammes.

La construction et la restauration d'une coupe doit permettre de valider ou d'infirmer une interprétation structurale (HOSSACK 1979), d'écarter des incompatibilités géométriques (DEPAOR 1988) et aussi d'introduire un certain nombre de contraintes limitant le nombre d'interprétations (MENARD 1988).

La confrontation entre la coupe équilibrée, interprétant la géométrie actuelle des structures, et la coupe rérotectonique, représentant l'état initial, passe si nécessaire par des états intermédiaires (HOSSACK 1979).

S'il n'existe pas de chemin cinématique possible entre la coupe finale et l'une des coupes rérotectoniques, la coupe n'est pas dépliable et elle ne peut être retenue pour équilibrée.

Pour être équilibrée, une coupe doit se construire en suivant les principes et les règles suivants.

Conservation du volume au cours de la déformation.

Le principe de conservation du volume au cours de la déformation est à la base du processus qui permet de restaurer un ensemble déformé. Le terme d'équilibrage, qui est lié à ce principe, doit se comprendre de la même manière que l'équilibrage d'une réaction chimique.

Si la déformation s'accompagne d'une variation de volume, l'équilibrage, qui devra tenir compte de cette variation, sera plus délicat.

Dans la mesure où l'équilibrage se fait par la construction d'une coupe, ce premier principe devient, dans le plan de coupe, le principe de conservation des surfaces. Ce passage du volume au plan s'accompagne de restrictions : la coupe doit être réalisée dans la direction de raccourcissement (un écart de 20 à 30 degrés est admissible) et la déformation doit être plane.

Si la coupe est réalisée dans un ensemble où les couches sont isopaques, le principe de conservation de surface se traduit en principe de conservation de longueur (DAHLSTROM 1969).

Ces longueurs sont plus aisément mesurables, avec une règle, un curvimètre ou une tablette à digitaliser (et un logiciel associé), et dépliables, par une remise à l'horizontale, que des surfaces ou des volumes.

Certains processus géologiques, comme l'érosion ou les phénomènes de pression et dissolution (stylolitisation, schistosité) témoignent d'une remobilisation de matière ou d'une variation de volume au cours de la déformation. Même si le volume reste constant, la déformation peut ne pas être plane, produisant ainsi un déficit de surface dans le plan de coupe entre la coupe déformée et la coupe restaurée. Si cette variation n'est pas négligeable, l'équilibrage peut devenir hasardeux.

L'érosion par son action ablative, oblige à reconstituer les volumes manquants avec une incertitude proportionnelle au degré d'érosion.

Les variations d'épaisseurs au sein d'une série compliquent l'équilibrage (surtout si les données sur ces variations sont éparses).

DIFFERENCES AVEC LES COUPES « CLASSIQUES » ET LES COUPES RETROTECTONIQUES.

L'idée de ramener les structures dans leur position originelle est née avec la découverte des nappes de charriages. Ainsi M.BERTRAND note dans son article sur le bassin de Gardanne : «... que le développement d'une couche figurée dans une coupe donne la mesure de son extension primitive...» (BERTRAND 1898).

Ceci explique que bien que cette méthode se soit développée depuis une vingtaine d'années sous une forme élaborée, des techniques et des principes plus anciens, répondant à cette préoccupation, aient été réexaminés et réhabilités. On peut citer le modèle en rampe et plat (RICH 1934), l'estimation de la profondeur de décollement (Fig.1), les dépliages cartographiques (GOGUEL 1939) et certains modèles d'interpolation de plis.

L'apport de la méthode des coupes équilibrées consiste à déplier rigoureusement des coupes ou des cartes avec des règles géométriques, et non plus seulement avec une logique paléogéographique ou palinspastique, puis de se servir de la restauration pour vérifier une interprétation.

De plus, l'intérêt de cette méthode est qu'elle amène à collecter des informations que les méthodes classiques négligent.

En outre certaines questions se formuleront autrement. Par exemple, dans l'optique des modèles en rampes et plats, le problème de la localisation de la patrie d'une nappe se ramène à repérer la rampe du mur (la plus basale) de la surface de charriage (BOYER 1982).

Les techniques utilisées pour construire une coupe classique sont reprises, mais une coupe équilibrée est restorable ou dépliable.

Lors de la construction, les hypothèses sur la géométrie des structures et leurs conséquences devront être explicitement formulées (MENARD 1988).

La coupe est réalisée dans la direction de raccourcissement ou d'allongement. Cette direction n'est pas toujours normale aux directions des structures, ni évidente à établir. De préférence, la coupe équilibrée doit englober l'avant pays non déformé où une ligne fixe de référence¹ est définie.

Il faut aussi noter que beaucoup de coupes rétrotectoniques ne sont en fait que des schémas ou des profils, presque jamais à l'échelle, représentant seulement les unités structurales. Souvent elles n'englobent pas l'avant pays ou bien elles sont partielles et ne montrent pas les raccords possibles en profondeur entre les différentes unités ou les limites stratigraphiques utilisées comme repère. La démarche des coupes équilibrées pallie souvent ces carences.

Enfin, cette description de plus en plus détaillée de la géométrie des systèmes de chevauchement s'accompagne d'un accroissement du vocabulaire associé à ces structures.

Généralement, les concepts nouveaux se propagent avec une certaine déformation, il est donc utile de définir le sens qu'on leur attribue.

En outre, il devient nécessaire de recadrer cette terminologie supplémentaire par rapport à celle héritée des conceptions plus classiques.

CLASSIFICATION.

Avant de construire ou de déplier une coupe, il faut analyser les relations entre les éléments géométriques. Par élément géométrique, on désigne les surfaces de failles et de stratification servant de repère, leurs intersections mutuelles ou leur intersection avec la surface topographique.

Le type de relation entre deux éléments est à la base de cette classification. Ces éléments sont classifiés de manière hiérarchique selon qu'ils caractérisent un volume, une surface, une ligne ou un point.

Une surface est de fait l'intersection entre deux volumes, une ligne l'intersection entre deux surfaces, un point l'intersection entre deux lignes ou entre une ligne et une surface.

¹Traduction de l'expression anglaise *Pin line*.

Nappe et Chevauchement.

Il est d'usage de différencier une nappe et un chevauchement en fonction de l'amplitude des déplacements. Un chevauchement correspond à un rejet inférieur à 5 kilomètres (DENNIS 1981). Au delà, on peut parler de nappe bien qu'une nappe ait été définie historiquement comme un ensemble de terrains charriés caractérisant un domaine ou une filiation paléogéographique (MASSON 1976).

Le terme de chevauchement s'appliquant indifféremment à la surface de faille et au volume des terrains charriés, il faudrait distinguer le corps et le plan de faille du chevauchement.

Nappes en rampe et plat, nappes du premier et second genre.

Les nappes en rampes et plats¹ (MUGNIER 1984) ou nappes par sectionnement et décollement (GIDON 1987) sont rattachées aux nappes du second genre.

La distinction entre les nappes du premier et du second genre (TERMIER 1906) est surtout historique. Les nappes du premier genre (Fig.2A), ou nappes de plis couchés, dont la caractéristique est l'absence de surface de charriage matérialisée, se sont révélées moins courantes que les nappes de second genre, en failles inverses ou en décollement.

Au sein des nappes du second genre, la différenciation entre les nappes en failles inverses et celles en décollement (Fig.2B-C) s'estompe elle-aussi. Le concept de rampes et plats tient, en effet, compte des caractéristiques de ces deux types. Ainsi ces deux classes peuvent être considérées comme des cas particuliers des nappes par sectionnement et décollement (Fig.2D), avec glissement parallèle à la couche basale le long du décollement, du plat et sectionnement par failles inverses le long des rampes. Cette géométrie aboutit à un tracé en escalier de la surface de charriage.

¹*Ramp and flat*

Rampe et plat

Le modèle en rampe et plat est basé sur une géométrie en escalier de la surface de chevauchement (RICH 1934). Dans une couverture initialement horizontale, on distinguera des rampes et des plats au mur et au toit du chevauchement.

Cette différenciation au toit et au mur tient compte des évolutions géométriques et permet la restauration des zones manquantes (GRAHAM 1987).

Les rampes du mur représentent les portions inclinées de la surface de chevauchement, les plats les portions horizontales correspondant à des niveaux de décollement. Une rampe et un plat se repèrent par l'observation des relations angulaires entre les couches et la surface de chevauchement. Une rampe sera définie par le recoupement, avec un certain angle, des couches par la surface de chevauchement et un plat par son parallélisme ou sa concordance.

Au toit les portions initialement en contact avec leur équivalent du mur seront décalés après la mise en place de la nappe.

Ce décalage aboutit au fait qu'après déplacement une rampe du toit peut être horizontale et un plat du toit incliné (Fig.3).

Ainsi l'observation courante et ancienne des importantes variations de pentes d'une surface de charriage devient dans le modèle rampe et plat un critère permettant de reconstituer une structure.

Toutefois, pour certains, la représentation en escalier de la surface de chevauchement est trop utilisée (COOPER 1986). Cette géométrie particulière serait due au fait que les relations angulaires entre couches et failles sont observées en des points différents et qu'elles sont interprétées comme variant brusquement. Au contraire, une représentation plus curviligne ou plus listrique peut se substituer au modèle en escalier (Fig.4).

Mais quelque soit le modèle choisi pour représenter la trajectoire de la surface de charriage, le toit se déforme au cours du déplacement et se moule sur la géométrie du mur (MENARD 1979).

Aux points d'inflexion de la surface de faille au mur vont correspondre des axes de pli au toit. Un pli passif, sans racines, va se développer avec un anticlinal externe mobile et un autre, interne et fixe, localisant l'emplacement de la rampe du mur (Fig.5).

En multipliant le nombre d'écailles et le nombre de plat et rampes, les inflexions dans les séries charriées vont se multiplier pour aboutir à une géométrie de type « *fault bend folding* » (SUPPE 1983) (Fig.6).

Les rampes se situent a priori dans des formations compétentes, et les plats dans des formations incompétentes. Le repérage des rampes et des plats s'obtient cartographiquement en produisant un diagramme de séparation stratigraphique au toit et au mur des surfaces de chevauchement étudiées (Fig.7).

Ce diagramme permet aussi de juger de l'évolution latérale des structures en localisant d'éventuelles rampes latérales permettant le passage d'un niveau de décollement à un autre.

Il se construit en reportant les limites stratigraphiques, recoupées au toit et au mur par le chevauchement, sur l'axe des ordonnées en fonction de leur position par rapport à une des extrémités du chevauchement, représenté par l'axe des abscisses. Les inflexions dans ce tracé localiseront les rampes latérales et les paliers, les plats.

Les éléments structuraux (Fig.8).

La position de la surface de chevauchement par rapport à la surface d'érosion permet de distinguer les chevauchement enfouis ou aveugles des chevauchements émergents¹. Toutefois un chevauchement aveugle mis au jour par l'érosion peut se confondre avec un chevauchement émergent.

Le rejet d'un chevauchement peut diminuer progressivement jusqu'à s'annuler. La ligne, le long de laquelle le rejet est nul, est la ligne d'amortissement². Sur une carte ou sur une coupe, cette ligne produit un point d'amortissement.

¹ *Buried, blind or emergent thrust.*

² *Tip line.*

L'intersection entre les surfaces de chevauchement forme des lignes de branchement¹. Un coin² représente l'intersection entre une ligne de branchement et une ligne d'amortissement d'une même écaille (DIEGEL 1986).

Selon l'orientation de la surface de chevauchement par rapport à l'écaille ou la nappe qu'elle délimite, on distinguera des surfaces de chevauchements frontales, dorsales, sommitales ou basales³.

Les couches sont tronquées par des failles de chevauchement en des lignes de recoupement⁴. Sur carte ou sur coupe, ces lignes donneront des points de recoupements (BOYER 1982).

L'importance du rôle de l'érosion apparait encore lorsqu'il s'agit d'analyser les relations entre les surfaces de chevauchement.

L'intersection entre la surface d'érosion actuelle et les lignes de branchement donnera des points de branchement, et pour les lignes d'amortissement des points d'amortissement. C'est à partir de ces points que l'on essaiera de représenter l'aspect tridimensionnel des structures.

Il faudra distinguer les écailles entièrement délimitées par des chevauchements⁵ de celles limitées par le haut par une surface d'érosion⁶. Dans le premier cas, la surface de chevauchement dorsale rejoint la frontale (ou la sommitale, rejoint la basale). Pour le deuxième type d'écaille, il faudra définir la ligne de front ou d'extrémité de l'écaille (représentant le front de chevauchement). Un empilement d'écailles du premier type définira un duplex et du deuxième type, une imbrication⁷.

¹ *Branch line.*

² *Corner*

³ *Leading, trailing, roof and floor thrust.*

⁴ *Cut-off line.*

⁵ *Horse.*

⁶ *Imbrication* (ou lambeau de poussée en français).

⁷ *Imbrication fan.*

Les séquences de chevauchement.

Pour estimer correctement l'évolution tectonique et le taux de raccourcissement, il est nécessaire de déplier les structures dans l'ordre inverse de leur formation (BUTLER 1987).

La différenciation de l'épisode de déplacement d'une écaille ou d'une nappe par rapport au mouvement des autres écailles permet de définir des séquences de mouvement des chevauchements.

Lorsque la propagation du déplacement se fait par un transfert sur une nouvelle surface de faille dans l'avant-pays, le mouvement est prograde¹ (MUGNIER 1988). Il implique que les surfaces de chevauchements devenues inactives sont transportées passivement par le déplacement de l'écaille frontale et, qu'au franchissement de la rampe active, ces surfaces vont aussi se déformer (Fig.9).

Par contre, si les écailles ou les nappes les plus récentes se forment vers l'arrière pays, le mouvement est rétrograde². Ce type de mouvement peut s'expliquer, par exemple, par un blocage du à un paléo-relief ou un épaissement de la couverture situé vers l'avant-pays.

Si toutes les écailles se forment successivement dans un même sens, la séquence est dans l'ordre³. Les séquences dans le désordre⁴ mélangent les deux types progrades et rétrogrades.

Le cas où une surface de chevauchement en recoupe une autre permet de définir des séquences de recoupement⁵. L'intersection entre un chevauchement et un autre qui le recoupe ne sera pas une ligne de branchement, mais donnera deux lignes de recoupement de chevauchement⁶ de part et d'autre du chevauchement recoupant (BUTLER 1987).

Ce type de séquence permet aussi d'expliquer certaines superpositions normales le long d'une surface de charriage (Fig 10).

¹ *Piggy-back.*

² *Break-back.*

³ *In sequence.*

⁴ *Out-off sequence.*

⁵ *Breach sequence.*

⁶ *Fault cut-off.*

Un diagramme de séquence du toit permet d'étudier et de présenter aisément les écaillages successifs du mur, ainsi que les variations latérales des unités chevauchantes.

Ce type de diagramme se construit comme une série de coupes longitudinales perpendiculaires à la direction de déplacement. Chaque coupe représente une étape dans la mise en place de la nappe et des écaillages qu'elle entraîne (Fig. 11).

La détermination de la géométrie des structures chevauchantes est donc le résultat de l'application d'une classification des éléments géométriques, basée sur leurs rapports mutuels et permettant de les reconnaître et de les reconstruire.

Les règles énoncées ci-dessous découlent pour une grande part de cette classification.

Ces règles ne peuvent être toutes utilisées dans une situation donnée puisqu'elles requièrent des informations qui ne sont pas toujours disponibles.

Il est bon toutefois, d'en dresser un inventaire qui je l'espère ne sera pas trop incomplet.

LES REGLES.

La représentation en escalier du tracé d'une faille de chevauchement suppose un certain nombre de principes ou de règles géométriques.

Ces règles sont basées sur l'analyse des relations entre les couches et les failles. Seront observés l'angle de recoupement entre couches et failles, le rapport entre direction de faille et sens de déplacement ainsi que les relations entre les lignes de recoupement au sein d'une même écaille ou de part et d'autre d'un chevauchement.

La première règle stipule que les failles de chevauchement montent vers un horizon supérieur dans la direction de déplacement du toit (CRANE 1987).

Ce principe souvent repris, se trouve à l'origine de la règle de compatibilité dans l'orientation des rampes (BUTLER 1982). Trois types de rampes sont distinguées (Fig 12) :

Les rampes frontales dont la direction est normale au sens du déplacement de la nappe.

Les rampes latérales parallèles au sens de déplacement.

Les rampes obliques.

Pour chaque rampe on peut déduire les sens de déplacement possibles. Et réciproquement, le sens de déplacement peut être déduit des directions des rampes (Fig 12). Cette règle peut aussi aider à conclure, qu'en cas d'incompatibilité, tel accident n'est pas une rampe.

Dans un régime de nappe gravitaire, cette règle n'est pas valable car des portions de failles chevauchantes peuvent descendre dans un horizon inférieur dans la direction de déplacement du toit (Fig 13) mais elle peut être employée avec prudence au front de la nappe.

La seconde règle, la plus ancienne, est aussi la plus connue. Les couches plus anciennes chevauchent les couches plus récentes. Les exceptions à cette règle doivent être expliquées, par exemple, par des recouvrements de séquences ou une structuration antérieure. Cette règle a été reprise dans l'optique rampe et plat. Le long d'une rampe des couches plus anciennes chevauchent des couches plus récentes. Le long d'un plat, ce sont des couches plus jeunes qui chevauchent des couches plus anciennes (KING 1960). Dans ce cas, le chevauchement est indétectable par des arguments stratigraphiques, la superposition des couches étant normale (GIDON 1987). Les méthodes d'équilibrage peuvent le détecter.

Une troisième règle énonce que, lors du franchissement d'une rampe, l'angle de recoupement entre une couche et la rampe est conservé. Dans ce cas, la longueur de rampe du toit ne varie pas au cours de la déformation et reste égale à la longueur de rampe du mur (DE PAOR 1988). Toutefois, l'utilisation d'un modèle de déformation isopaque et en kink, implique une variation de l'angle de recoupement et une diminution de la flèche de recouvrement lors du franchissement de la rampe (SUPPE 1983).

Si au cours de la formation du pli passif, l'amplitude des cisaillements ne devient plus négligeable, des jeux bancs sur bancs peuvent se produire. Les épaisseurs initiales au toit, ainsi que les longueurs de rampes du toit, vont se modifier.

Si ces variations d'épaisseur de couches ou de longueur de rampes sont quantifiables et imputables à une déformation cisailante pendant la formation du pli passif, elles peuvent se formuler ainsi :

$$l' / l = (T' / T) \cdot (\sin t / \sin t')$$

l = longueur rampe du mur (ou longueur initiale du toit). l' = longueur finale du toit.

t = angle initial entre couche et rampe. t' = angle final.

T = épaisseur initiale au toit. T' = épaisseur finale. (DEPAOR 1988)

Une série de règles décrit plus particulièrement les relations entre quelques éléments structuraux dans l'espace (DIEGEL 1986).

Ces règles ou ces définitions sont particulièrement utiles pour une reconstitution tridimensionnelle des structures à partir de cartes géologiques et plus particulièrement pour reconstituer, à partir des points de branchements, les parties enfouies et érodées des lignes de branchements.

Dans ce cas l'idéal serait de travailler à partir de cartes géologiques à des cotes précises pour s'affranchir des effets de relief (CRANE 1987).

Ces cartes sont réalisables si l'on dispose de renseignements précis en profondeur, sans extrapolation, à partir de données de sondages ou de galeries (pour les mines). Mais très peu de cartes de ce type ont été réalisées, hormis par exemple certaines coupes horizontales du Bassin Houiller du Nord, ou quelques cartes réalisées dans les Alpes par les géologues suisses.

Ces règles topologiques s'énoncent ainsi:

Tous les chevauchements sont bordés par des lignes d'amortissement, des lignes de branchement ou une combinaison des deux. Une écaille est délimitée par deux lignes de branchement, une frontale et une dorsale (Fig 18).

Sur carte un chevauchement montrera une trace soit isolée, soit se branchant par une extrémité ou les deux à un autre chevauchement, soit reliant deux chevauchements entre eux (Fig 15).

Selon le niveau atteint par l'érosion, l'image d'une même structure sur carte sera différente (Fig 16).

Il peut aussi exister une différence d'interprétation à partir de ce que l'on observe en carte et en coupe. Par exemple, une écaille considérée comme entièrement enfouie en coupe peut affleurer latéralement (Fig 17).

Les lignes de branchement d'écailles superposées se croisent en un point (Fig 18).

Sur une même faille de chevauchement, on peut mettre en évidence pour chaque horizon stratigraphique faillé, une ligne de recoupement au mur et une autre au toit (Fig 19).

Si ces deux lignes de recoupement se rejoignent, elles le font le long de la ligne d'amortissement (Fig 19).

Pour une écaille donnée, la ligne de recoupement au mur de l'écaille et celle d'un même horizon stratigraphique au toit se connectent en un point de la ligne de branchement (Fig 20), dans le cas d'un déplacement réduit. Mais si le déplacement excède la longueur initiale de l'écaille, il n'y a plus de connexion.

Et enfin, la ligne de branchement doit contenir tous les points de recoupement de tous les horizons stratigraphiques contenus dans l'écaille (TOWNSEND 1987). C.a.d la ligne de branchement doit joindre toutes les lignes de recoupement de tous les horizons stratigraphiques contenus dans l'écaille.

Finalement chaque règle est valable dans certaines conditions, qu'il faut énoncer, et pour un modèle de déformation donné. Ces règles devraient être définies au préalable, puis tester, quitte à les rejeter par la suite.

De plus il n'y a pas de règle qui à elle seule pourrait se substituer aux autres, chaque règle étant liée au type particulier d'information à notre disposition. Mais en combinant leur utilisation, on peut largement contraindre les problèmes et cerner une interprétation.

METHODE D'INTERPOLATION DES SURFACES PLISSEES.

Il est utile de connaître, au moins l'existence, de certaines méthodes d'interpolation utilisées en géologie pour représenter les limites de couches sur les coupes.

Après avoir établi des points de contrôle fixes, il faut choisir un modèle d'interpolation pour déterminer les points reliant les points de contrôle. Mis à part le dessin à main levée, les méthodes d'interpolation sont nombreuses.

Les interpolations curvilignes peuvent représenter le comportement mécanique visqueux (GOGUEL 1983). Par exemple, peuvent être utilisées, les courbes de Bézières, l'interpolation bissectrice (MAC COSS 1989), les séries de Fourier.

Il en est de même avec les plis en kink ou « en accordéon », formés par des segments ou des panneaux séparés par des charnières plus ou moins ouvertes. Le comportement mécanique représenté est plutôt un matériel à seuil de déformation plastique (GOGUEL 1983).

Du choix du modèle d'interpolation dépend le calcul des longueurs des couches qui servira pour le dépliage.

DEPLIAGE.

A partir de ces interpolations, le dépliage s'effectuera par une remise à l'horizontale des couches et en ramenant l'extrémité d'une couche au toit contre son vis-à-vis au mur (CRANE 1987).

La remise à l'horizontale des couches s'effectue en reportant la longueur des couches et elle suppose, bien sûr, que les couches étaient initialement horizontales, sinon le report peut s'effectuer sur une ligne de référence non horizontale dont on ne connaît pas la longueur, et représentant l'état initial (KLIGFIELD 1986).

L'équilibrage se fait en conservant les longueurs de couches entre la coupe équilibrée et la coupe rétrotectonique.

Une autre façon d'équilibrer consiste à appliquer le principe de conservation des surfaces au cours de la déformation grâce à la méthode des surfaces totales (MENARD 1988).

Ainsi, le raccourcissement ou le nombre d'écaillés peut être estimé, si l'épaisseur stratigraphique E des formations écaillées et la géométrie des failles les délimitant (c.a.d la surface S en coupe du duplex calculée comme l'aire d'un polygone) est connue (Fig. 21).

La longueur des couches L s'estime simplement : $L=S/E$.

Le raccourcissement s'obtient par le rapport entre les longueurs des couches et celle du duplex. Par ce biais le nombre d'écaillés peut être estimé, en considérant que les différentes écaillés présentent une même géométrie (BOYER 1982).

La notion de pli passif implique que des mouvements verticaux sont induits par le déplacement d'une structure chevauchante (MUGNIER 1986).

En faisant abstraction d'éventuels mouvements verticaux sous la surface de chevauchement (liés par exemple à une compensation isostatique par flexion due au chevauchement ou à une déformation d'ensemble de la lithosphère), il est possible d'affirmer que l'amplitude de ces mouvements verticaux est liée à la géométrie de la surface de chevauchement.

A partir de là, le report vertical consiste à déplacer des tranches verticales successives de terrains charriés au dessus de la surface de chevauchement. Cet opération est en fin de compte une simple translation (Fig.22).

Après un déplacement horizontal de Dx, la nouvelle hauteur f() de la surface topographique H() devient

$$f(X+Dx)=F(X+Dx)+H(X)-F(X).$$

Finalement, le calcul de cette nouvelle hauteur peut servir à déplacer le bloc vertical défini par [H(X),F(X)], qui après translation aura pour « coordonnées » [F(X+Dx),f(X+Dx)].

Par ce procédé, il est possible de plier et de déplier une coupe géologique par déplacement des unités charriées le long des surfaces de chevauchement.

Un des avantages de cette méthode est qu'elle permet d'apprécier rapidement le résultat du dépliage de coupes non équilibrées (« d'anciennes coupes » par exemple) ou des coupes se prêtant mal à un équilibrage (avec des variations d'épaisseur ou des biseaux d'érosions). Il faut noter que les surfaces sont conservées, mais pas les longueurs des couches.

Dans ce sens, j'ai mis au point un petit programme informatique. A partir d'une image dessinée, digitalisée ou numérisée, représentant une coupe à déformer, après avoir saisi le tracé de la faille et fixé le déplacement, une image résultante est obtenue que l'on peut déformer ou modifier. Ce programme pourrait être complété par d'autres déformations comme des torsions ou des rotations, ainsi que par un report oblique avec un angle donné.

L'utilisation de méthodes tridimensionnelles s'avère nécessaire s'il est difficile d'obtenir un dépliage correct en coupe. Par exemple, si les différentes unités se déplacent dans des directions divergentes et si des rampes obliques empêchent tout dépliage en coupe.

Le dépliage cartographique consiste à écarter les différentes unités charriées pour les ramener dans leur position initiale (GOGUEL 1939). Cette méthode peut permettre de contrôler encore mieux des interprétations établies à l'aide de coupes, en tenant compte en plus de l'évolution latérale des structures.

Une autre méthode consiste à utiliser les lignes de recouvrements pour construire et ensuite déplier des cartes structurales.

Sur carte, l'intersection entre les lignes d'affleurements et les traces de surfaces de failles donne des points de recouvrements. A partir de ces points, la projection horizontale des lignes de recouvrement, enfouies ou érodées, peut être dessinée.

Le dépliage des structures (plus exactement le jeu rétrotectonique de la faille) s'obtient en reportant les lignes de recoupements au mur et celles au toit d'un même horizon stratigraphique et en ramenant les lignes de recoupement du toit sur celles au mur (ELLIOTT 1980).

Cette translation doit s'effectuer en respectant les directions de déplacement et le jeu de la faille.

FACTEURS COMPLIQUANT L'EQUILIBRAGE.

Ce sont les mêmes que ceux compliquant toute interprétation tectonique en général.

Peu pris en compte, par définition, par les modèles issus des coupes équilibrées, ils ne doivent toutefois pas être négligés.

Les déformations antérieures, synchrones ou postérieures au jeu d'une surface de charriage doivent être isolées ainsi que les érosions correspondantes.

Leur non-prise en compte peut aboutir à des interprétations erronées. Ainsi à partir des recoupements des horizons stratigraphiques par la surface de charriage ou de chevauchement, les volumes manquants sont reconstitués. Mais ces volumes peuvent avoir été érodés, la surface de charriage au mur représentant alors une surface paléo-topographique.

Si le rôle de l'érosion n'est pas reconnu, le risque est important de conclure à l'existence d'une écaille qui n'a jamais existé ou, du moins, de l'impliquer dans le dépliage à un moment où elle n'existait déjà plus.

La prise en compte d'éventuelles déformations antérieures au chevauchement implique qu'au moment de la création du chevauchement les plats n'étaient pas forcément horizontaux et que le pendage des couches et de la surface de chevauchement ne peut se déduire de l'angle de recoupement entre les couches et les rampes (BUTLER 1982).

Dans ce cadre, il est utile de réaffirmer que la localisation des rampes et des plats obéit plus à une logique lithologique (les plats se situent dans des niveaux incompetents et les rampes dans des niveaux compétents) qu'à une logique « géométrique » (les plats sont horizontaux et les rampes inclinées).

Un critère géométrique simple permet d'aider à affirmer qu'un chevauchement recoupe une série déjà plissée ou qu'il a été déformé ultérieurement.

Cette règle dérive de celle qui énonce que les failles de chevauchement montent vers un horizon supérieur dans la direction de déplacement du toit .

Pratiquement, cela permet, en coupe, d'inscrire de chaque côté du plan de chevauchement le sens vers lequel le chevauchement recoupe les couches les plus jeunes (Fig.23). Si ce sens varie, le chevauchement recoupe un ensemble déjà plissé. Au contraire, s'il reste constant, le plissement est postérieur ou synchrone et lié à la formation du pli passif (LISLE 1985).

CONCLUSION.

Aux coupes équilibrées peuvent s'appliquer les remarques générales inhérentes à l'utilisation de tout modèle censé simplifier et reproduire un modèle naturel.

Ainsi modéliser une situation réelle, c'est aussi négliger son caractère spécifique. Mais d'un autre côté, l'abstraction ne peut être poussée trop loin, sinon le modèle élaboré ne traduit plus les traits essentiels de l'objet modelé.

La démarche est donc dans un premier temps d'établir ou de reprendre un modèle relativement simple et ensuite de voir lesquelles des propriétés essentielles sont omises par le schéma final proposé et ainsi le complique.

Dans le cas qui nous intéresse, l'objectif sera donc de confronter les données proprement régionales aux différents concepts et méthodes issues de la notion d'équilibrage. A ce titre, l'intégration de l'influence de l'érosion et de ses conséquences avant, pendant et après les chevauchements est une tâche capitale, ainsi que la prise en compte des données régionales contredisant un modèle de charriage par compression arrière.

PRESENTATION DU SECTEUR ETUDIE

Cadre Géographique de la région étudiée. (Fig.24)

Le domaine étudié, correspondant à la partie méridionale de la basse Provence Occidentale, est situé dans les environs de Marseille (Bouches du Rhône). Les reliefs sont nombreux, mais peu élevés et ils se disposent autour de dépressions.

La chaîne de l'Etoile forme un relief séparant le bassin de l'Arc au nord du bassin de Marseille au sud. Elle s'allonge sur une vingtaine de kilomètres de Septèmes-Les-Vallons, à l'ouest, à Cadolive, à l'est. Elle fait suite à la chaîne de la Nerthe, à l'ouest, et se relie au massif d'Allauch, ou du Garlaban, au sud-est.

Le massif d'Allauch se situe entre le bassin de Marseille et la plaine d'Aubagne, qui le sépare du massif de la Sainte-Baume, dont la crête (la Haute Chaîne) présente un flanc septentrional très escarpé et atteint l'altitude de 1147m à la Croix-des-Béguines, point culminant du secteur étudié.

Le secteur étudié est couvert par les cartes géologiques suivantes éditées par le B.R.G.M :

- Marseille à 1/250 000°.
- Aubagne-Marseille à 1/50 000°.
- Aix-en-Provence à 1/50 000°.
- Martigues-Marseille à 1/50 000°.
- Cuers à 1/50 000°.

Structure géologique.

Le style géologique régional est celui des pays de nappes superficielles, avec décollement de panneaux de couverture sur la base du trias.

Depuis la mise en évidence de ces nappes par M.BERTRAND (1899), les conceptions ont évolué pour aboutir aujourd'hui au schéma général suivant.

Quatre unités principales (ROUIRE 1979), se chevauchant mutuellement, sont distinguées dans la couverture (Fig.25).

Leur disposition générale est celle d'anticlinaux, au front, chevauchant le synclinal de l'arrière de l'unité la plus septentrionale. Du sud vers le nord, quatre unités se succèdent :

L'Unité de Bandol, limitée au nord par le front de chevauchement nord-toulonnais, qui se suit de Sanary, à l'ouest, au sud du Coudon, à l'est, où il s'interrompt par érosion.

L'Unité du Beausset, limitée au nord par le chevauchement sud-provençal (AUBOUIN 1967), qui peut se suivre de l'anse des Laurons à l'ouest (au sud de Martigues) au Camps à l'Est.

L'Unité de l'Arc, limitée par le Front Nord-Provençal (ROUSSET 1973) assez mal individualisé à l'ouest de la faille d'Aix, mais mis en évidence par le sondage d'Eguilles.

L'Unité de la Durance, représentant l'autochtone est affectée par des chevauchements mineurs (Gréoux, Vinon).

Le secteur étudié se limitera au rapport de l'Unité du Beausset avec l'Unité de l'Arc, et plus particulièrement des rapports entre la nappe de l'Etoile et l'unité de l'Arc.

La nappe du Beausset se subdivise en ensembles tectoniques bien individualisés.

Au sud le synclinal du Beausset et ses bordures occidentales (Marseilleveyre, Puget, Carpiagne, le Douard) représentent les arrières de cette unité.

A son front trois écaillés de couverture, représentant le Front de Chevauchement Sud-Provençal, subdivisent la nappe du Beausset. D'ouest en est, la Nerthe méridionale se prolonge par le chevauchement de l'Etoile, auquel succède celui de la Sainte-Baume.¹

Résumé de l'histoire géologique (Fig.26).

Nous ferons débiter ce résumé au Trias, dans la mesure où les formations sous-jacentes ne se rencontrent pas dans le secteur étudié.

Le Trias correspond à un régime de sédimentation lagunaire et marin. Aux épisodes de sédimentation lagunaire correspondent les dépôts de gypses qui représentent la semelle de la couverture décollée.

C'est dans ces formations que se situent les trois niveaux principaux de décollement à la base de la couverture provençale². Les sédiments permien et du Buntsandstein (Trias inférieur) sont adhérents au socle et forment son tégument.

Puis durant tout le Jurassique et le Crétacé inférieur va s'établir un régime de plateforme carbonatée.

Dans notre secteur apparaît à l'Aptien-Albien un « sillon » de direction ONO-ESE (MASSE et PHILIP 1976) localisable de la Nerthe autochtone au sud du Massif d'allauch et de la Sainte-Baume permettant d'établir une différenciation paléogéographique avec les mêmes formations situées plus au sud. Au nord de ce « sillon » ces formations manquent.

En effet, au Crétacé moyen vont intervenir des changements paléogéographiques importants avec l'émersion de zones plus ou moins étendues.

¹ Il faut rattacher au chevauchement de la Sainte-Baume, les chevauchements de l'Olympe et de l'Aurélien, au nord, lui conférant une amplitude de recouvrement de vingt kilomètres, comparable à celle du chevauchement de l'Etoile (GUIEU et ROUSSET 1979).

² Trois niveaux de décollement sont distingués : deux dans le Muschelkalk et un dans le Keuper (CARON J-P. 1968).

Cette « phase » d'émersion, liée à des bombements à grand rayons de courbure, peut être datée de la fin de l'Albien et du début du Cénomaniens¹ (ROUSSET 1968).

Ensuite une nouvelle transgression s'amorce, installant de nouveau un régime de plateforme carbonatée, avec des apports détritiques importants, du Cénomaniens supérieur au Santonien.

De nouveau une régression généralisée entraîne une émersion et un régime de sédimentation continentale dans des dépressions orientées E-O (Bassin de l'Arc et du Beausset). Au Maastrichtien, les premières manifestations de la tectogenèse pyrénéo-provençale apparaissent (DENIZOT 1935).

La couverture commence à se décoller en se plissant, selon une pente globalement inclinée au nord, produisant des plis à regard nord (le flanc nord des plis étant plus redressé que le flanc sud) (LUTAUD 1957).

Ces anticlinaux en cours de surrection et d'érosion vont fournir un abondant matériel détritique (Brèches des Cadenaux).

Durant l'Eocène, jusqu'au Lutétien, la sédimentation fluviolacustre va se poursuivre. Les déformations majeures liées à la tectogenèse pyrénéo-provençale se produisent au Lutétien supérieur (Bartonien).

Les chevauchements, qui en résultent, traduisent les effets des processus morphotectoniques accomplis depuis le Maastrichtien. Les plis ébauchés et érodés au Maastrichtien se rompent le long de leur cœur où le Trias devait affleurer (LUTAUD 1935).

Le décollement de la couverture se produit par suite d'un chevauchement du socle dont la composante verticale favorise l'apparition d'une pente, au toit du socle, vers le nord.

¹ La notion de bombements s'est substituée à l'ancienne conception d'un isthme durancien unique. Trois bombements sont distingués pour chaque unité : le bombement de la zone nord provençale propre à l'unité de la Durance, le bombement varois pour l'unité de l'Arc et le bombement sud-provençal pour l'unité du Beausset (ce dernier étant localisé au nord de Toulon, au Revest) (ROUSSET 1968).

Cependant, d'après certains auteurs (GUIEU et ROUSSEL 1990), le décollement de la couverture serait uniquement gravitaire (sans poussée arrière)¹.

La couverture glisse vers le nord et se déchire sur ses arrières. Ainsi, le chevauchement de l'Etoile se détache de l'Unité du Beausset, créant une déchirure tectonique à l'emplacement du bassin de Marseille (GUIEU 1968).

Le vide ainsi créé se comble au cours de l'Oligocène, à partir du Stampien², et une puissante sédimentation détritique se localise dans cette dépression (Bassin de Marseille).

Mais, avant la mise en place des chevauchements au Bartonien (à la fin de l'Eocène), la couverture était déjà découpée par un réseau de failles E-O à NE-SO et plissée selon des directions E-O à ONO-ESE (GUIEU 1968, DURAND 1980, GUIEU et TEMPIER 1985, TEMPIER 1987).

L'exemple le plus significatif dans le secteur de l'Etoile est fourni par le Massif d'Allauch associé à une paléostructure, héritée des mouvements albo-cénomaniens, au moment de la mise en place de l'Etoile (GUIEU et TEMPIER 1985).

Ce paléorelief était affecté sur ses bordures par des failles normales de direction N40° environ et aurait temporairement bloqué la base de la nappe (et notamment les séries entraînées) remobilisant ces failles normales en décrochements sénestres (GUIEU et TEMPIER 1985).

A la fin de l'Oligocène, des mouvements verticaux se produisent, entraînant le soulèvement en horst du massif d'Allauch.

Les failles du Marseillais à l'est et de l'Amandier au nord témoignent de ce soulèvement, pendant que la couverture charriée, dont il ne subsiste actuellement qu'une klippe (le pli du Garlaban), s'érode, faisant apparaître l'autochtone en fenêtre tectonique.

¹ L'influence prépondérante de la gravité avait déjà été envisagée (GOGUEL 1943) en supposant un exhaussement du socle de la bordure septentrionale du bassin du Beausset, notamment à Carpiagne (GUIEU 1967).

² Toutefois la période de mise en place du chevauchement de l'Etoile pourrait se situer dans l'intervalle Ludien-Stampien basal au vu de l'âge des premiers dépôts du bassin de Marseille si l'on suppose une sédimentation synchrone de l'ouverture par déchirure tectonique (ASSAS à paraître 1991).

Le bassin de Marseille est affecté par une distension qui perdure de l'Oligocène à l'Aquitanién (NURY et RAYNAUD 1985).

La glyptogénèse oligocène, en nivellant les reliefs et en comblant les dépressions, prépare une surface d'abrasion marine pour la transgression marine du Miocène (ROUSSET 1975).

La fin du Miocène est marquée par une régression marine dont sont responsables les mouvements liés à la tectonique alpine.

A la période Miocène terminal-Pliocène est attribué un basculement de la Provence vers le sud, inversant le sens d'écoulement de la plupart des cours d'eau (GUIEU et ROUSSET 1980).

Au Quaternaire, des mouvements épirogéniques conjugués à des oscillations glacio-eustatiques permettent le creusement des Calanques.

Enfin, des travaux récents permettent de penser que la Provence dans son ensemble est encore actuellement soumise à une compression subméridienne (PHILIP 1983, COMBES 1984).

PROBLEME DE METHODOLOGIE LIES AU DEPLIAGE.

Les problèmes de méthodologie, propres à la région provençale, que l'on peut rencontrer si l'on veut construire une coupe équilibrée ont déjà été évoqués (TEMPIER 1988).

Ainsi, puisque le socle n'affleure pas et en l'absence de données géophysiques de subsurface, la forme exacte du toit du socle et de son tégument, ainsi que son implication éventuelle dans les mouvements tangentiels, n'est pas connue directement.

Elle s'apprécie à partir des épaisseurs supposées de la couverture et de l'interprétation que l'on se fait de l'ampleur des recouvrements.

Le mode de déformation des roches présente aussi une grande importance, dans la mesure où la construction d'une coupe équilibrée nécessite une conservation de matière au cours de la déformation.

Les phénomènes de pression-dissolution (par stylolitisations) sont très fréquents et ils remobilisent probablement une quantité appréciable de matière produisant des transferts de matière.

Dans un plan de coupe ce transfert peut provoquer une variation de surface et peut rendre problématique l'équilibrage (MENARD 1988).

L'importance de ce changement de surface est fonction de la taille du système clos dans lequel se produisent les transferts. Si la taille du système clos est très inférieure à celle des structures, les phénomènes de pression-dissolution peuvent alors être négligés (MUGNIER Communication personnelle).

La construction de coupes équilibrées concerne généralement des régions de tectonique monphasée ou considérée comme telle (TEMPIER 1988). Or en Provence, l'existence de structurations antérieures à la mise en place des nappes est prouvée (« phases » albocénomane et maastrichtienne).

Habituellement, le dépliage d'une coupe équilibrée se fait en choisissant un horizon repère que l'on va suivre de l'avant-pays vers l'arrière-pays. Il faut pour cela disposer de données précises sur sa profondeur, sur toute la longueur de la coupe que l'on souhaite réalisée.

Le choix d'un unique niveau s'avère souvent très difficile et il serait nécessaire d'en changer d'un segment à l'autre d'une coupe (MUGNIER et VIALON 1976).

Le premier critère est celui de la compétence. Mais, l'horizon choisi doit présenter une déformation interne faible. Il doit aussi se présenter de la manière la plus continue possible sur toute la longueur de la coupe. Il faut donc choisir un niveau repère bien contraint cartographiquement, avec un maximum de points de contrôle.

Aucun niveau repère ne peut vraiment jouer ce rôle. Il ne peut se choisir plus bas stratigraphiquement que le Jurassique supérieur ; ces formations affleurant très localement.

Il ne peut se placer dans l'intervalle Jurassique supérieur-Crétacé moyen du fait des lacunes dues à la phase albo-cénomaniennne, ainsi que de sa position basse par rapport à certaines écailles para-autochtones.

Beaucoup d'écailles para-autochtones ne contiennent pas de termes du Jurassique supérieur au Crétacé moyen. Enfin les terrains plus récents (Crétacé supérieur à Eocène) n'affleurent largement que vers l'avant-pays, dans le bassin de l'Arc ou sur les arrières de l'Unité du Beausset (Synclinal du Beausset).

Enfin la réalisation de coupes équilibrées au travers de structures présentant des variations latérales très rapides ne serait pas des plus judicieuses. Il faudrait en réaliser plusieurs à quelques kilomètres d'intervalle, et parfois moins, selon une direction constante correspondant à la direction de déplacement de la nappe.

La conjugaison de toutes ces raisons fait qu'il est préférable d'utiliser un dépliage cartographique, qui nous fournira plus directement une image du dispositif structural avant la mise en place de la nappe, et d'appliquer certains principes issus des coupes équilibrées pour déplier, pas à pas, les unités entraînées.

Le dépliage proposé s'affranchira dans une certaine mesure des données non connues, comme la profondeur du socle (puisqu'aucune donnée en profondeur n'est présentée).

Il faut noter que les coupes déjà réalisées et publiées présentent un degré de précision maximal, limité par les incertitudes concernant leur prolongation en profondeur.

Ainsi la morphologie précise de l'autochtone sous les unités charriées n'est pas connue avec précision ainsi que sa limite méridionale (« la rampe du mur initiale » ou la patrie de la nappe).

Dans ces conditions, il m'a paru préférable d'utiliser certaines techniques issues des coupes équilibrées pour déplier, pas à pas, les unités charriées. Cela, je l'espère, permettra de ne pas semer d'illusions sur les conditions de construction d'une coupe équilibrée et évitera toute polémique sur sa validité éventuelle.

Des coupes équilibrées ont déjà été présentée en Provence, mais en dehors du secteur étudié (TEMPIER 1987). Mais il faut noter qu'elles ont été réalisées à une échelle assez petite (le 1/100 000°), que la couverture est réduite à deux niveaux (le Jurassique et le Crétacé).

Dans notre cas, le dépliage des unités para-autochtones nécessiterait de présenter en coupe des niveaux discontinus, de faible épaisseur à l'échelle de la coupe, mais qui présentent une importance cruciale pour déterminer l'ampleur du dépliage.

D'autre part, nous ne déplions que les unités para-autochtones et non pas toutes les unités charriées.

Le dépliage s'effectuera logiquement de l'avant-pays vers l'arrière-pays, pour estimer les déplacements et les positions initiales avec une précision maximale ; le rejet des écaïlles les plus para-autochtones étant toujours le mieux connu.

Lors de l'avancée de la nappe de l'Etoile sur l'unité de l'Arc, des écaïlles ont été arrachées au substratum autochtone.

Le principe général de dépliage de ces unités consiste donc à localiser les traces de ces arrachements, et si possible en déduire la morphologie générale de l'autochtone sous le recouvrement de la nappe, en utilisant des données paléogéographiques et stratigraphiques connues (notion de Bombement varois à l'Albo-Cénomaniien (ROUSSET 1969) et de sillon apto-albien sur sa bordure Sud-Ouest (MASSE et PHILIP 1976).

Lorsque cela sera possible, nous pourrons replacer les écaïlles para-autochtones dans leur position originelle.

Mais de manière générale, le repositionnement de toutes les séries entraînées se fera en se repérant par rapport à l'autochtone qu'elles chevauchent et, de proche en proche, par rapport à la position des écaïlles précédemment dépliées pour obtenir et insérer ce dépliage dans un schéma paléogéographique cohérent, habituellement proposé.

LE DEPLIAGE DES SERIES PARAUTOCHTONES DU CHEVAUCHEMENT DE L'ETOILE

APERCU SUR LA STRUCTURE DE L'AUTOCHTONE CHEVAUCHE.

Cet autochtone correspond à deux secteurs différents. A l'ouest, l'Etoile chevauche le flanc nord de la Nerthe correspondant à la bordure méridionale plissée du bassin de l'Arc. Alors qu'à l'est, elle chevauche un autochtone constitué par les assises fluvio-lacustres du bassin de l'Arc (ou bassin de Gardanne).

La Nerthe septentrionale autochtone.

Cette unité est en continuité avec le bassin de l'Arc, dont elle forme le soubassement.

Dans cette partie de la Nerthe autochtone, les affleurements sont orientés ONO-ESE jusqu'à Ensues-La-Redonne, dans sa partie occidentale, s'infléchissant vers le NE en s'orientant OSO-ESE par suite d'une torsion tectonique due au chevauchement de l'Etoile, pour sa partie orientale (GUIEU 1968, 1979).

Le bassin de Gardanne.

Au front du chevauchement de l'Etoile, l'autochtone est représenté par une puissante série de dépôts fluvio-lacustres déposés du Valdonien¹ à la fin de l'Eocène. Ces séries reposent sur du Santonien marin (Dôme du Regagnas).

Cet autochtone est caractérisé par la présence d'une lacune stratigraphique dans l'intervalle Jurassique supérieur-Santonien dans le massif du Regagnas. Cette lacune a été retrouvée en sondage près de Gardanne dans un intervalle Hauterivien-Santonien (DUFURE).

¹Les étages locaux Valdonien et Fuvélien ainsi que le Bégudien et le Rognacien sont les équivalents continentaux des étages marins Campanien et Maastrichtien.

Cette lacune correspond à la « phase » albo-cénomaniennne, responsable de la création de bombements à grand rayons de courbure entraînant l'émergence de zones où de la bauxite va se former.

Cette lacune ne se retrouve plus dans la Nerthe autochtone, où une succession plus complète peut s'observer (avec une légère discordance sous le Cénomanienn traduisant encore les effets du bombement mais sans émergence).

Les formations apto-albiennes à faciès siliceux y sont bien développées et elles se retrouvent dans une unité para-autochtone entraînée (l'écaille de Simiane-Mimet) par le chevauchement de l'Etoile.

LES UNITES TECTONIQUES DU CHEVAUCHEMENT DE L'ETOILE.

La nappe de l'Etoile et ses unités annexes chevauche le bassin de l'Arc.

Elle appartient à l'unité du Beausset et présente une succession complète du Trias au Crétacé supérieur marin. Pour bien cerner sa structure, on la découpe classiquement en sept unités allochtones et para-autochtones (GUIEU 1968) (Fig.27).

Au front du chevauchement de l'Etoile se situent trois unités para-autochtones, arrachées au substratum autochtone :

Le lambeau de Gardanne (Unité VII) constitue l'unité la plus externe du complexe para-autochtone de l'Etoile. Il est constitué par les séries fluviolacustres du Valdo-Fuvélien et du Bégudo-Rognacien arrachées au bassin de l'Arc. Le contact avec l'autochtone du bassin de l'Arc se fait par l'intermédiaire de la faille de la Diote.

L'écaille de Simiane-Mimet (Unité VI). Elle est constituée d'Aptien mais surtout d'Albien (MASSE 1988). Elle se présente comme une longue bande que l'on peut suivre des Pennes-Mirabeau (Flanc nord de la Nerthe autochtone) jusqu'à St-Savournin où elle s'effile et disparaît.

Cette écaille est affectée de replis serrés et des duplicatures. Au nord elle repose par l'intermédiaire de la faille du Safre sur l'Unité VII.

Le lambeau de Sousquières (Unité V). Il représenterait une partie du flanc nord de la Nerthe entraînée sous le chevauchement de l'Etoile (GUIEU 1968).

Il repose par l'intermédiaire d'un plan de faille plat ou légèrement penté au nord (20° vers le NE) sur l'Écaille de Simiane-Mimet. Les termes de cette écaille verticale vont du Dogger au Barrémien, soit une puissance de 1500m environ pour une tranche verticale actuelle de 250m.

Les unités suivantes (I à IV) représentent l'allochtone proprement dit :

Le Trias de St-Germain (Unité IV). Cette unité en position de klippe reposant sur l'unité VI peut être rattachée au Trias constituant la base du chevauchement de l'Etoile, affleurant sporadiquement le long d'une « bande triasique » qui se suit du Jas de Rhodes à l'Ouest jusqu'à Pichauris à l'Est.

Le synclinal du Pilon du Roi (Unité III). Cette unité d'allure dissymétrique est concée entre deux failles, la faille du Pilon du Roi au sud et l'axe triasique au nord (accident majeur de l'Etoile). Ces deux failles se rejoindraient vers 700m de profondeur sur la transversale du Pilon du Roi (GAVIGLIO et al. 1985).

Cette unité est essentiellement constituée par des séries du Kimméridgien au Barrémien, et peut s'interpréter comme un coin extrusif (un « pop-up ») au Front de l'Etoile (ASSAS à paraître).

La zone centrale dolomitique (Unité II). Il s'agit d'une unité massive, caractérisée par les faciès dolomitiques du Jurassique supérieur au Néocomien, qui se retrouvent une vingtaine de kilomètres au Sud, dans le massif de Carpiagne.

Le contact avec l'Unité I se fait par l'intermédiaire de la faille subverticale de la Mure affaissant l'unité I de près de trois cent mètres par endroits.

Le versant méridional ou l'anticlinal de la Mure (Unité I). D'âge essentiellement Néocomien et Barrémien, elle est bordée au sud par des failles d'effondrements qui la mettent en contact avec l'Oligocène du bassin de Marseille.

L'ÉCAILLE DE GARDANNE. (Unité VII)

L'Écaille de Gardanne, ou « Lambeau de poussée » de Gardanne (BERTRAND 1898) montre des formations situées dans l'intervalle Valdonien-Rognacien.

Cette écaille est une unité para-autochtone arrachée à la bordure méridionale du Bassin de l'arc.

Elle est limitée au nord par la faille de la Diote qui la met en contact avec le bassin de l'Arc (ou de Gardanne) autochtone.

La faille de la Diote est une surface de chevauchement dont le rejet s'amortit à l'ouest (vers Cabriès). Vers l'est, elle passe à une rampe latérale : la faille de Fontbelle (GAVIGLIO 1985) qui se branche sur la faille du Safre vers St-Savournin.

Selon les schémas établis de la géométrie des surfaces de chevauchement (BOYER 1982), la faille de la Diote est une rampe frontale avec un point d'amortissement à l'ouest et une rampe latérale à l'est.

Le point de branchement correspond à l'intersection entre la faille de Fontbelle et la surface de chevauchement dorsale, la faille du Safre. Ce point est purement cartographique et il ne s'observe pas sur le terrain.

Ce point de branchement nous permettra de construire la ligne de branchement enfouie entre le chevauchement de la Diote et celui du Safre.

A la suite de l'exploitation souterraine des lignites du bassin de Gardanne (et du creusement de la galerie à la mer de 1896 à 1906), de nombreuses études ont permis de mettre en évidence (BERTRAND 1898), puis de préciser la géométrie du chevauchement du lambeau de poussée de Gardanne sur le bassin de l'Arc.

Ainsi il a été établi que la faille de la Diote a un plongement de 30° environ vers le sud et celle du Safre de 20° vers le sud.

La surface de chevauchement présente une partie en décollement dans les marnes de la base du Valdonien (DESCHAMPS 1966). Les plats du mur et du toit se situent donc à ces niveaux.

Ensuite la surface du chevauchement remonte dans la série avec une morphologie listrique pour donner une rampe qui présente une inclinaison moyenne de 30° vers le sud, avec des variations de 26° à 40° (DESCHAMPS 1966).

Les données microtectoniques (GONZALES 1989, GAVIGLIO 1985) montrent qu'au point d'amortissement (vers Cabriès) des micro-décrochements sénestres de direction subméridiennes peuvent marquer l'amorce d'une rotation¹ à partir d'une rampe latérale occidentale présentant un rejet négligeable.

Le long de la rampe latérale orientale des microdécrochements dextres subméridiens expriment le mouvement de rotation de sens direct de l'écaïlle.

Il faut noter que compte tenu de la puissance des formations de l'écaïlle, l'épaisseur stratigraphique du lambeau de Gardanne est d'environ 1000 m. L'épaisseur du Fuvélien (300 m) diminue vers le nord (250 m à Fuveau) et vers l'est (150 m à Trets).

Le lambeau de Gardanne représente pratiquement le dépointe du bassin sédimentaire fuvélien, le point central où la subsidence est la plus forte (DURAND 1980). La limite méridionale du bassin de l'Arc au Fuvélien pourrait donc se placer à quelques kilomètres au sud du lambeau, replacé dans sa position originelle (DURAND 1980) (Fig.28).

Mais dès le Bégudien, l'étendue du bassin se réduit sensiblement. La limite méridionale du bassin correspond à peu près à la limite actuelle (DURAND 1980).

¹ La localisation exacte du point d'amortissement est évidemment difficile à préciser sur le terrain dans la mesure où il marque la limite où la faille disparaît.

Ses bordures méridionales sont marquées par la formation de la brèche des Cadeneaux, témoignant de la crise tectonique « antémaastrichtienne » (DENIZOT 1935) et du démantèlement concomitant de ses bordures.

Les assises valdo fuvéliennes de ces bordures ont du être alors largement érodées lors de la surrection de ces reliefs et il faudra en tenir compte lors des reconstitutions.

La localisation du point d'amortissement vers Cabriès s'explique, peut être, par les variations d'épaisseurs dans le remplissage sédimentaire du bassin de Gardanne (GONZALES 1989).

Vers l'ouest et le nord de ce point, les formations éocènes sont largement développées et très épaisses (600m environ). Alors qu'à l'est, l'Eocène est pratiquement absent.

La limite d'érosion actuelle de l'Eocène correspond à peu près à celle existante avant l'écaillage du lambeau de Gardanne (DURAND 1980). L'épaisseur moindre des formations sédimentaires à l'est du point d'amortissement a pu favoriser la formation de cette écaille par un moindre blocage lors de l'avancée de la nappe de l'Etoile (GUIEU 1968).

Dépliage cartographique avec les lignes de recoupements.

Toutefois, la géométrie de la faille de la Diote peut se déduire, même approximativement, des observations de surface en utilisant des cartes de projection, dans un plan horizontal, des lignes de recoupements et du tracé de la surface de chevauchement en surface (Fig.29).

Cette méthode a été prolongée pour permettre le dépliage¹. Il suffit de raccorder les lignes de recoupements au toit à leur vis-à-vis au mur.

Dans la mesure où les structures évoluent, latéralement très rapidement, ce type d'analyse tridimensionnelle, combinée à l'utilisation des coupes géologiques déjà réalisées s'avère plus judicieuse.

¹ Une autre méthode cartographique consisterait à déplier le lambeau de Gardanne en faisant correspondre les auréoles concentriques des lignes d'affleurement du lambeau avec celles du bassin de Gardanne. Mais il faut noter que la forme concentrique de la ligne d'affleurement au toit d'une écaille chevauchante est la traduction cartographique de la formation d'un pli passif lors du franchissement d'une rampe (Fig.30).

Dans un premier temps, il faut proposer une reconstitution de la géométrie de la surface du chevauchement de la Diote, correspondant au contact anormal entre l'autochtone du bassin de l'Arc et l'écaille de Gardanne. Ce qui revient à reconstituer une partie du toit de l'autochtone enfouie sous le chevauchement.

La méthode des lignes de recoupement¹ peut s'avérer intéressante dans la mesure où, au mur et au toit, du chevauchement de la Diote peuvent s'observer des points de recoupement communs à un même horizon stratigraphique.

Un point de recoupement se définit, cartographiquement, comme l'intersection entre la ligne d'affleurement d'un horizon repère et la trace du chevauchement considéré. Ce point est géométriquement l'intersection de la ligne de recoupement de cet horizon avec la surface topographique.

Plus précisément, les points de recoupement utilisés sont les sommets du Rognacien et du Bégudien à partir de la carte géologique de Marseille à 1/250.000°.

Avec la carte Aix en Provence à 1/50.000°, deux points de recoupement supplémentaires, représentant des contacts entre des formations calcaires et argileuses au sein du Rognacien, sont disponibles (Fig.31).

Le dépliage² peut s'effectuer de deux manières selon que l'on peut tracer avec précision les lignes de recoupement au mur et au toit de la surface de chevauchement, si la géométrie de la faille est bien connue, ou que le rejet est bien connu.

En estimant le rejet horizontal à 1,4 Km (Fig.32), la démarche est la suivante :

1) Le dépliage s'effectue en faisant subir une rotation rétrograde (dont le centre est le point d'amortissement) avec un rejet horizontal de 1,4Km sur la ligne où il est connu. (Il est estimé d'après la coupe Fig.32).

¹ Une ligne de recoupement est définie comme l'intersection entre une surface stratigraphique et une surface de chevauchement.

² Pour déplier, on utilise une feuille de calque (GOGUEL 1936) et dans ce cas, le dépliage est de type plis semblables, analogue à l'algorithme proposé P.XX.

2) Les lignes de recoupement au mur du chevauchement de la Diote sont obtenues en reliant les points de recoupement affleurant au mur et ceux au toit après rotation.

Si le tracé des lignes de recoupement sur la surface de chevauchement pourrait raisonnablement s'estimer, ces deux premières étapes deviendraient :

1) Les lignes de recoupement au mur du chevauchement de la Diote sont obtenues à partir des points de recoupement affleurants au mur, de la pente et de la morphologie de la surface de chevauchement ainsi que du pendage des couches, faiblement penté vers l'ouest.

2) Avant la mise en place du chevauchement, les lignes de recoupement au toit et au mur d'un même niveau stratigraphique étaient en contact.

Le dépliage s'effectue en ramenant les points de recoupement au toit au contact des lignes de recoupement au mur dans le sens inverse du déplacement.

Le dépliage est réduit à une rotation rétrograde dont le centre est le point d'amortissement (Fig.33), qui crée l'illusion d'un décrochement dextre cartographique le long de la faille frontale.

Le rejet est croissant à partir du point d'amortissement. Le rejet considéré est le rejet horizontal et non le rejet vrai.

Compte tenu de la faible pente du chevauchement, ces valeurs sont peu différentes.

3) A l'issue de cette étape, un hyatus apparaît puisque le point de recoupement au toit n'est pas celui qui était en contact avec celui du mur.

Ce « vide » correspond à une partie de la tête anticlinale du pli passif lié au chevauchement qui a été érodée pendant ou après sa mise en place.

Elle peut être reconstituée en prolongeant la ligne de recoupement au toit, du point de recoupement au mur à celui du toit. (Fig.33)

4) En ramenant, de nouveau, les lignes de recoupement complétées dans leur position actuelle, la partie érodée du lambeau de Gardanne et son étendue peuvent être reconstituée (Fig.34)

5) La ligne OA la plus frontale est la ligne d'extrémité frontale (Fig.33). Cette ligne est actuellement érodée. Au point A cette ligne se branche et s'enfouie sous le chevauchement du Safre et son tracé devient incertain. Mais on sait que de telles lignes présentent des allures elliptiques (Diegel 1987).

Elle doit rejoindre la ligne d'amortissement (correspondant au point d'amortissement à l'ouest).

Vers l'arrière, cette ligne de branchement de la faille de la Diote avec la faille du Safre a été fixée en fonction de la coupe (Fig.32) qui tient compte des travaux miniers dans l'écaille (exploitation des lignites) qui ont approché de la faille du Safre.

Dépliage en coupe avec un programme informatique

Une autre méthode de dépliage utilisée consiste à reporter, à partir d'une coupe représentant l'écaille de Gardanne et son avant pays, les tranches verticales de terrains placées dans leur position originale.

L'aspect théorique de cette méthode est exposée dans le chapitre sur la géométrie des surfaces de chevauchement. L'image du départ est une représentation d'une coupe dans le lambeau de Gardanne (Fig.32) numérisée avec un scanner à main (Fig.35).

Ensuite après avoir :

- 1) chargé l'image en mémoire à l'écran.
- 2) fixé les lignes le long desquelles on va déplier.
- 3) fixé une position au mur et la position au toit correspondante après pliage-dépliage.

le programme peut déplier-plier la coupe.

On obtient la Fig.36, représentant la coupe dépliée.

Avec le même raisonnement que la méthode précédente, on peut reconstituer la surface manquante. Il suffit de compléter le vide de la coupe obtenue en prolongeant les limites des formations jusqu'à leur équivalent au mur (Fig.37).

De même, la forme finale du pli anticlinal passif lié au chevauchement peut-être reconstituée en remplaçant le point de recoupement au toit dans sa position actuelle (Fig.38).

L'exemple traité (Fig.32 et 35) pourrait soulever un léger problème d'interprétation, puisque l'état initial semble plus plissé que l'état final !.

Mais il s'agit d'un « artefact » lié au fait que la ligne représentant la surface de chevauchement est une ligne segmentée. Ceci nous indique qu'il vaudrait mieux utiliser une interpolation curviligne entre les points de contrôle, plutôt qu'une interpolation linéaire.

En agrémentant ce programme d'une interface plus conviviale et avec un module de dessin¹, on pourrait certainement arriver à modifier de manière satisfaisante le dessin de départ et notamment le tracé de la faille. Il faut remarquer que ce programme déplie et plie en conservant les surfaces (de par les fonctions utilisées).

Surtout, son intérêt réside dans sa possibilité de reprendre rapidement des coupes non modélisées et non équilibrées.

Une autre modification pourrait consister à utiliser, non plus seulement un report vertical mais un report selon un certain angle. Ainsi les charnières des plis passifs ne serait plus verticales mais obliques (voir modèles de Suppe dans géométrie des surfaces de chevauchement).

Comparaison du dépliage en carte et du dépliage en coupe

Les résultats des deux approches peuvent se comparer en s'attachant plus particulièrement aux niveaux érodés qu'il a fallu reconstitué.

Dans les deux cas, il nous faut rajouter des niveaux jusqu'au C7c (le Bégudien), ce qui nous permet d'établir une bonne cohérence entre ces deux approches.

¹ Pour l'instant, seul le chargement d'une image (limitée à la surface de l'écran 640*400 points) ainsi qu'une édition sommaire des lignes limitant la surface de faille est disponible (réalisé sur un Atari St). L'interface graphique ainsi qu'une édition des lignes plus sophistiquée est en cours de réalisation.

La faille du Safre

Il s'agit du chevauchement frontal de l'écaille de Simiane-Mimet. Le long de cette faille se rencontrent d'ouest en est des calcaires santoniens, des calcaires cénomaniens, des grès turoniens et des calcaires santoniens (GUIEU 1968).

Ils sont renversés et peuvent avoir valeur de crochons de faille vue leur faible épaisseur stratigraphique. Les anglo-saxons nomment un tel type d'écailles « horse » (Boyer).

La dernière lame de calcaire santonien se poursuit dans la faille du Safre entre l'écaille de Simiane-Mimet et l'autochtone (un peu plus à l'est que le point de branchement entre la faille de la Diote et la faille du Safre).

Ceci nous indique que puisque la lame de Santonien a été entraînée à la fois sous l'écaille de Simiane-Mimet et la nappe de l'Etoile :

la nappe de l'Etoile a entraîné l'écaille de Simiane-Mimet. Ensuite ces deux unités ont ensemble écaillé l'autochtone pour donner le lambeau de Gardanne, après avoir raboté des couches qui affleuraient entre ces deux écailles. On peut ainsi définir une séquence prograde (MUGNIER 1989) d'écaillage de l'autochtone.

L'écaille de Simiane-Mimet.

Cette unité se présente comme une bande étroite (2km à l'affleurement au maximum dans une direction nord-sud) d'une longueur de 15 Km environ. Elle se suit des Pennes-Mirabeau à l'ouest jusqu'à St Savournin à l'est. A ce niveau, l'écaille s'enfouit sous le chevauchement de l'Etoile. Elle est formée de calcaires et de marnes de l'aptien-albien¹.

¹ Comparable aux formations du même âge qui se retrouvent dans le Nord de la Nerthe et autour du massif d'Allauch (la Rouvière, les Pestiférés, le Bec Cornu).

Bien que la structure interne de l'écaille n'apparaisse pas avec netteté, elle est considérée comme une écaille faite de plusieurs écailles se chevauchant l'une sur l'autre comme le suggère la réapparition à plusieurs reprises des calcaires bédouliens (GUIEU 1968).

Des intercalations de calcaires Barrémiens s'y rencontrent aussi, suggérant des écaillages du Barrémien. Le nombre de duplicatures a été évalué à quatre sur le Méridien des Putis (coupe Fig.39) (GUIEU 1968).

Sachant que l'épaisseur stratigraphique des formations de cette écaille (surtout constituée de marnes albiennes) est de 200m (MASSE P.J.L 1988), il est possible en calculant la surface actuelle de l'écaille dans le plan d'une coupe de calculer la longueur initiale de cette écaille (Fig.39) (méthode des surfaces totales).

Cette longueur initiale pour une coupe sur le méridien des Mérentiers donne 3,5 km au minimum environ pour une largeur actuelle de 2km environ.

Il est possible qu'une partie de cette surface ait été érodée (la partie correspondant à une tête anticlinale générale liée à la surface de chevauchement du Safre).

Dans ce cas, l'écaille de Sousquières reposant sur l'écaille de Simiane-Mimet par l'intermédiaire d'une surface de faille plate (parfaitement visible dans le cirque de Sousquières) aurait scellé une structure érodée et se serait mise en place après l'écaille de Simiane (cas d'une séquence rétrograde).

Il en est de même si l'écaille de Sousquières « scelle » l'écaille de Simiane-Mimet car la surface de chevauchement est plate et non déformée. En effet, si l'écaille de Sousquières avait chevauché la bande aptienne avant son écaillage, sa surface de chevauchement aurait été déformée et non plane.

Ainsi, si une séquence prograde peut-être envisagée pour les deux premières écailles (Gardanne et Simiane-Mimet), des séquences plus complexes semblent se produire rapidement vers l'arrière-pays.

Rapport entre l'autochtone, l'écaille de Gardanne et l'écaille de Simiane-Mimet

On peut schématiser les relations structurales entre ces écailles et l'autochtone en appliquant quelques règles structurales.

Les règles structurales sont les suivantes :

1) Les chevauchements sont conformes à la règle qui stipule que normalement le long d'une surface de chevauchement, des couches plus vieilles chevauchent des couches plus jeunes.

2) Les surfaces de chevauchement remontent dans la série stratigraphique dans le sens du déplacement.

Avec un ensemble initialement horizontal, on obtient la figure 40 qui reconstitue schématiquement les rapports initiaux entre ces écailles.

Mais il faut tenir compte qu'avant l'écaillage de l'autochtone celui-ci était déjà structuré.

Plus précisément au Bégudien (Maastrichtien) se sont érigés des reliefs liés à des plissements des bordures du bassin de l'arc, qui ont alimenté ces bordures en brèches.

De plus, il faut remarquer que l'homogénéité dans la constitution stratigraphique de chacune des écailles est remarquable. Une écaille ne contient jamais de formations du même âge que celle qu'elle chevauche. C'est d'ailleurs une raison essentielle qui fait que le dépliage proposé est minimum :

1) Il n'est pas possible de raccorder précisément et directement ces écailles. Elles ne présentent pas de point de recoupement commun dont l'un serait le vis-à-vis de l'autre.

Et de plus, la base de l'écaille frontale est plus haute (d'un point de vue stratigraphique) que le sommet stratigraphique de l'écaille dorsale.

2) Le plat ou la distance entre chaque écaille peuvent être plus grand.

On est donc conduit à proposer un autre schéma qui tient mieux compte des données observées. (Fig.41)

L'écaillage se fait sur une paléotopographie dont les couches devaient penter faiblement vers le nord (la largeur d'affleurement de l'écaille de Simiane-Mimet reconstituée étant de 3,5 km, l'épaisseur des formations qu'elle contient de 200m, on obtient une pente certes très faible (3 degrés).

Mais l'introduction d'une paléotopographie nous évitera de faire intervenir des volumes qui n'ont pas existé (qui ne se sont pas déposés), par exemple les formations bégudiennes, ou qui n'existaient pas au moment de l'écaillage, le Valdo-fuvélien au dessus de l'écaille de Simiane-Mimet et des calcaires du Crétacé supérieur marin.

Si les écaillages successifs de ces unités para-autochtones sont présentées sous forme d'un diagramme de séquence du mur, cette paléotopographie peut être mise en évidence de manière plus directe. Du sud vers le nord et successivement, la nappe écaille des formations plus récentes (Fig.42).

En reconstituant ces différentes étapes, nous sommes obligé de faire apparaître au mur de la surface de charriage des niveaux de plus en plus jeunes au fur et à mesure que la nappe se déplace vers le nord et écaille l'autochtone.

Le dépliage des unités para-autochtones.

Pour l'écaille de Gardanne, l'amplitude du chevauchement est connue. De plus, il a été établi que cette écaille s'enracine à l'est. Le dépliage obtenu est donc relativement précis.

Par contre pour les écailles plus internes, leur rejet exact n'est pas connu. Nous pouvons seulement établir qu'elles se positionnent les unes à la suite des autres, au fur et à mesure qu'elles sont dépliées.

Le seul critère permettant d'estimer leur position originelle est de se baser sur la position probable de l'écaille apto-albienne de Simiane-Mimet, en tenant compte de la présence de formations similaires dans la Nerthe autochtone septentrionale, à l'ouest, et dans les séries entraînées du massif d'Allauch et de la Sainte-Baume, à l'est.

Ainsi il est probable que l'écaille de Simiane-Mimet s'enracine à l'ouest, vers les Pennes-Mirabeau.

Le lambeau de Sousquières.

L'écaille de Sousquières se situe au front de chevauchement de l'Etoile entre la Malle et Simiane. Il s'agit d'une écaille, dont les couches du Dogger à l'Urgonien sont redressées à la verticale. L'épaisseur stratigraphique de ces terrains est de 1500m, alors que l'épaisseur de l'écaille n'est que de 250m.

Elle représente l'équivalent oriental d'une série renversée située plus à l'Ouest (la Grande Colle) et en ce sens elle peut se considérer comme une unité issue des bordures du bassin de l'Arc (Nerthe septentrionale autochtone).

Le fait qu'elle ne soit pas renversée pourrait s'expliquer par un pendage initial moins fort malgré le fait qu'elle ait été plus entraînée.

Ce pendage initial, avant l'écaillage, est évalué à 45° N pour une direction O-E ($N85^{\circ}$) dans la série renversée de la Grande Colle, en rebasculant la discordance observée entre les brèches Bégudiennes et l'Urgonien de la série renversée (ASSAS à paraître).

Cette remarque montre un décalage avec le développement de l'écaille de Simiane-Mimet pour laquelle nous avons déduit un pendage initial très faible (3°).

De plus, nous avons remarqué que dans la mesure ou le contact plat entre l'écaille de Sousquières et l'écaille de Simiane-Mimet n'est pas déformé.

Ainsi, l'écaille de Sousquières a du chevaucher l'écaille de Simiane-Mimet après que cette dernière ait chevauché le lambeau de Gardanne.

Ce cas de séquence rétrograde pourrait s'expliquer par un blocage des unités para-autochtones. L'avant-pays ne s'écaille plus et la déformation est transférée vers l'arrière.

RAPPORTS AVEC L'ALLOCHTONE

La construction d'un diagramme stratigraphique au toit de la surface de charriage de l'Etoile peut nous renseigner sur sa morphologie, lors de l'initialisation du charriage ou au cours du chevauchement (Fig.43).

Du synclinal de Méjean à l'Ouest au Jas de Rhodes plus à l'Est, la surface du chevauchement de l'Etoile recoupe des séries allant progressivement du Crétacé supérieur marin au Trias.

Donc, le chevauchement descend dans la série stratigraphique dans la direction de déplacement de la nappe.

Dans la mesure où la direction de cette surface est un peu oblique par rapport à la direction du charriage, cette partie de la surface de charriage peut être considérée comme une rampe oblique (ou latérale) qui représenterait donc la terminaison latérale occidentale de la nappe de l'Etoile.

Cette rampe oblique peut être considérée aussi comme une rampe de transfert permettant le passage d'un niveau de décollement à la base du Trias dans l'Etoile à celui situé dans le Jurassique moyen dans la Nerthe.

Après le démarrage du charriage, la nappe de la Nerthe méridionale et celle de l'Etoile ont évolué différemment. La nappe de l'Etoile s'est déplacée plus que celle de la Nerthe. Cette déconnexion s'est produite le long de la rampe de transfert, permettant ainsi son émergence en surface (ASSAS, à paraître).

Du Jas de Rhodes à l'extrémité orientale du chevauchement de l'Etoile, le tracé du diagramme est un peu plus complexe. Il faut tenir compte de la présence presque continue d'une bande triasique entre les séries entraînées et l'allochtone.

Cette bande triasique est très peu large (quelques mètres au maximum).

Les contacts stratigraphiques à l'arrière de cette bande sont reportés sur le diagramme. Le tracé fait apparaître un plateau qui correspond à peu près au Jurassique moyen, qui constituerait ainsi un niveau de décollement.

Le long de cette bande triasique des terrains plus jeunes chevauchent des terrains plus vieux. Cette anomalie à la règle qui veut que, à-priori, un chevauchement entraîne un recouvrement de terrains plus vieux sur des terrains plus jeunes, peut s'expliquer par un décollement secondaire dans les niveaux calcaires marneux du bajocien-bathonien (GUIEU 1968).

Replacé dans la terminologie actuelle propre aux nappes de charriages, on peut y voir une séquence de recoupement (BUTLER 1987, MUGNIER 1988). Après blocage de la nappe, le décollement se transfère dans un niveau de décollement supérieur (en l'occurrence, le transfert se fait du Trias au Jurassique moyen) (Fig.44).

Ce niveau de décollement secondaire se branche sur le chevauchement, mais ne le recoupe pas, expliquant ainsi la mince bande de Trias, son « étirement ».

En ce qui concerne, les relations entre la nappe et l'autochtone, à l'arrière des écaillés entraînées, le contact est presque toujours verticalisé ou très incliné, alors que la surface de contact entre l'autochtone et la nappe est beaucoup plus horizontale.

Une verticalisation des contacts par rejeu en flexure du contact anormal est possible (GUIEU 1968). Mais en partie, l'inclinaison des contacts anormaux peut s'expliquer par la présence d'écaillés dont les empilements successifs expliquent l'inclinaison du contact anormal (Fig.9).

LE MASSIF D'ALLAUCH

SITUATION GEOGRAPHIQUE.

Le massif d'Allauch ou du Garlaban est bordé au nord par la chaîne de l'Etoile, auquel il est parfois rattaché, à l'est et au sud par la vallée de l'Huveaune et à l'ouest par le bassin de Marseille.

STRUCTURE GEOLOGIQUE (Fig.45).

La mise en évidence d'une opposition entre « l'aire centrale » et ses bordures chevauchantes (« les bordures plissées ») revient à M.BERTRAND.

Seulement ces bordures plissées ne correspondent plus à un pli couché avec un flanc inverse, mais à des séries entraînées et localement renversées sous une nappe en série normale (AUBOUIN 1967, GUIEU 1968).

L'aire centrale.

L'aire centrale autochtone présente une forme triangulaire. Elle est limitée de toute part par des séries allochtones ou para-autochtones.

Cette aire centrale se rattache au « bombement varois » (ROUSSET 1969), propre à l'unité de l'Arc. Elle présente en effet une lacune significative due à l'émersion survenue à la fin de l'Albien et au début du Cénomaniien.

Cette émersion a entraînée la formation de bauxites qui ont été exploitées sur l'aire centrale (Mine de Canteperdrix, près d'Allauch et au pied du sommet de Tête Ronde au nord des Bellons).

Au nord et à l'est, la surface de charriage est reprise par des failles verticales : la faille de l'Amandier au nord et la faille du Marseillais à l'est. Ces failles verticales témoignent du soulèvement en horst de l'aire centrale aboutissant à son dégagement en fenêtre tectonique après l'érosion de la nappe, qui le surmontait, dont il ne subsiste comme témoin qu'une klippe, le pli du Garlaban couché vers le nord-ouest.

A l'ouest et au sud (d'Allauch au Gavots), le contact est nettement chevauchant, mettant en superposition des séries entraînées sur l'autochtone.

Les séries entrainées.

Ces séries présentent une différenciation de faciès par rapport à l'aire centrale autochtone.

Les séries entrainées font apparaître des termes qui ont été érodés dans l'aire centrale, démontrant ainsi une certaine allochtonie. Les formations apto-albiennes des séries entrainées présentent le faciès « siliceux » où dominant des calcaires marneux siliceux et glauconieux (faciès dit « de Fontdouille ») daté plus précisément de l'Aptien supérieur-Albien inférieur (TRONCHETTI et MASSE 1976). Ce faciès se retrouve dans l'autochtone appartenant à l'Unité de l'Arc dans la Nerthe autochtone septentrionale, dessinant ainsi un « sillon » d'orientation générale ONO-ESE (MASSE) en bordure du Bombement Varois (ROUSSET 1969).

Il faut distinguer deux unités dans ces séries entrainées :

A l'ouest, le para-autochtone est représenté par une série renversée qui se réduit à une mince bande de calcaire valanginien de la Treille au Jas de Fontainebleau. Se développe, alors, l'unité du Bec-Cornu, correspondant à des séries entrainées en position normale, qui apparaît au dos de la série renversée un peu à l'est d'Allauch (Vallon d'Eyraou) (GUIEU 1968) pour s'interrompre aux Gavots à l'est. De la Treille au Jas de Fontainebleau, Cet Aptien chevauche le Valanginien entrainé. Cette association Aptien sur Valanginien se retrouve dans un petit massif au sud d'Allauch, le massif de la Salette. On pouvait y observer, avant son urbanisation forcée, un contact analogue à la série renversée montrant une superposition d'Aptien sur du Valanginien au sein d'une série entrainée sous un allochtone réduit à ses termes triasiques et liasiques. Cette observation nous sera bien utile pour déplier car il faudra ramener les formations apto-albiennes dans une position plus méridionale que celle, actuelle, du massif de la Salette.

Il ne sera pas possible d'utiliser des critères géométriques précis pour replacer ces séries entrainées dans leur position originelle. L'argument

majeur pour définir leur provenance sera d'ordre stratigraphique.

La série renversée entre Allauch et les Bellons

Il s'agit d'une série renversée avec des terrains du Portlandien au Cénomaniens. le renversement se fait vers le NE avec des pendages assez variables compris entre 30° et 60° vers le SO pour une direction moyenne N110.

Aux abords de la grotte des Pestiférés, les relations de la série renversée avec l'autochtone s'observent assez bien. Il faut distinguer un Cénomaniens renversé chevauchant un Cénomaniens autochtone. Dans une petite grotte sous celle des Pestiférés, une zone de cisaillement plat avec figures de poissons sigmoïdes correspond à ce contact. Les directions de stries sur les plans de cisaillement donnent une direction N20°. Les sigmoïdes sont intensément stylolisés et striés, mais le calcaire cénomaniens est toujours reconnaissable (Calcaire à radiolitidés). Stratigraphiquement ce Cénomaniens ne correspond pas exactement à celui de l'autochtone. Le Cénomaniens de la série renversée est de type « récifal » alors que le Cénomaniens autochtone est laguno-saumâtre (Marnes ligniteuses et calcaires à huîtres et Préalvéolines) (PHILIP J. 1970). En dépliant, il faudra donc ramener le Cénomaniens renversé dans une position plus méridionale que celle du Cénomaniens autochtone.

Dans la grotte des Pestiférés, la superposition de l'Urgonien à l'Aptien (par l'intermédiaire d'une surface de chevauchement N90 25N avec des stries N20°) et de l'Aptien au Cénomaniens s'observe parfaitement. Cet Aptien est de type « siliceux » et il est absent sur l'aire centrale du massif d'Allauch. Cette présence d'Aptien, nous indique qu'il faut ramener la série renversée d'Allauch dans une position paléogéographique située plus au sud que l'Aptien, lui même situé plus au sud que le Cénomaniens.

En s'appuyant sur le dépliage minimum proposé pour l'échelle aptienne de Simiane-Mimet, on est donc conduit à la « tirer » un peu plus en arrière afin que les différents lignes isopiques puissent s'aligner dans une même

direction.

La série renversée entre la treille et le jas de fontainebleau.

La série renversée est ici réduite à une barre de calcaire valanginien. Ce calcaire affleure sur le chemin des Bellons, au nord de la Treille et dans le village de la Treille. On peut y observer une surface de faille subhorizontale très polie avec des cannelures de direction N155.

Le contact entre les séries entraînées et l'autochtone passe à l'Est, au sud des barres de St-Esprit, où l'association Aptien sur Valanginien s'observe parfaitement. La barre sommitale de St-Esprit est constituée par des calcaires valanginiens reposant par la tranche des bancs sur de l'Hauterivien autochtone. Une écaille de calcaire turonien s'intercale en partie entre les calcaires valanginien et l'autochtone, démontrant parfaitement le chevauchement (GUIEU 1968).

La barre sommitale de St-Esprit a valeur de klippe puisqu'elle est séparée par quelque mètre d'Hauterivien autochtone de l'association Valanginien-Aptien para-autochtone.

Le fait que dans cette zone l'aptien est systématiquement associé au valanginien peut s'expliquer par le jeu d'une paléo-faille normale située plus au sud (dans la position originelle de cette série) (GUIEU 1968).

Cette paléo-faille (c.a.d formée avant le chevauchement) à regard sud expliquerait finalement cette anomalie à la règle qui veut que normalement ce sont des terrains plus vieux qui chevauchent des terrains plus jeunes.

Cette anomalie se retrouve aussi dans les rapports entre l'unité du Bec-cornu et l'autochtone.

Ensuite vers le Jas de Fontainebleau, le calcaire valanginien disparaît. L'Aptien à faciès siliceux accompagné de Cénomaniens se développe et les séries para-autochtone redeviennent importantes.

Entre le Jas de fontainebleau et les gavots. (Unité du Bec-Cornu).

L'unité du bec-cornu est constituée de deux écailles synformes (Fig46).

l'une est à cœur Aptien avec un flanc méridional urgonien cisailé par

des failles subhorizontales.

L'autre est à cœur Cénomaniens-Albiens supérieurs et chevauche la première unité synforme vers le nord.

Il faut noter que (surtout dans la première unité et dans les calcaires marneux bédouliens) s'observent des microdécrochements délimitant des couloirs de cisaillement où des figures de poissons sigmoïdes indiquent un sens senestre de direction N40° environ. Ces structures témoignent du jeu de la faille des Gavots qui s'effectue dans le même sens. Il faut admettre que lors de sa progression vers le nord, la nappe a buté contre un paléorelief (la bordure méridionale du massif d'Allauch) et les unités qu'elle a entraîné traduisent ce blocage par le jeu de décrochements parallèles (GUIEU et TEMPIER 1985).

L'existence de ce paléorelief se retrouve d'ailleurs dans l'anomalie que l'on constate : l'unité du Bec-Cornu est constituée de formations plus jeunes que celles qu'elle chevauche. Et même au sein de l'unité du Bec-cornu, les formations du second synclinal sont plus jeunes que celles du premier synclinal, que le second chevauche.

On conçoit ainsi que les séries entraînées se sont accumulées au bas de ce paléorelief et qu'elles ont coulissé le long de ce dernier, comme en témoignent les microdécrochements N40° senestres. Le franchissement du paléorelief par la nappe est attesté par la présence d'une klippe au nord de l'unité du Bec-Cornu, le pli couché du Garlaban d'axe NE-SO. Cette direction n'est pas incompatible avec les décrochements N40°. Lors du franchissement du paléorelief par l'unité qui donnera le pli du Garlaban, un pli dont la vergence est grossièrement normale à l'orientation de la bordure du paléorelief peut se développer. On peut comparer ce dispositif au franchissement d'une rampe oblique par un pli passif .

Mise en évidence d'une paléotopographie.

Les klippes de para-autochtone que l'on observe sur l'aire centrale scellent, en quelque sorte, la paléotopographie au moment du recouvrement.

Le pli du Garlaban repose sur des calcaires hauteriviens.

Un lambeau de calcaire turonien entraîné nous indique qu'il devait affleurer plus au Sud. Le même dispositif se retrouve aux barres de St-Esprit. Sous la barre valanginienne para-autochtone, un affleurement de Turonien (GUIEU 1968) superposé à l'Hauterivien autochtone démontre le recouvrement du Valanginien à l'Hauterivien.

Par contre, ailleurs la surface de chevauchement peut avoir été érodée. Toutefois le contact entre l'autochtone nous indique l'allure générale de la paléotopographie avant le chevauchement. Ainsi la présence de Cénomaniens entraînés sous la série renversée nous indique que vers l'ouest le Cénomaniens devait affleurer alors qu'à l'est, l'Hauterivien formait de larges affleurements et que plus au sud du turonien (celui entraîné sous les klippes) affleurerait.

Tous ces faits peuvent être synthétisés par un schéma figurant la position originelle des séries entraînées (Fig.47). Ce dispositif est certes très hypothétique, mais il tient compte des faits connus.

La série renversée du Massif de la Ste-Baume

La série renversée se situe dans une même position structurale que les séries para-autochtones décrites précédemment.

Elle chevauche un autochtone présentant la lacune stratigraphique correspondant à l'émersion albo-cénomaniennne. Alors que la série renversée contient des formations apto-albiennes « à faciès siliceux », indiquant une provenance plus méridionale et permettant de prolonger le dispositif observé au Sud du massif d'Allauch plus vers l'est.

Elle est chevauchée par un allochtone montrant une série complète avec des formations dolomitiques dans le Néocomien qui le rattache stratigraphiquement et structurellement au chevauchement de l'Etoile et au massif de Carpiagne.

La flèche de charriage observée actuellement est au minimum de douze kilomètres ou de vingt si les massifs de l'Olympe et de l'Aurélien ne sont pas des bordures chevauchantes du bassin de l'Arc mais les extrémités frontales du chevauchement de la Sainte-Baume (GUIEU et ROUSSET 1979).

La série renversée de la Sainte-Baume comprend des formations du Bajocien-Bathonien au Crétacé supérieur, soit un peu plus de 1000 mètres de puissance.

Le renversement des couches s'est effectué vers le nord par un rebroussement produit par le déplacement de la nappe.

Cette série est débitée en écailles par des failles subhorizontales, présentant un léger pendage sud de 15 à 20 degrés. Ces failles provoquent des décalages successifs faisant apparaître plusieurs fois la succession Jurassique Supérieur à Urgonien.

Les rejets s'effectuent de telle sorte que le compartiment supérieur est plus entraîné vers le nord que le compartiment inférieur.

C'est la découverte de ces répétitions¹ qui a permis de mettre en évidence ces failles « plates » (CARON et al 1966).

Le long de ces failles « plates », lorsque le mur de faille est du calcaire urgonien, le miroir de faille peut être observé sous forme de dalles affleurantes qui se suivent presque sans discontinuité. La patine de ces dalles est noirâtre et elles sont suffisamment altérées pour empêcher toute observation microtectonique sur la plupart des affleurements. Toutefois en certains endroits, la surface est décapée. Près des Escandaou, la brèche de faille s'observe même et elle a fait l'objet d'une étude microtectonique (SUDREAU 1984).

Des cannelures, qui peuvent être considérées comme des stries à plus grande échelle, indiquent un sens de déplacement N145 à N155 du compartiment supérieur. La brèche, elle-même montre des stylolites dans la matrice ou au contact entre les éléments de brèches et la matrice. Les directions de stylolites dans les éléments de brèches ne doivent pas être pris en compte car ils correspondent à la direction de stratification. Et pour certains éléments de brèches des rotations ont du se produire. De même les « décrochements » affectant les éléments de brèches ne peuvent être considérés car leur jeu n'est qu'apparent.

Les mesures des pics stylolitiques de la matrice montrent une variation continue entre N180° et N140° et une association fentes de traction et stylolites N40°.

Ces mesures pourraient être interprétées comme résultant d'un déplacement avec rotation de sens direct de 40° environ. Mais cartographiquement, la rotation dans la direction des couches est beaucoup moins importante. Cette variation doit donc s'expliquer par un écart dans la direction des pics stylolitiques autour de N160° ou N170° avec une rotation au cours de l'écaillage qui amplifiera cette variation.

¹ M. BERTRAND avait relevé dans une coupe ces redoublements : « En effet, quand on fait avec soin la coupe de la partie ouest de la chaîne, on constate jusqu'à deux, peut-être trois fois, sans changement de pendage, l'alternance de marnes et calcaires nécomiens avec les dolomies jurassiques ». Mais il ajoute : « Il est impossible de décider si c'est là le résultat de plis secondaires, ou d'écailles formées par des glissements successifs » (BERTRAND 1900).

Le déplacement de la nappe induit une compression méridienne produisant des stylolites à pics S-N. Lors de la rotation des écaïlles, ces directions de pics vont suivre le mouvement de rotation pendant que d'autres se forment dans une direction S-N. En ce qui concerne la direction formée par l'association fentes de traction et stylolites, elle ne semble pas liée au déplacement de la nappe qui se fait dans une direction S-N environ. Aucun élément ne permet d'établir une chronologie relative avant ou après la mise en place de la nappe, ni même avant ou après le renversement.

Cartographiquement, les lignes d'affleurement correspondent à peu près aux lignes de recoupement entre la stratification et les plans de faille.

Ainsi le dépliage au sein de la série renversée est un peu plus immédiat, par rapport à l'utilisation des lignes de recoupement pour des séries normales. Le dépliage s'effectue en faisant correspondre les lignes de recoupement d'un même niveau repère entre elles.

L'unité la plus sommitale (située au niveau de la crête de la Haute Chaîne) présente un rejet de 1,5 Km par rapport à l'unité la plus basale visible. Mais ce rejet estimé précisément est un minimum. D'autres écaïlles (L'unité du Pin de Simon et le Pic des Corbeaux), désolidarisées de la série renversée par érosion, sont visibles un peu plus au nord entre l'Autochtone du Plan d'Aups et l'allochtone de Roqueforcade.

Mais ce rejet estimé précisément est un minimum. D'autres écaïlles, le Pin de Simon et le Pic des Corbeaux, désolidarisées de la série renversée (la Haute Chaîne) par l'érosion, sont visibles un peu plus au nord sous l'allochtone de l'unité de Roqueforcade. Elles nous indiquent que d'autres écaïlles, plus sommitales, ont été entraînées vers le nord. En utilisant le décalage entre la limite Jurassique moyen-Jurassique supérieur, le rejet entre ces deux écaïlles et l'unité la plus basale est de 2,5 Km.

La morphologie de la surface de chevauchement peut s'apprécier en reportant l'altitude de quelques points sur le tracé du chevauchement en surface (à partir de la carte géologique à 1/50.000°).

A l'arrière de la série renversée de la Sainte-Baume, il se situe entre la cote 500 et la cote 600 et il pend vers le sud assez fortement .

Latéralement, à l'ouest de la série renversée et au contact des écailles du Pin de Simon et du Pic des Corbeaux, il est presque vertical.

Lorsque la nappe s'appuie sur l'autochtone, le contact est presque horizontal (Roqueforcade et Bassan).

Ainsi donc quand la nappe s'appuie sur des séries entrainées, le contact est très incliné (ce qui rejoint les observations faites dans la nappe de l'Etoile).

Comme dans l'Etoile, la nappe présente un niveau de décollement secondaire dans le Jurassique moyen. Ainsi dans le vallon des Estagnols (au nord de Cuges-les-Pins), une fenêtre de Lias apparaît au milieu du Crétacé inférieur. Le décollement s'observe dans le vallon de Sainte-Madeleine avec un chevauchement de Jurassique supérieur sur du Jurassique moyen.

Ce type de décollement dans la série normale s'interprète comme une séquence de recoupement. L'accumulation de séries entrainées au front de la nappe entraine son blocage. Le mouvement a donc tendance à se transférer dans un niveau de décollement supérieur. Et comme dans l'Etoile le niveau de décollement se branche sur le chevauchement.

Conclusion

Le dépliage cartographique des unités para-autochtones met en évidence et confirme la structuration antérieure à la mise en place des nappes.

Il permet d'établir, comme cela avait été pressenti (GUIEU 1977) la présence sous l'Oligocène du bassin de Marseille et sous les lambeaux allochtones, restés en arrière du chevauchement de l'Etoile, de traces au mur de la surface de charriage d'une paléostucture héritée à la fois de la phase albo-cénomaniennne et de la phase antémaastrichtienne.

la présence de ces paléostuctures (par rapport à l'âge des charriages) nous a permis de repositionner les unités para-autochtones le long d'un « sillon » bordant dans une direction WNW-ESE (MASSE et PHILIP 1976) le bombement varois (ROUSSET 1969).

Ainsi, en présence d'une paléotopographie même peu accentuée, l'application stricte de la règle «la différenciation entre rampe et plat du toit et du mur permet de reconstituer les zones manquantes» peut conduire à créer des écailles ou des volumes qui ne se sont jamais déposés ou qui ont été érodés avant la mise en place de la nappe.

L'application de la règle « Un chevauchement est caractérisé par un contact anormal faisant superposer des formations plus vieilles sur des formations plus jeunes » implique que pour les unités para-autochtones, son application ou sa violation soit le résultat d'une interférence avec des paléostuctures antecharriage et que pour l'allochtone, la violation de cette règle, soit le reflet des discordances mécaniques, induisant des séquences de recouplement.

Le lieu est ainsi établi entre les observations anciennes (principalement observation de décollements secondaires, multiplication des nappes (HAUG 1930), présence de séries renversées ou non entraînées et quelques règles nouvelles ou anciennes (mais jamais appliquées jusqu'ici) et les paléostuctures que la nappe écaillera lors de son déplacement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSAS N. 1991. Mécanismes de mise en place d'une nappe de charriage. L'exemple des massifs de l'Etoile et de la Nerthe méridionale (Nord de Marseille). Thèse de l'Université de Provence (Aix-Marseille I).
- AUBOUIN J. et CHOROWICZ J. 1967. Le chevauchement sud-provençal de l'Etoile à la Sainte-Baume. Bulletin de la Société Géologique de France. (7), T.IV, pp.600-608.
- BERTRAND M. 1898. La nappe de recouvrement des environs de Marseille. Lame de charriage et rapprochement avec le bassin houiller de Silésie. Bulletin de la Société Géologique de France. (3), T.XXVI, pp.632-652.
- BERTRAND M. 1899. La grande nappe de recouvrement de la basse Provence. Bulletin du Service de la Carte Géologique de la France. T.X, N°68, pp1-71.
- BALLARD J-F., BRUN J-P., VAN DEN DRIESSCHE J. ET ALLEMAND P. 1987. Propagation des chevauchements au-dessus des zones de décollement : modèles expérimentaux. Comptes rendus de l'Académie des Sciences. t.305, Série II, pp.1249-1253.
- BOYER S.E et ELLIOTT D. 1982. Thrust systems. The american association of petroleum geologists bulletin. V.66, N°9, pp.1196-1230.
- BUTLER R.W.H. 1982. The terminology of structures in thrust belts. Journal of Structural Geology. V.4, N°3, pp.239-245.
- BUTLER R.W.H. 1987. Thrust sequences. Journal of the Geological Society of London. V.144, pp.619-634.
- CARON J.P.H, GUIEU G. et TEMPIER C. 1966. Quelques aspects de la tectonique tangentielle en Basse-Provence-Occidentale. Comptes Rendus Sommaires de la Société Géologique de France. pp41-43.
- CARON J.P.H 1968. Mise en évidence du Muschelkalk inférieur dans la région toulonnaise (Var). Comptes rendus de l'Académie des Sciences. t.266, pp.1699-1701.

- CHAMBERLIN R.T. 1910. The Appalachian folds of central Pennsylvania. *Journal of Geology*. V.27, pp.228-251.
- COMBES P. 1984. Tectonique récente de la Provence occidentale. Microtectonique, caractéristiques dynamiques et cinématiques. Méthodologie de zonation tectonique et relation avec la sismicité. Thèse 3^e Cycle. Université de Strasbourg.
- COOPER M.A. 1981. The internal geometry of nappes : criteria for models of emplacement. Special book of the geological society of London.
- COOPER M.A. et TRAYNER P.M. 1986. Thrust-surface geometry : implications for thrust-belt evolution and section-balancing techniques. *Journal of Structural Geology*. V.8 N°3/4, pp.305-312.
- CRANE R.C. 1987. Use of fault cut-offs and bed travel distance in balanced cross-sections. *Journal of Structural Geology*. V.9 N°2, pp.243-246.
- DAHLSTROM C.D.A. 1969. Balanced cross sections. *Canadian journal of earth sciences*. N°6, pp.743-757.
- DAHLSTROM C.D.A. 1970. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of canadian petroleum geology*. V.18, N°3, pp.332-406.
- DE PAOR D.G. 1988. Balanced section in thrust belts. Part 1 : Construction. *The american association of petroleum geologists bulletin*. V.72, N°1, pp.73-90.
- DENNIS J.G. 1981. What is a thrust ? What is a nappe ? Thrust and nappe tectonics. Special book of the geological society of London.
- DENIZOT G. 1935. Les phases tectoniques successives aux environs de Marseille. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. Paris. T.201, pp.90-92.
- DESCHAMPS J.M. 1966. Etude du Lambeau de Gardanne. D.E.S Marseille.
- DIEGEL F.A. 1986. Topological constraints on imbricate thrust networks, examples from the Mountain City window, Tennessee, U.S.A. *Journal of Structural Geology*. V.8, N°3/4, pp.269-279.

- DUFAURE P., LEGUILLETTE J. et VETTER P. 1967. Coupes de deux sondages forés dans la région de Gardanne (Bouches-du-Rhône), Bulletin de la Société Géologique de France. (7), T.IX, N°4, pp.547-548.
- DURAND J.P. et GUIEU G. 1980. Cadre structural du Bassin de l'Arc. Revue de l'Industrie minière, Supplément du N° de Juin, pp.3-12.
- DURAND J.P. 1980. Les sédiments fuvéliens du synclinal de l'Arc (Provence). Revue de l'Industrie minière, Supplément du N° de Juin, pp.13-25.
- ELLIOTT D. et JOHNSON R.W. 1980. Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt, NW Scotland. Transactions of the Royal Society of Edinburgh : Earth Sciences. 71, pp.69-96.
- GAVIGLIO P. 1985. La déformation cassante dans les calcaires fuvéliens du Bassin de l'Arc (Provence), comportement des terrains et exploitation minière. Thèse doctorat d'état, Université de Provence (Aix-Marseille I).
- GEISER P.A. 1988. The role of kinematics in the construction and analysis of geological cross-sections in deformed terranes. Geological Society of America, Special Paper 222, pp.47-76.
- GIDON M. 1987. Les structures tectoniques. Manuels & méthodes du B.R.G.M. N°15. 206p.
- GOGUEL J. 1939. Tectonique des chaînes subalpines entre la Bléone et la Durance. Bulletin des services de la carte géologique de la France et des topographies souterraines.
- GOGUEL J. 1983. Etude mécanique des déformations géologiques. Manuels & méthodes du B.R.G.M. N°6. 193p.
- GOVERNET C., GUIEU G. et ROUSSET C. 1979. Provence. Guides géologiques régionaux. Masson ed.
- GRAHAM R., HOSSACK J., DERAMOND J. et SOULA J.C. 1987. Géométrie des surfaces de chevauchement. Bulletin de la Société Géologique de France. (8), T.III, N°1, pp.169-181.
- GUIEU G. 1967. Un exemple de tectonique tangentielle : l'évolution du cadre montagneux de Marseille. Bulletin de la Société Géologique de France. (7), T.IX, N°4, pp.610-630.

- GUIEU G. 1968. Etude tectonique de la région de Marseille. Thèse d'Etat, Marseille.
- GUIEU G. et ROUSSET C. 1978. Structures, paléostructures, paléogéographie et genèse des bauxites en Provence. Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. (2^oSérie), Section II, N^o3, pp.311-322.
- GUIEU G. et ROUSSET C. 1979. Les massifs de l'Olympe et de l'Aurélien représentent la zone frontale du chevauchement de la Sainte-Baume (Bouches-du-Rhône, Var, France). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Paris. T.289, Série D, pp.623-626.
- GUIEU G. et TEMPIER C. 1985. Etude détaillée d'un chevauchement provençal : la bordure méridionale du massif d'Allauch. Livret-Guide de l'excursion de la Société Géologique de France en Provence. Documents du Bureau de Recherche Géologique et Minière, N^o94, pp23-39.
- HAUG E. 1930. Les nappes de charriage de la Basse-Provence. 2^o Partie : le massif d'Allauch et ses environs. Memoire du Service de la Carte Géologique de la France.
- HOSSACK J.R. 1979. The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction : a review. Journal of the Geological Society of London. V.136, pp.705-711.
- KING P.B. 1960. The anatomy and habitat of low-angle thrust faults. American journal of science. V.258-A, pp.115-125.
- KLIGFIELD R., GEISER P. et GEISER J. 1986. Construction of geologic cross sections using microcomputer systems. Geobyte. V.1, pp.60-66.
- LISLE R.J. 1985. The facing of faults. Geological Magazine. T.122, pp.249-251.
- LUTAUD L. 1935. Sur la genèse des chevauchements et écaillés de la Provence Calcaire. Comptes Rendus Sommaires de la Société Géologique de France. pp261-263.

- LUTAUD L. 1957. La tectogenèse et l'évolution structurale de la Provence. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique* (2) Vol.1, pp103-112.
- MAC COSS A.M. 1987. Practical section drawing through folded layers using sequentially rotated cubic interpolators. *Journal of Structural Geology*. V.9, N°3, pp.365-370.
- MASSE J.P. et PHILIP J. 1976. Paléogéographie et tectonique du crétacé moyen en Provence : Révision du concept d'isthme durancien. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique* (2) Vol.8, n°1, pp103-112.
- MASSON H. 1976. Un siècle de géologie des Préalpes: de la découverte des nappes à la recherche de leur dynamique. *Eclogae Geologicae Helveticae*. V.69, N°2, pp.527-575.
- MENARD G. 1979. Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le sud-est de la France. Essai d'utilisation des données géophysiques. Thèse 3°Cycle, Université de Grenoble. p169.
- MENARD G. 1988. Méthodologie générale de construction des coupes équilibrées. Mémoires et documents du centre armoricain d'étude structurale des socles. N°20. pp.5-25.
- MORLEY C.K. 1986. A classification of thrust fronts. *The american association of petroleum geologists bulletin*. V.70, N°1, pp.12-25.
- 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. p163.
- MUGNIER J-L. 1988. Les étapes de la construction d'une coupe équilibrée. Exemple et discussion. Mémoires et documents du centre armoricain d'étude structurale des socles. N°20. pp.27-60.
- MUGNIER J-L. et MENARD G. 1986. Le développement du bassin molassique suisse et l'évolution des alpes externes : un modèle cinématique. *Bulletin des centres de recherche, exploration et production d'Elf-Aquitaine*. T.10, N°1, pp.167-180.

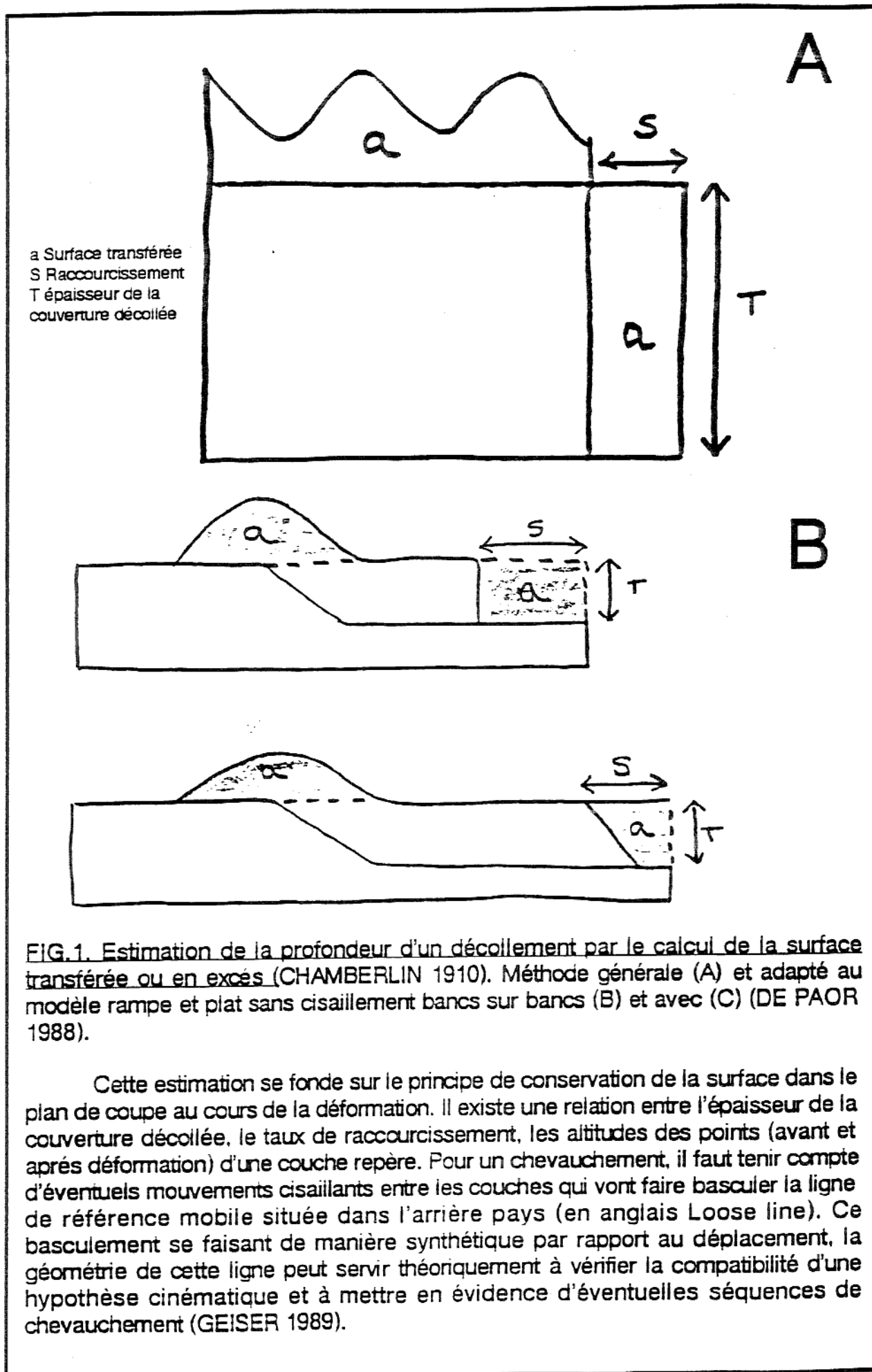
- NURY D. et RAYNAUD S. 1985. Tectonique et sédimentation du Bassin oligocène de Marseille. Livret-Guide de l'excursion de la Société Géologique de France en Provence. Documents du Bureau de Recherche Géologique et Minière, N°94, pp41-68.
- PHILIP H. 1983. La tectonique actuelle et récente dans le domaine méditerranéen et ses bordures. Ses relations avec la sismicité. Thèse d'Etat, Montpellier.
- RICH J.L. 1934. Mechanics of low-angle overthrust faulting illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky and Tennessee. The american association of petroleum geologists bulletin. V.18, N°12, pp.1584-1596.
- ROUIRE J. 1979. Notice explicative de la feuille Marseille a 1/250 000. Carte géologique de la France. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- ROUSSET C. 1969. Le Bombement varois. Relations entre la bauxitisation au crétacé moyen en provence et l'évolution originale de la région en régime karstique. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Paris. T.268, pp.2331-2334.
- ROUSSET C. 1973. La faille de la Tour-de-César, au Nord-est d'Aix-en-Provence, sépare l'unité allochtone de l'Arc des plis de la provence septentrionale; Conséquences structurales : le chevauchement Nord-Provençal. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Paris. T.277, Série D, pp.765-768.
- ROUSSET C. 1975. Apports de la méthode rétrotectonique à la connaissance de la paléogéographie régionale : l'exemple des bauxites de Provence. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Paris. T.281, Série D, pp.375-378.
- SCHIRMER T.W. 1988. Structural analysis using thrust-fault hanging-wall sequence diagrams : Ogden duplex, Wasatch Range, Utah. The american association of petroleum geologists bulletin. V.72, N°5, pp.573-585.

- SUPPE J. 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. American journal of science. V.283, pp.634-721.
- TEMPIER C. 1987. Modèle nouveau de mise en place des structures provençales. Bulletin de la Société Géologique de France. (8), T.III, N°3, pp.533-540.
- TEMPIER C. 1988. Quelques problèmes posés par la construction de coupes équilibrées dans une région géologiquement très étudiée. Le cas de la Provence. Mémoires et documents du centre armoricain d'étude structurale des socles. N°20. pp.107-111.
- TERMIER P. 1906. La synthèse géologique des Alpes.
- TOWNSED C. 1987. Thrust transport directions and thrust sheet restoration in the Caledonides of Finmark, North Norway. Journal of Structural Geology. V.9, N°3, pp.345-352.
- WERNICKE B. et BURCHFIEL B.C. 1982. Modes of extensional tectonics. Journal of Structural Geology. V.4, N°2, pp.105-115.

LISTE DES FIGURES.

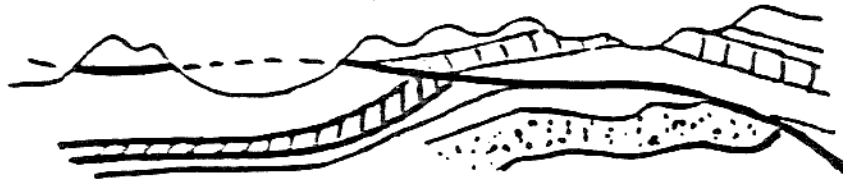
- Fig.1 Estimation de la profondeur d'un décollement par le calcul de la surface transférée ou en excès.
- Fig.2 Nappe du 1^oGenre, du 2^o genre en faille inverse, en décollement ou en rampe et plat.
- Fig.3 Modèle d'un chevauchement en rampe et plat.
- Fig.4 Trajectoire en escalier ou curviligne d'une surface de chevauchement.
- Fig.5 Développement d'un pli passif par chevauchement au dessus d'une rampe.
- Fig.6 Le type de géométrie « Fault-Bend-Folding ».
- Fig.7 Diagramme stratigraphique au toit et au mur d'un chevauchement.
- Fig.8 Schéma d'un front de chevauchement.
- Fig.9 Séquence de chevauchement prograde.
- Fig.10 Séquence de recoupement.
- Fig.11 Diagramme de séquence du toit.
- Fig.12 Rampes frontales, obliques et latérales.
- Fig.13 Exceptions à la règle « le chevauchement remonte dans la série dans le sens du déplacement ».
- Fig.14 Tous les chevauchements sont bordés par des lignes d'amortissement, des lignes de branchement ou une combinaison des deux.
- Fig.15 Un chevauchement présente sur carte une trace soit isolée, soit se branchant par une extrémité ou les deux à un autre chevauchement, soit reliant deux chevauchements entre eux.
- Fig.16 Selon le niveau atteint par l'érosion, une écaille présentera des aspects différents en carte.
- Fig.17 Différences d'interprétation entre une coupe et une carte.
- Fig.18 Les lignes de branchement d'écailles superposées se croisent en un point.
- Fig.19 Pour une même surface de chevauchement, chaque horizon stratigraphique faillé présentera une ligne de recoupement au mur et une au toit du chevauchement.
- Fig.20 Pour une même écaille, la ligne de recoupement au mur et celle au toit d'un même horizon stratigraphique se rejoignent sur la ligne de branchement.
- Fig.21 Estimation du raccourcissement par la méthode des surfaces totales.
- Fig.22 Translation sur coupe d'une unité chevauchante par report vertical.
- Fig.23 Le « faciès » d'un chevauchement.
- Fig.24 Situation géographique.
- Fig.25 Cadre structural de la Basse Provence occidentale.
- Fig.26 Colonnes stratigraphiques en Provence méridionale.
- Fig.27 Schéma structural du chevauchement de l'Etoile.
- Fig.28 Limites du bassin de l'Arc au Fuvélien.

- Fig.29 Lignes de recoupement au toit et au mur d'une faille.
- Fig.30 Sens du « younging » au toit et au mur du chevauchement de la Diote.
- Fig.31 Contours géologiques du lambeau de Gardanne.
- Fig.32 Coupes dans le bassin de l'Arc.
- Fig.33 Dépliage en utilisant les lignes de recoupement.
- Fig.34 Reconstitution de la partie érodée de l'écaille de Gardanne.
- Fig.35 Coupe scannérisée.
- Fig.36 Coupe dépliée.
- Fig.37 Coupe dépliée « reconstituée »
- Fig.38 Coupe « reconstituée repliée ».
- Fig.39 Application de la méthode des surfaces totales.
- Fig.40 Reconstitution avec des couches horizontales.
- Fig.41 Rapport entre l'autochtone, l'écaille de Gardanne et l'écaille de Simiane-Mimet.
- Fig.42 Diagramme de séquence du chevauchement.
- Fig.43 Diagramme stratigraphique au toit du chevauchement de l'Etoile.
- Fig.44 Séquence de recoupement.
- Fig.45 Schéma structural du massif d'Allauch.
- Fig.46 Coupes dans l'unité du Bec-Cornu.
- Fig.47 Dépliage des séries para-autochtones de l'Etoile et du massif d'Allauch.
- Fig.48 Schéma structural de la partie occidentale de la Sainte-Baume.
- Fig.49 Coupes dans la série renversée de la Sainte-Baume.
- Fig.50 Miroir de faille plate.
- Fig.51 Fentes de traction et stylolites associés.
- Fig.52 Altitude du tracé de la surface de chevauchement de la Sainte-Baume.

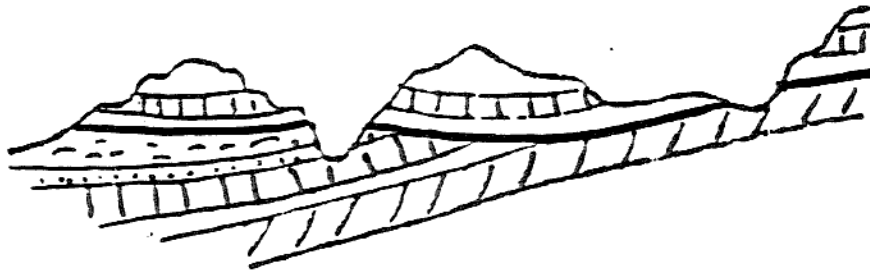




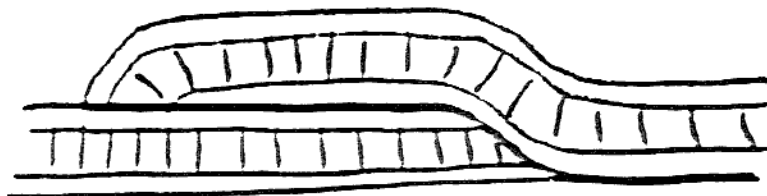
(A)



(B)



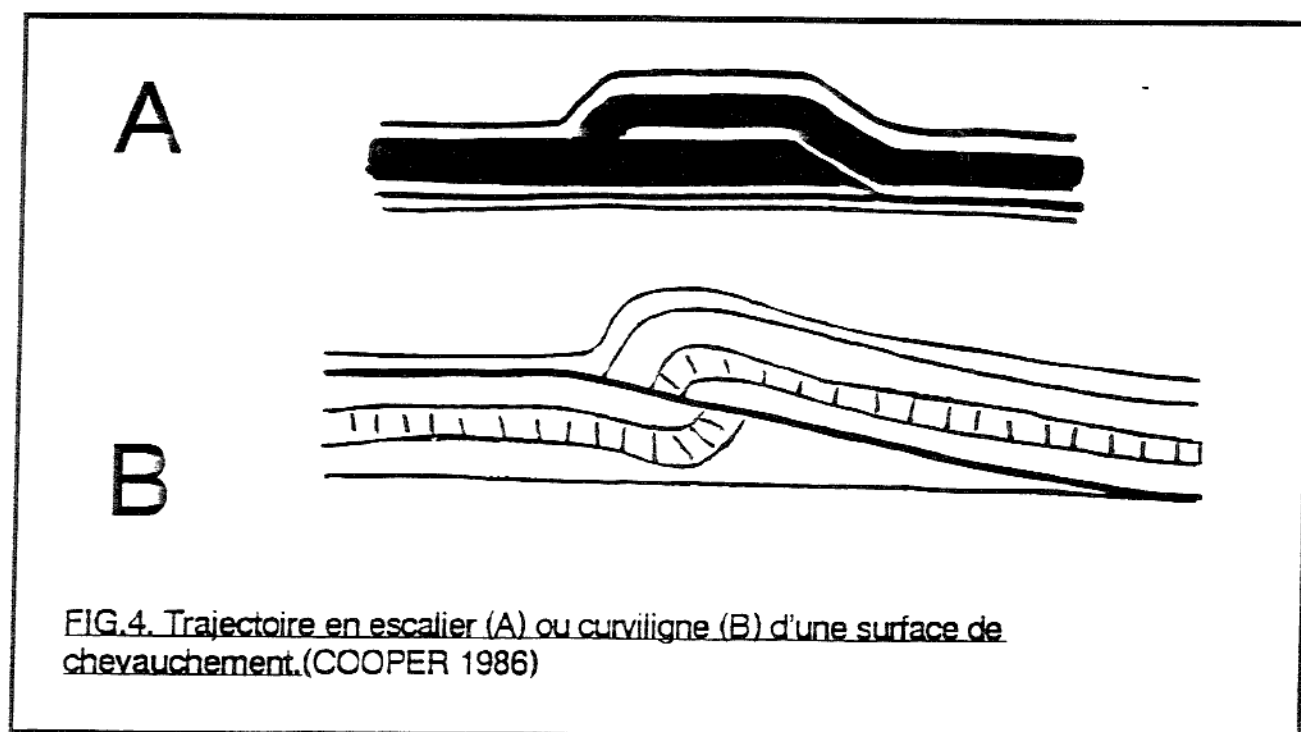
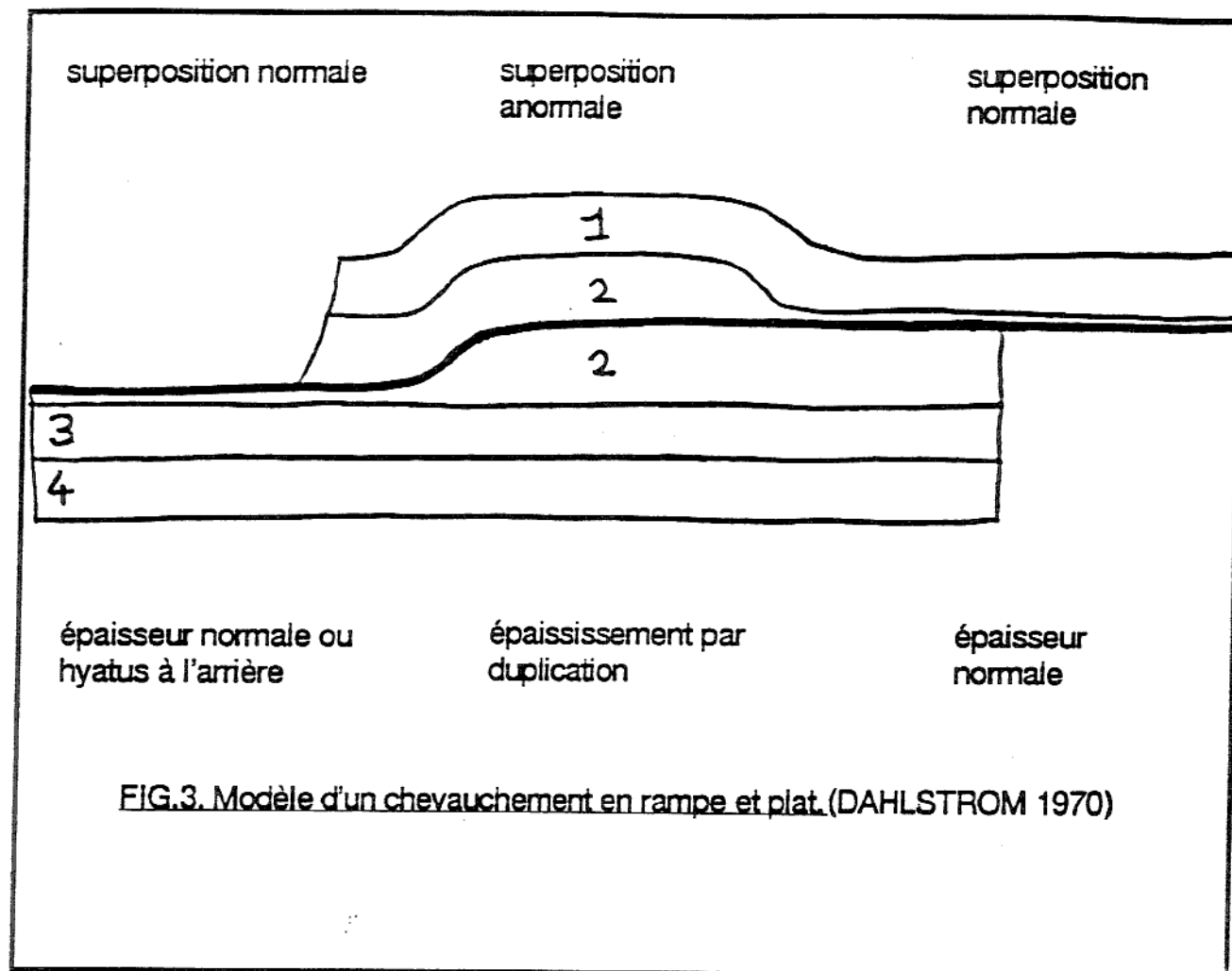
(C)

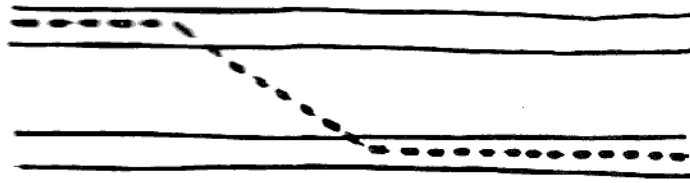


(D)

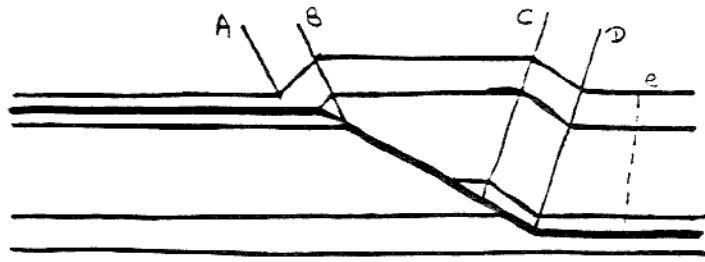
FIG.2. Nappe du 1^o genre (A), du 2^o Genre en faille inverse (B), en décroissement (C) et en rampe et plat (D), (GIDON 1987).

Géométrie des surfaces de chevauchement et coupes équilibrées

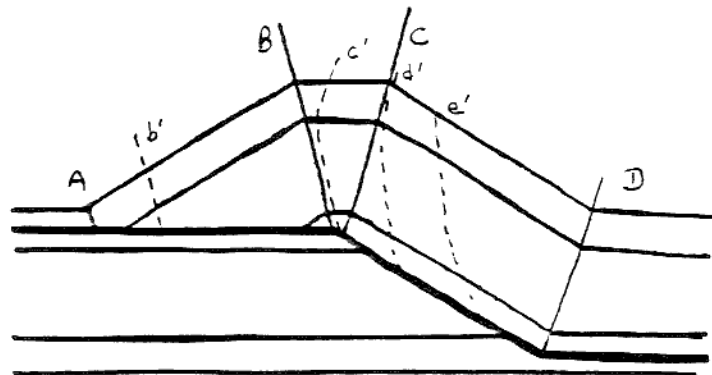




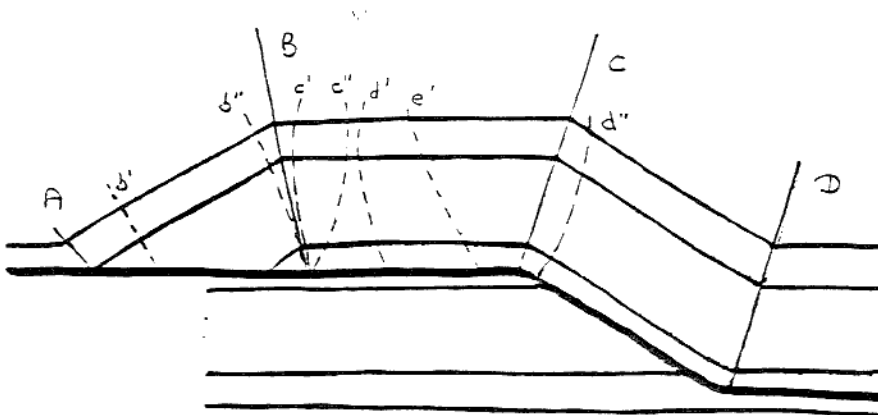
Trajectoire en escalier de la surface de chevauchement au stade initial



Un pli anticlinal se développe. Cet anticlinal est en fait théoriquement constitué de 2 paires de plans axiaux (AB et CD) qui vont évoluer de la manière suivante.



Dans un stade initial de développement, les plans axiaux s'éloignent l'un de l'autre. Les plans B et D sont fixes, alors que A et C sont mobiles.



Le stade final commence quand le plan axial C arrive au contact de B. La paire CD est liée à la rampe du mur, alors que la paire AB est mobile. La paire CD définit l'anticlinal virtuel (spatial anticline) par opposition à

l'anticlinal physique (material anticline) de la paire AB.

Des cisaillements synthétiques pour les charnières synclinales et antithétiques pour les anticlinales traduisent les compressions et décompressions successives subies par le toit par son passage au dessus de la rampe du mur. La règle de conservation de l'angle de recouvrement prend pour hypothèse que ces compressions et décompressions s'annulent mutuellement.

FIG.5. Développement d'un pli passif par chevauchement au dessus d'une rampe. (CRANE 1987)

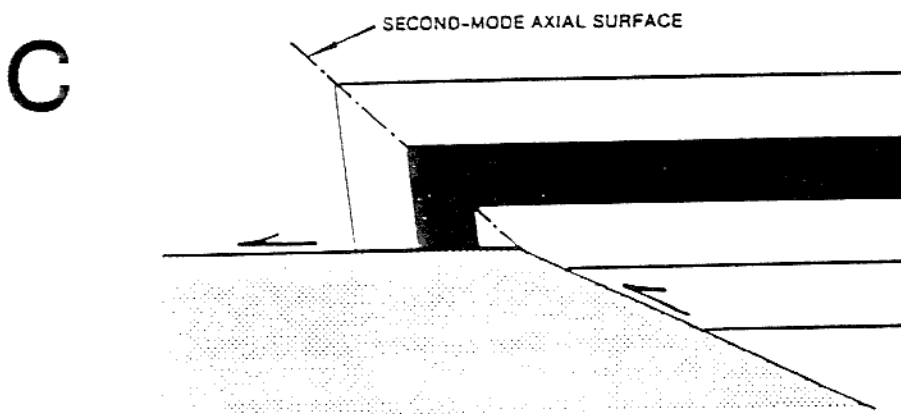
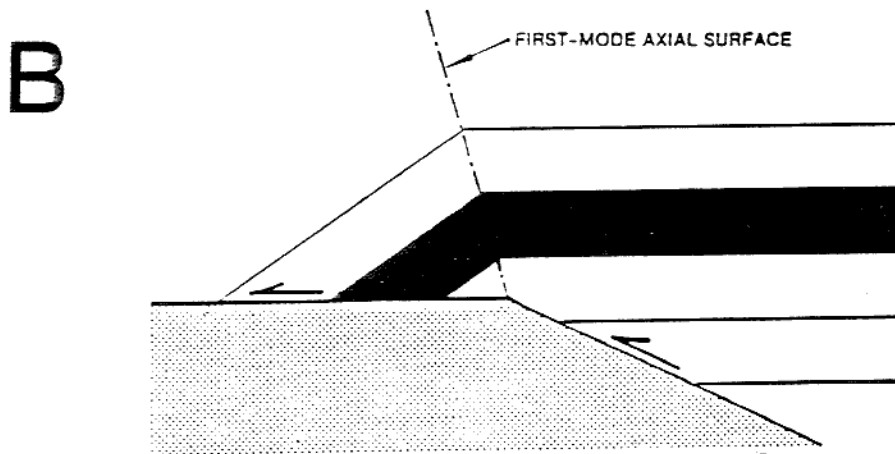
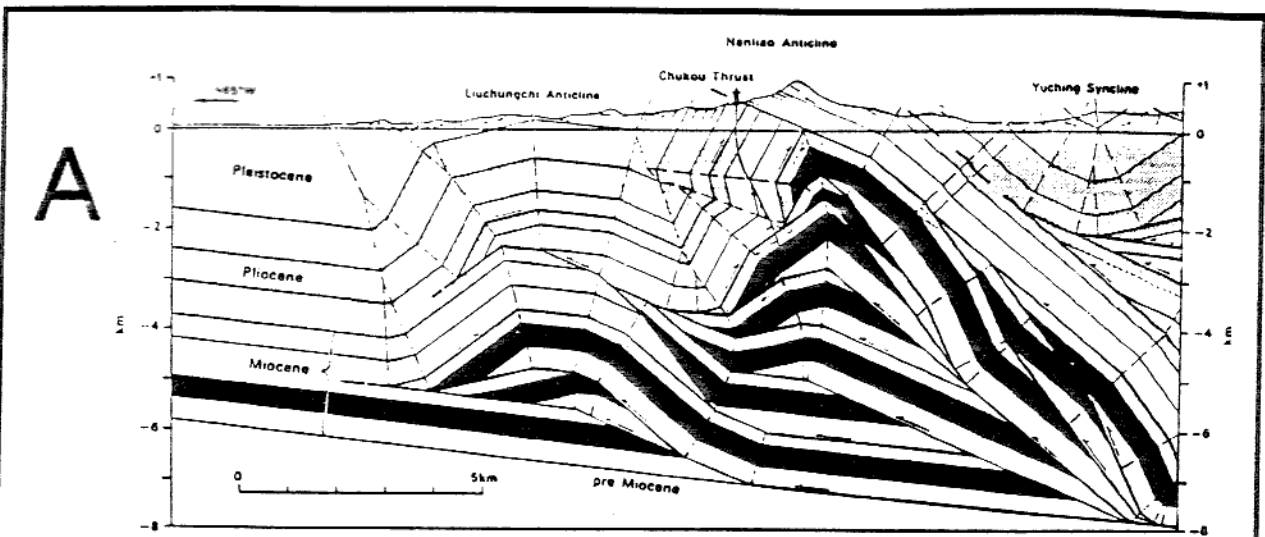


FIG.6. Le type de géométrie «Fault bend folding». (SUPPE 1983)
 Un exemple "naturel" (A). Les deux types possibles de plis (à flanc normal ou inverse) pour un même angle de rampe (B et C). Il s'agit de l'un des rares modèles où le renversement de séries peut-être représenté. Dans ce cadre, les séries renversées sont considérées comme le flanc externe d'un pli anticlinal passif.

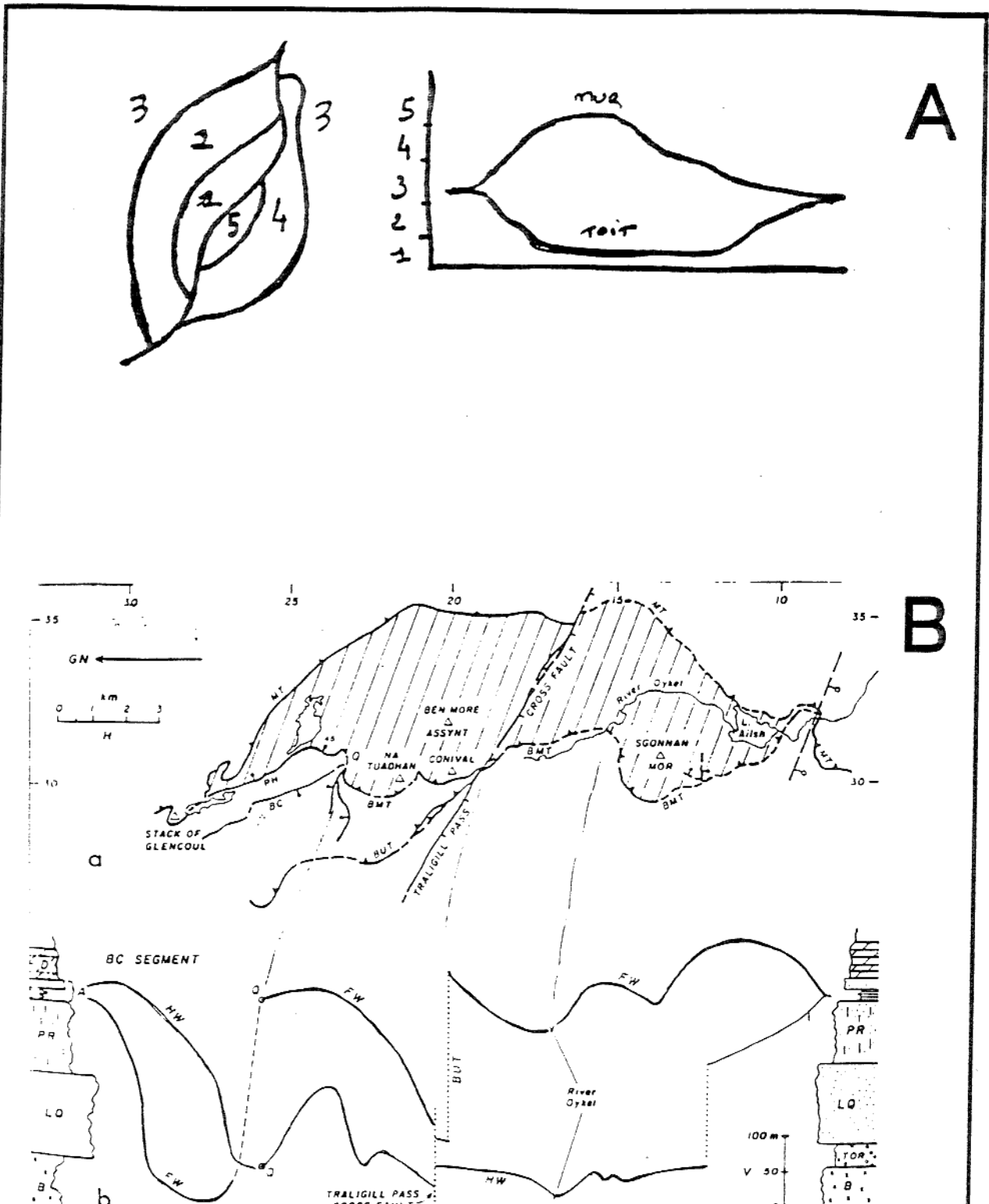


FIG.7. Diagramme stratigraphique au toit et au mur d'un chevauchement. Un schéma (A) et un exemple naturel (B). (ELLIOTT 1980)

On remarquera:

La violation de la règle de superposition au Nord (à gauche sur la figure 7B). Les couches au toit sont plus jeunes que les couches au mur (du point A au point Q) et la courbe du toit est au dessus de celle du mur.

Le pic dans le tracé du toit qui correspond peut-être à un écaillage.

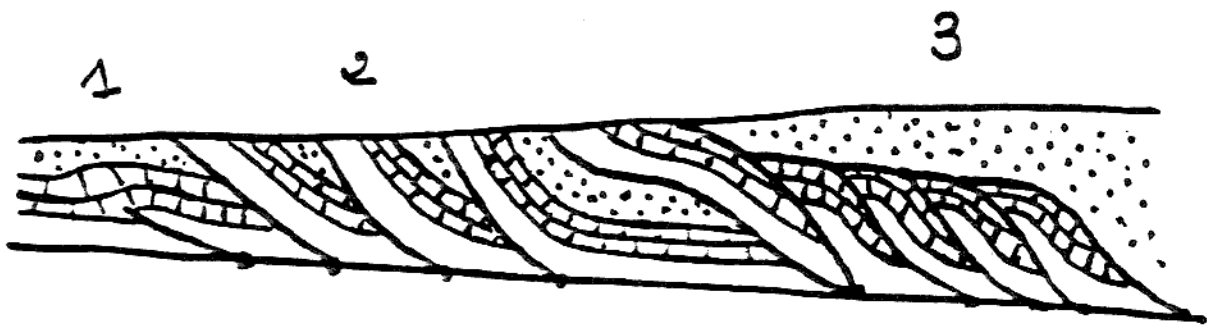


FIG.8. Schéma d'un front de chevauchement avec :
1) Un chevauchement enfoui et son point d'amortissement.
2) des chevauchements émergents
3) des écailles, entièrement délimitées par des surfaces de chevauchement, définissant un duplex.

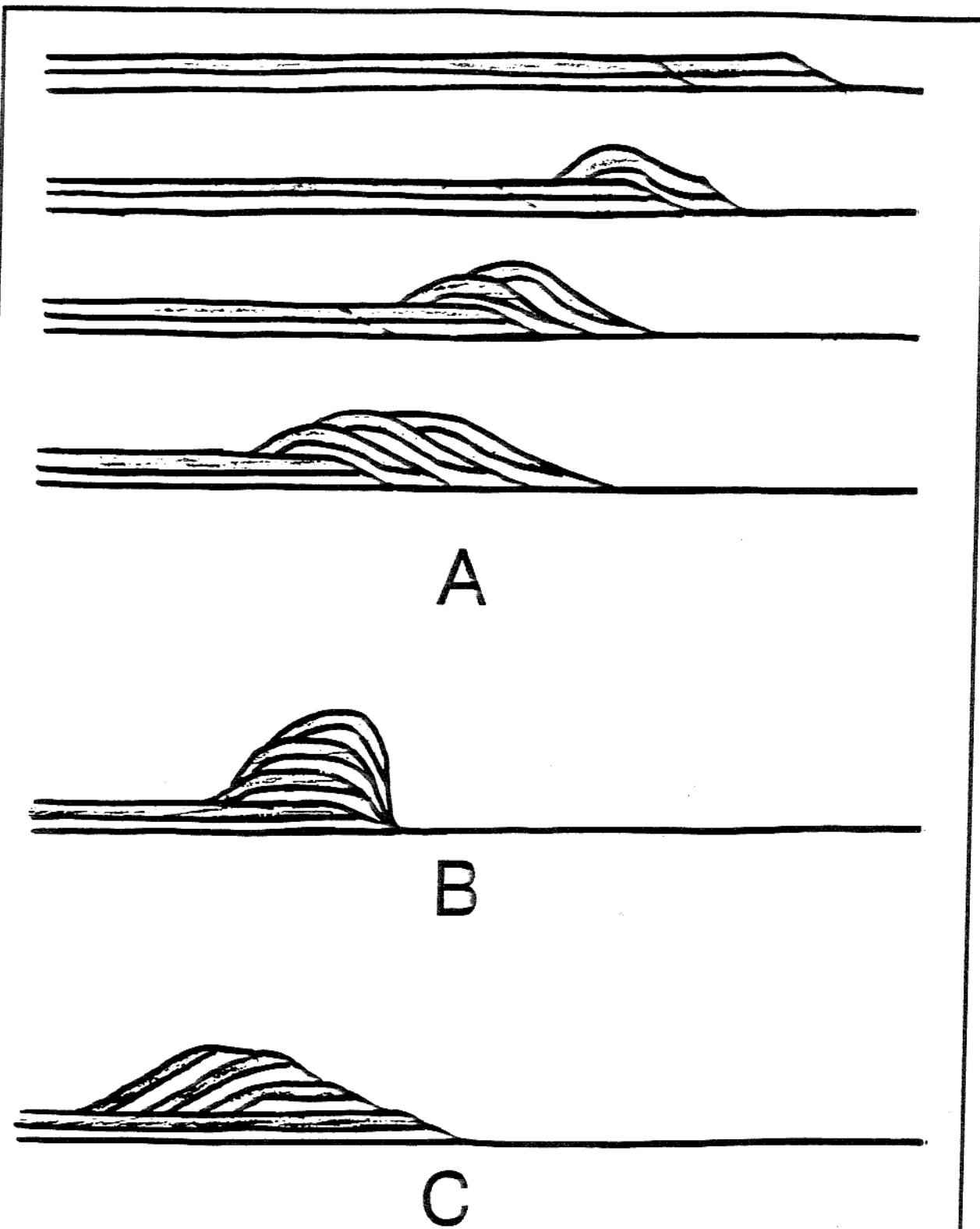


Fig.9. Séquence de chevauchement prograde d'après BUTLER 1987. Selon le rapport entre déplacement et longueurs des écailles, l'empilement des écailles sera d'un type à pendage vers l'arrière-pays (A), en pile antiforme (B) ou à pendage vers l'avant-pays(C). Pour (A) le déplacement D est inférieur à la longueur L des écailles, pour (B) $D=L$ et pour (C) $D>L$.

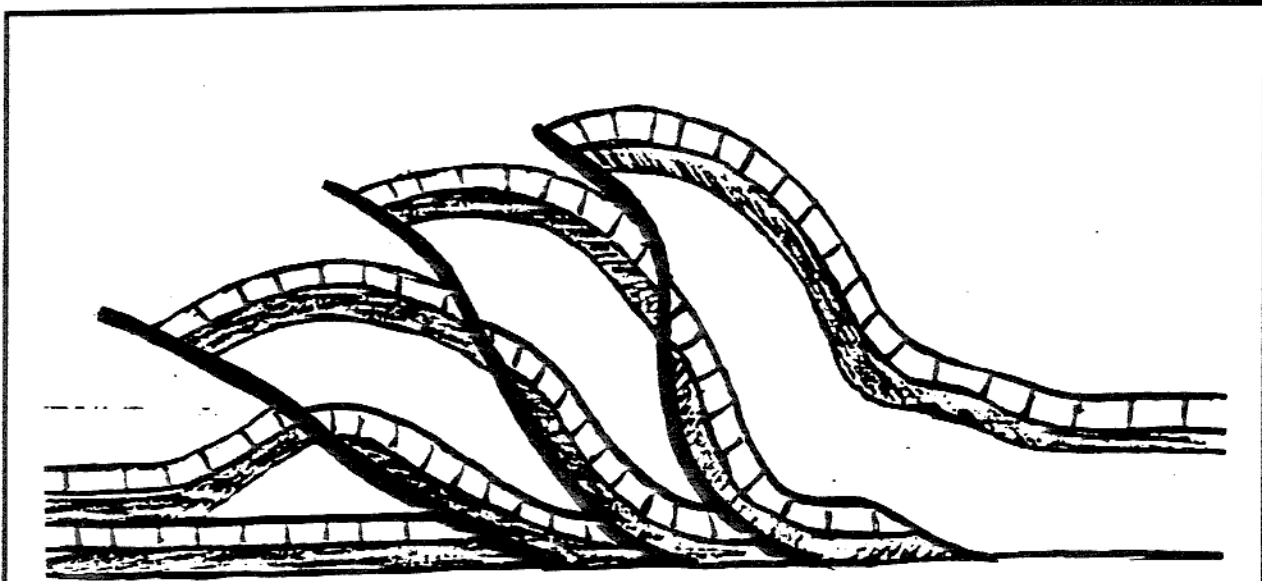


Fig.10 Séquence de recouvrement.

Sur certaines portions de la surface de chevauchement le recouvrement est normal avec des couches plus jeunes sur des couches plus anciennes.

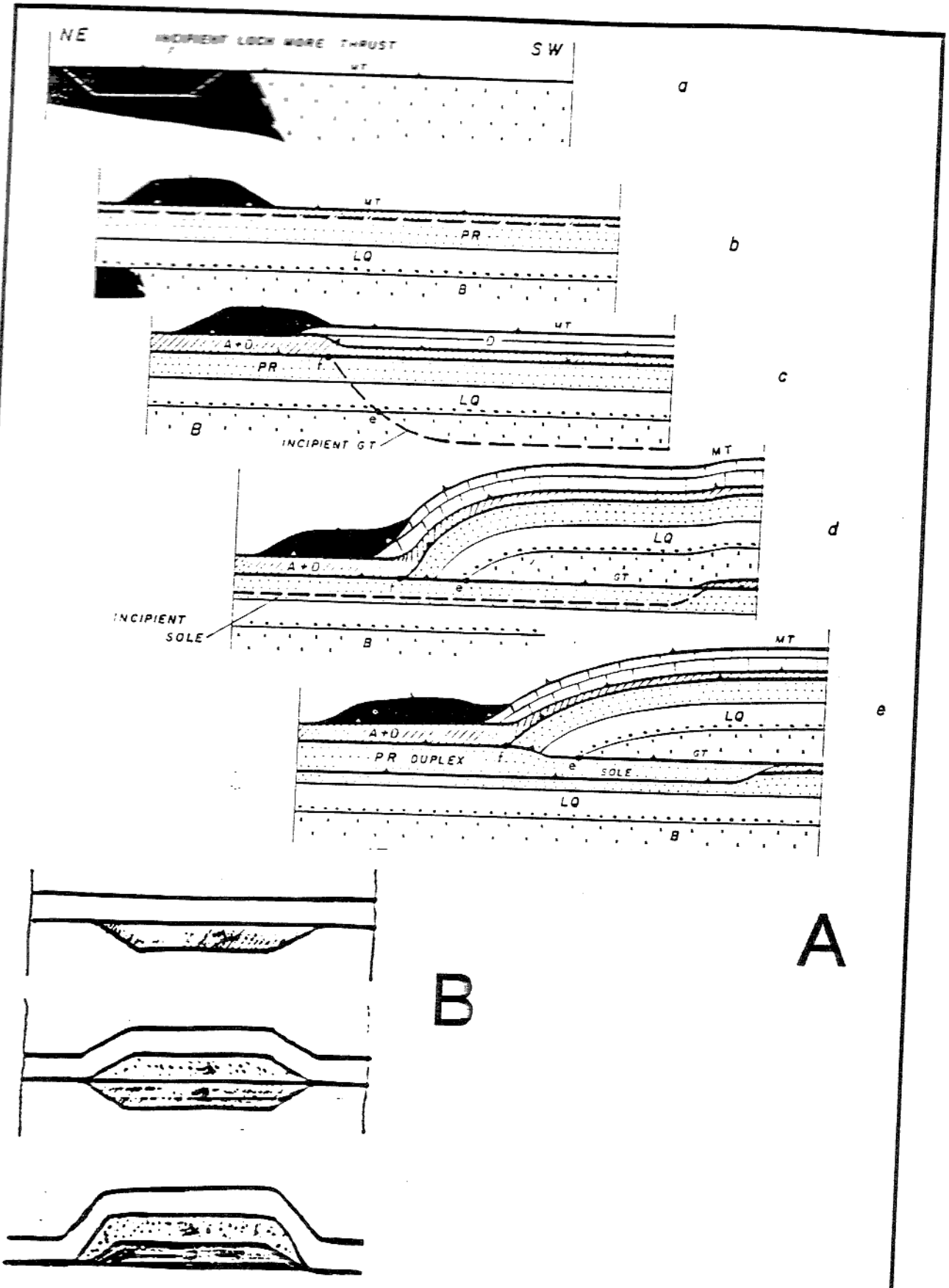
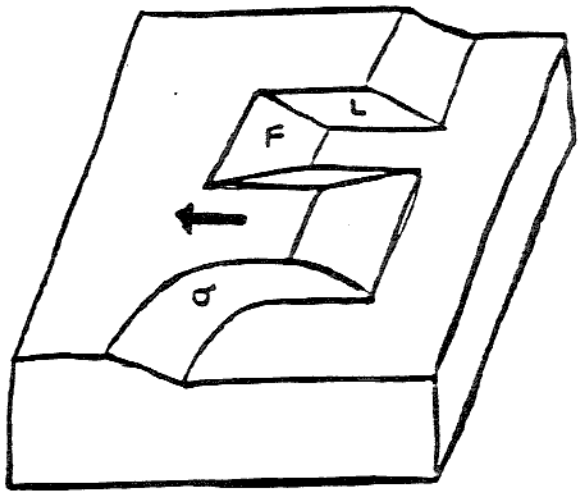


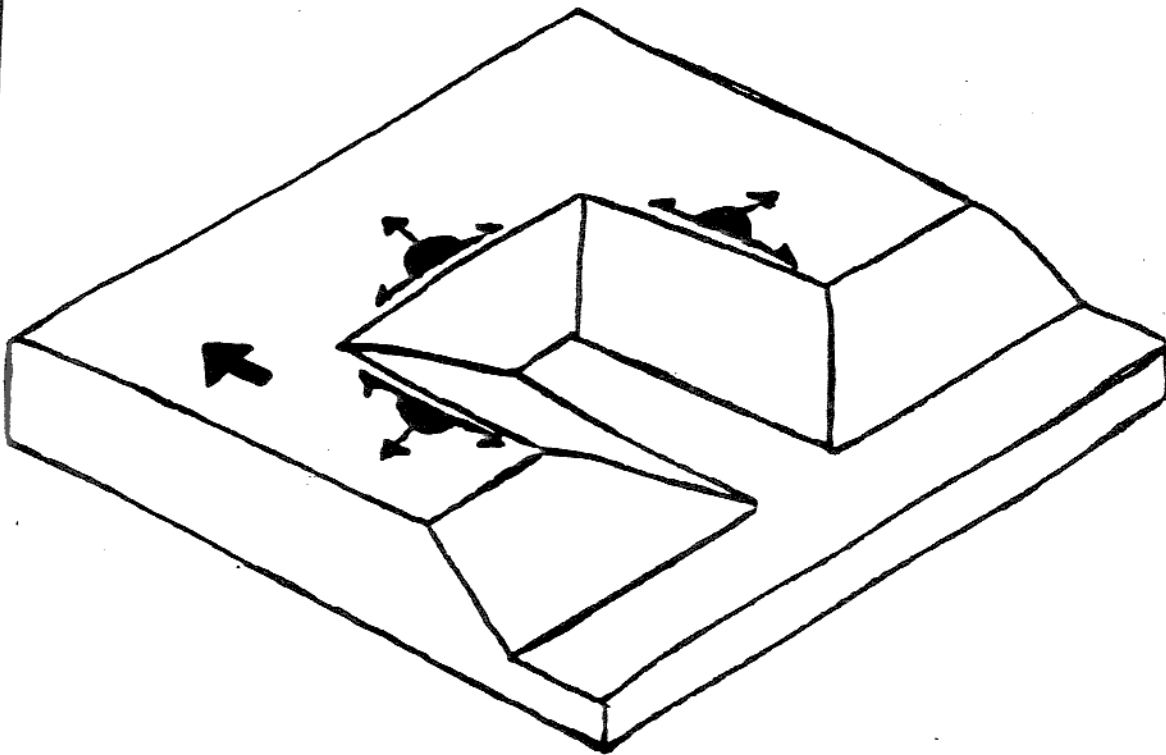
FIG.11. Diagramme de séquence du toit.

Un schéma (A) (DEPAOR 1989) montrant les écaillages successifs du mur et un exemple "naturel" plus complexe (B) (ELLIOTT 1976)



A

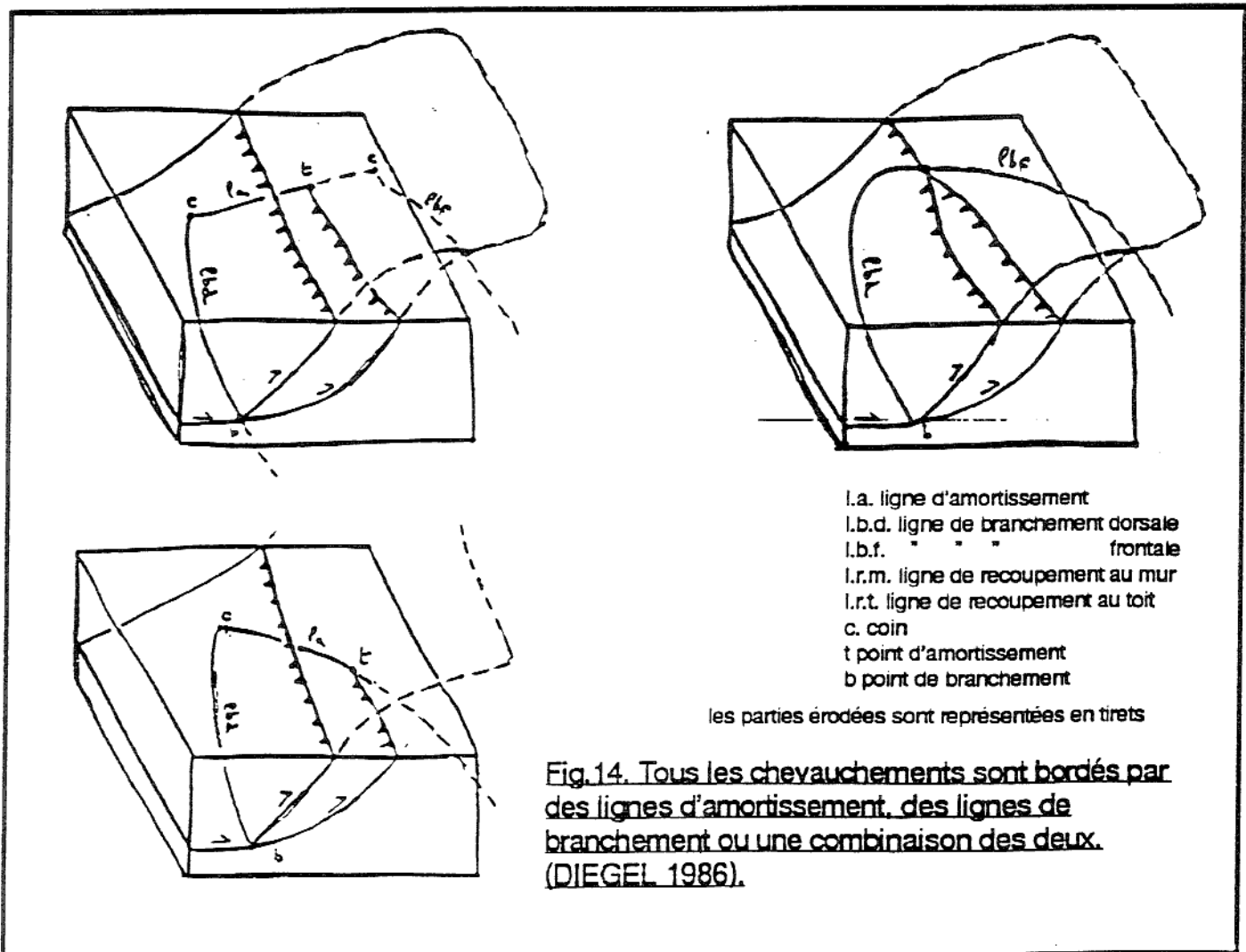
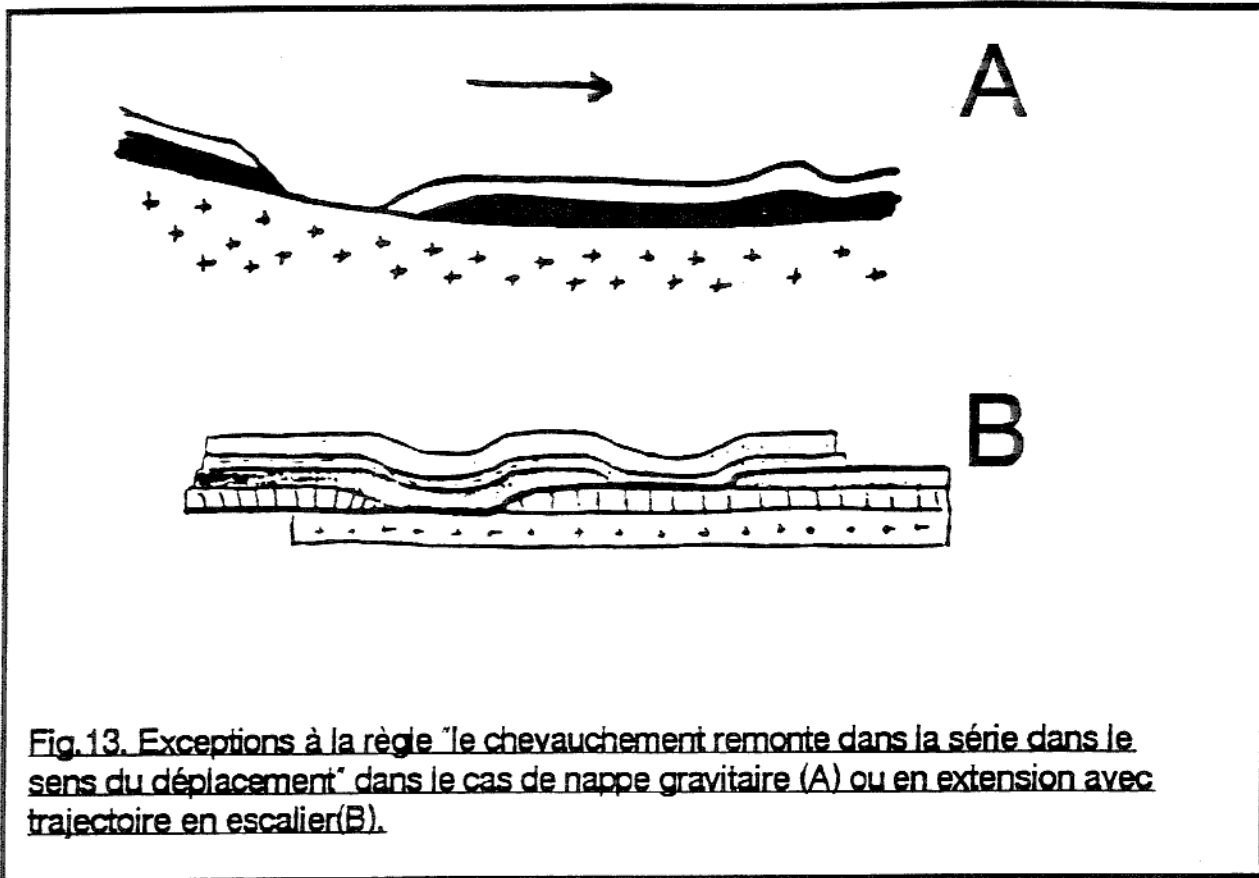
Rampe
L latérale
F frontale
o oblique



B

Directions possibles de déplacement de la nappe en fonction de l'orientation des rampes.

Fig.12. Rampes frontales, obliques et latérales (A)(BUTLER 1981). Règle de compatibilité d'orientation(B)(MUGNIER 1988).



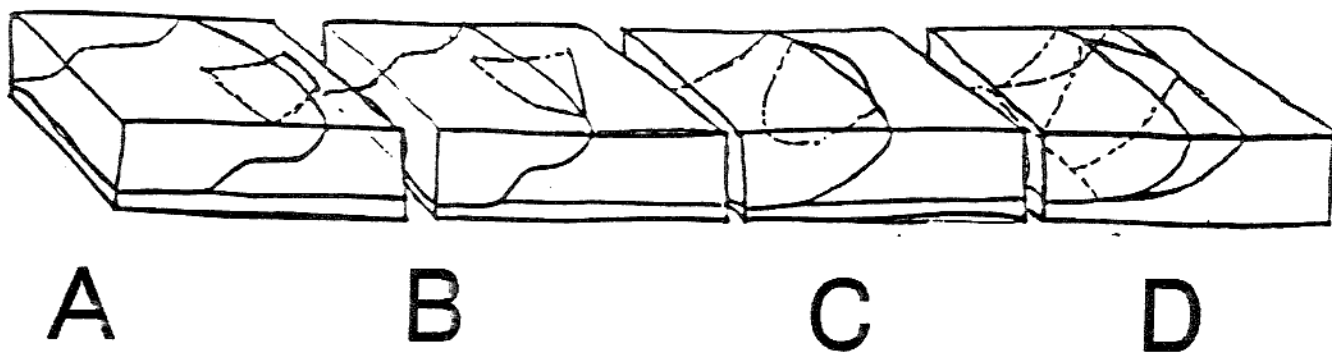


Fig. 15. Un chevauchement présente sur carte une trace soit isolé (A), soit se branchant par une extrémité (B) ou les deux (C) à un autre chevauchement, soit reliant deux chevauchement entre eux (D). (BOYER 1982).

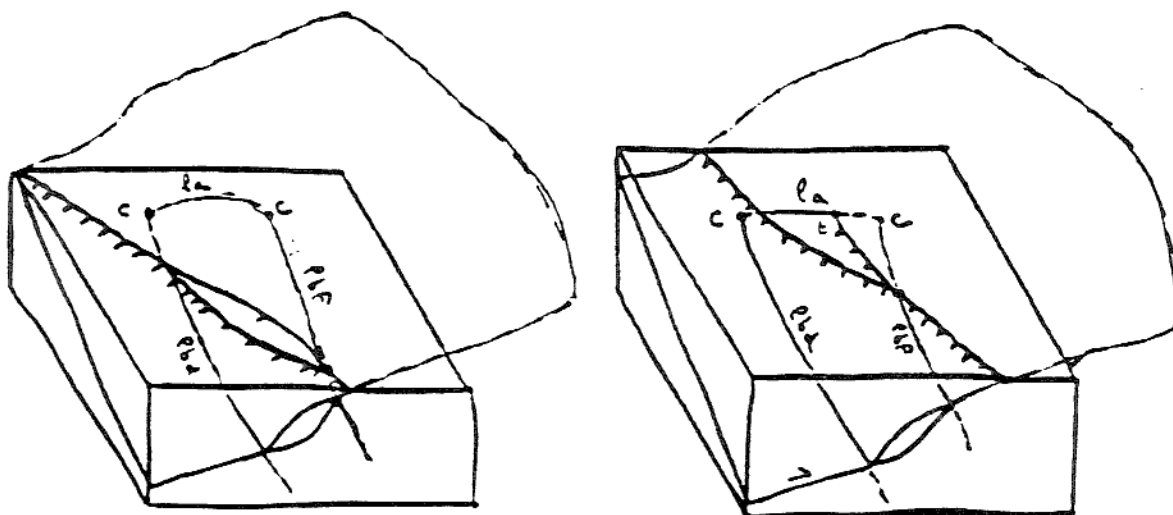


Fig. 16. Selon le niveau atteint par l'érosion, une même écaille présentera des aspects différents en cartes (DIEGEL 1986).

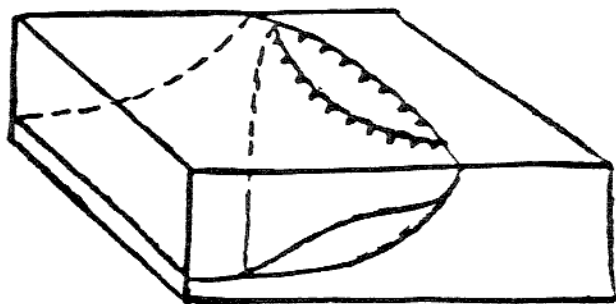


Fig. 17 Différence d'interprétation entre une coupe et une carte (BOYER 1982).

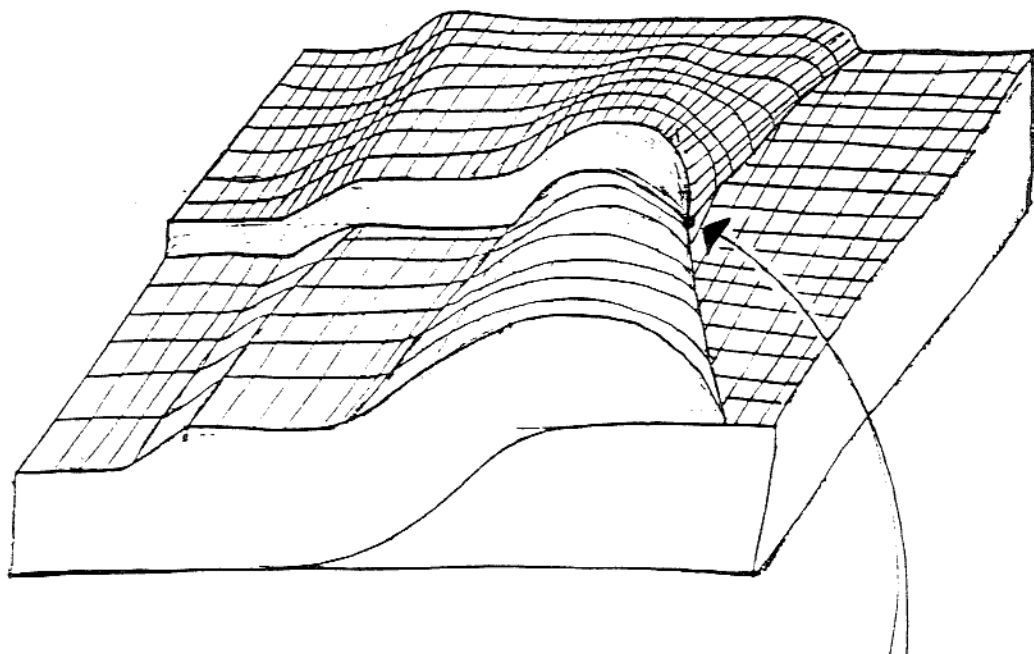


Fig. 18. Les lignes de branchement d'écaillés superposées se croisent en un point.

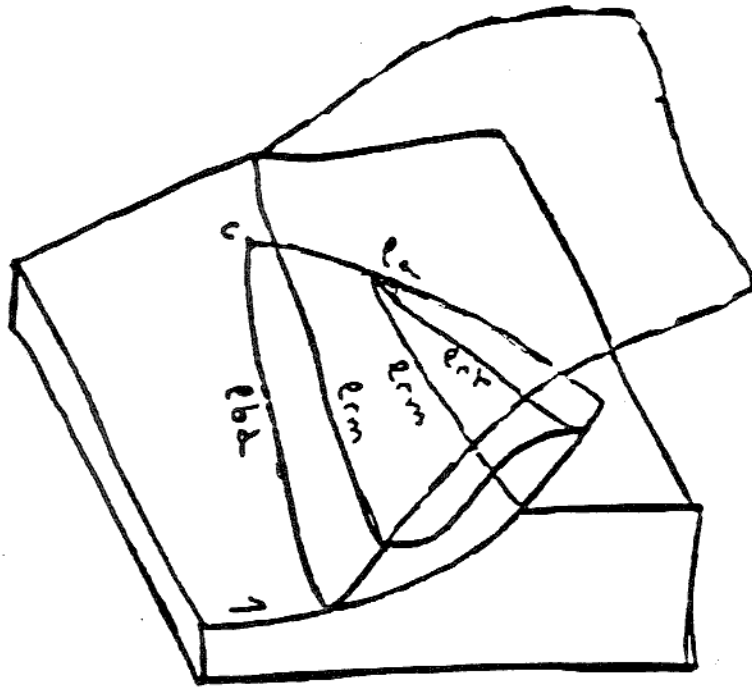


Fig.19. Pour une même surface de chevauchement, chaque horizon stratigraphique faillé présentera une ligne de recoupement au mur et une au toit du chevauchement. Elles se rejoignent, éventuellement, le long de la ligne d'ammortissement (DIEGEL 1986)

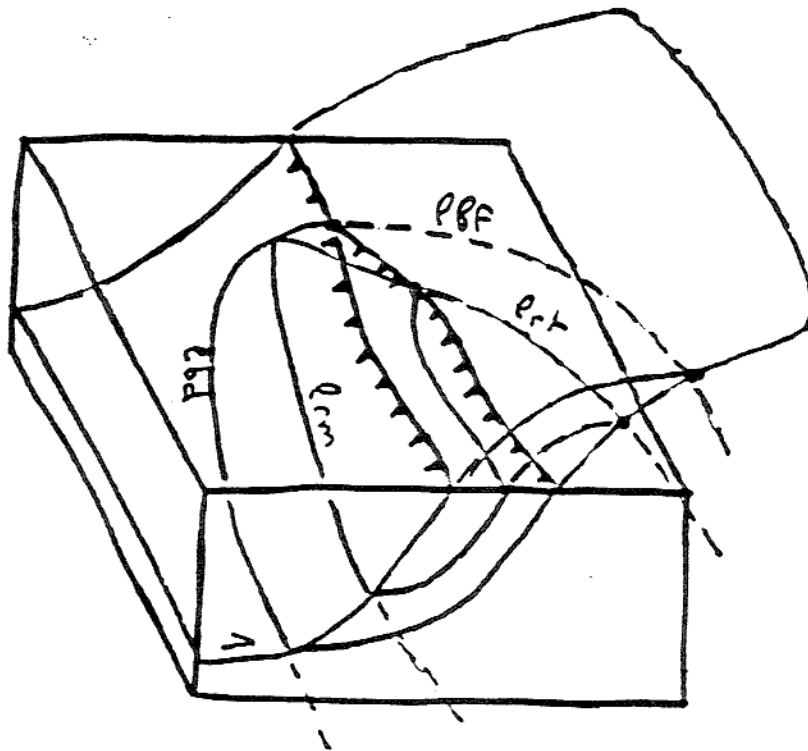
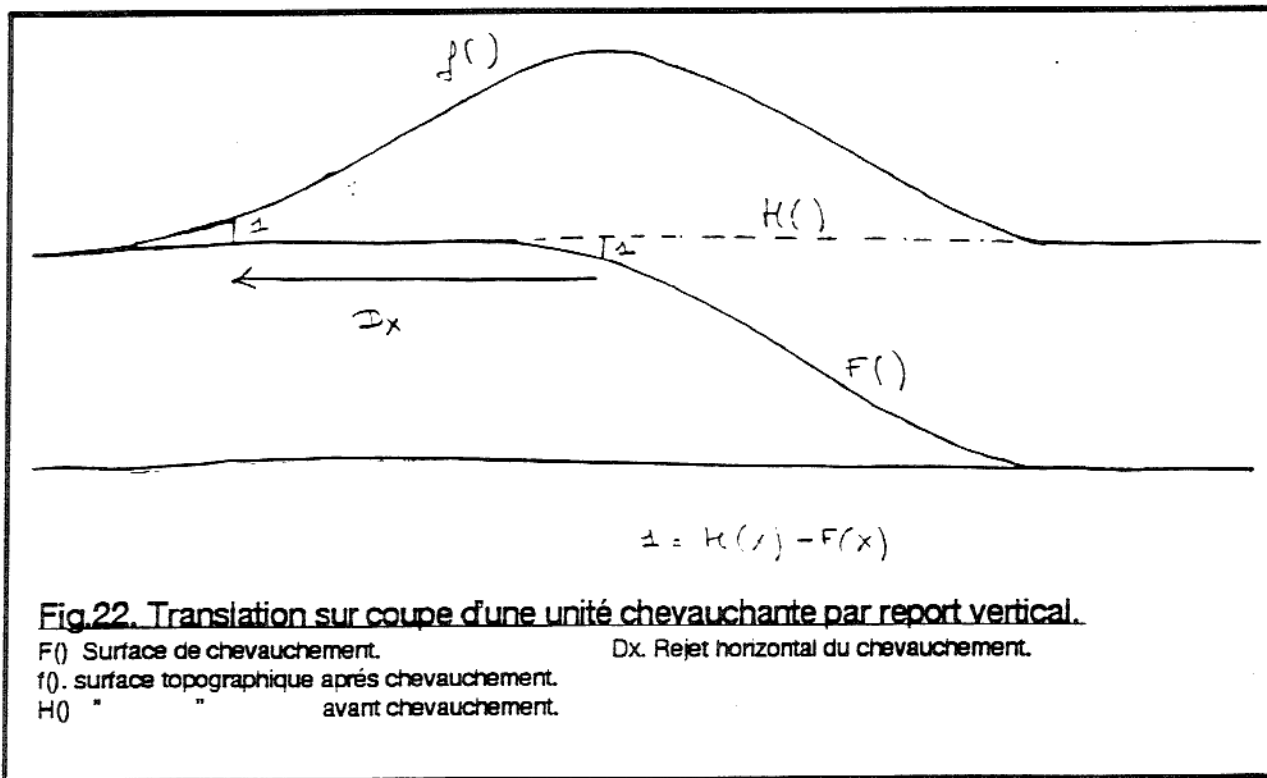
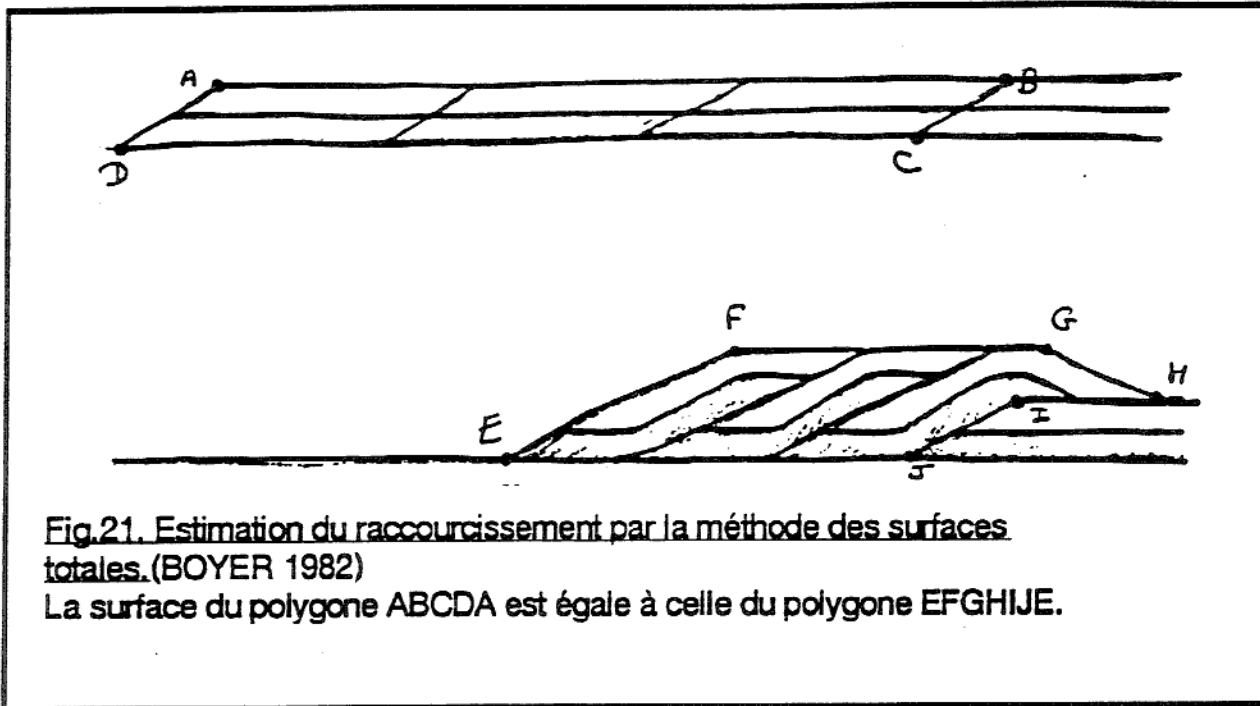


Fig.20. Pour une même écaïlle, la ligne de recoupement au mur et celle au toit d'un même horizon stratigraphique se rejoignent sur la ligne de branchement. La ligne de branchement contient les points de recoupements de tous les horizons stratigraphiques de l'écaïlle.(DIEGEL 1986)

Géométrie des surfaces de chevauchement et coupes équilibrées



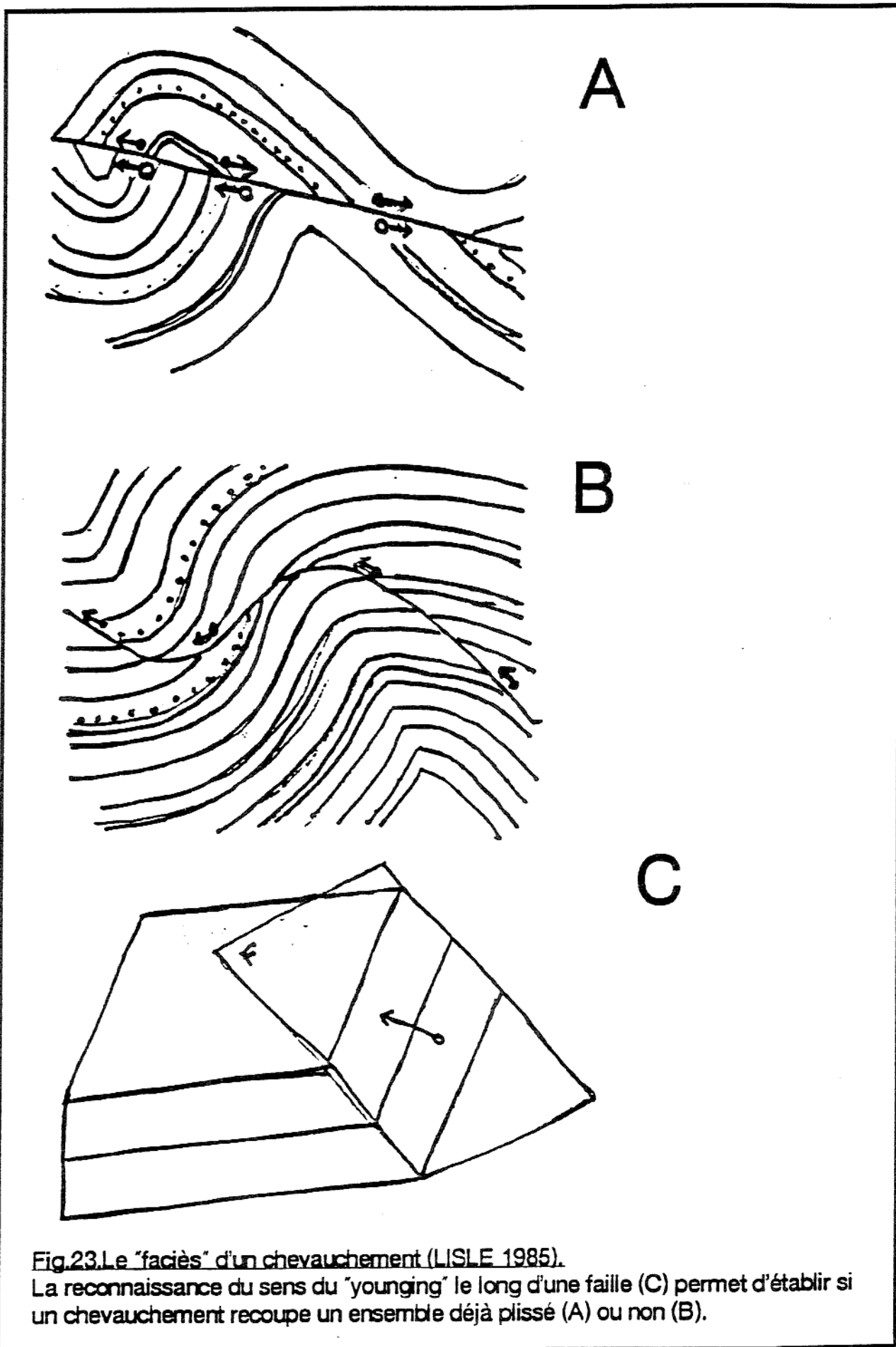


Fig.23. Le "faciès" d'un chevauchement (LISLE 1985).

La reconnaissance du sens du "younging" le long d'une faille (C) permet d'établir si un chevauchement recoupe un ensemble déjà plissé (A) ou non (B).

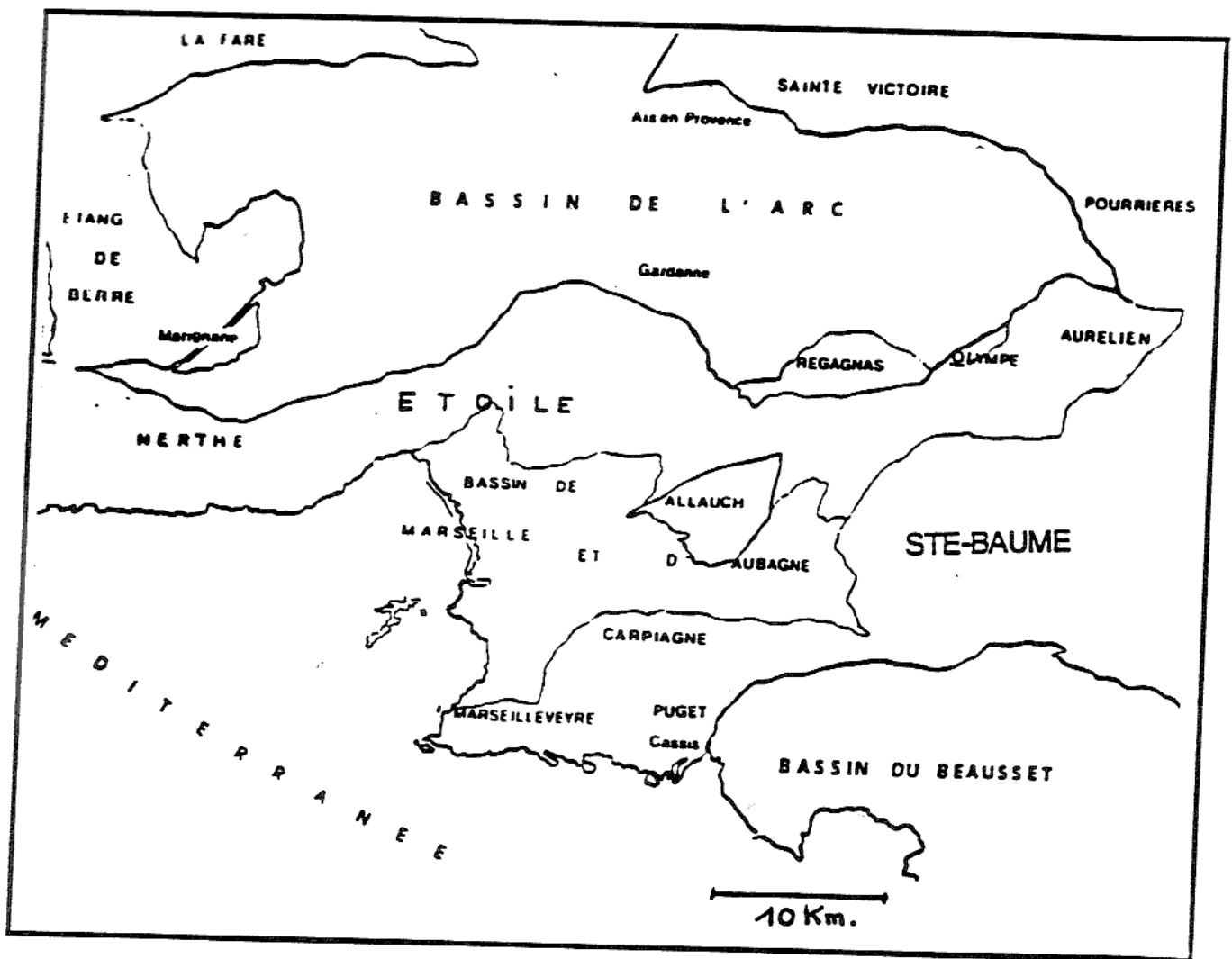
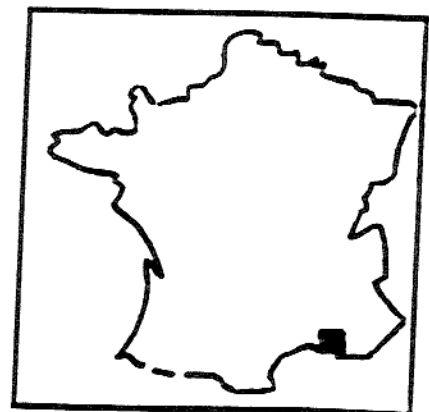


Fig.24. Situation géographique.



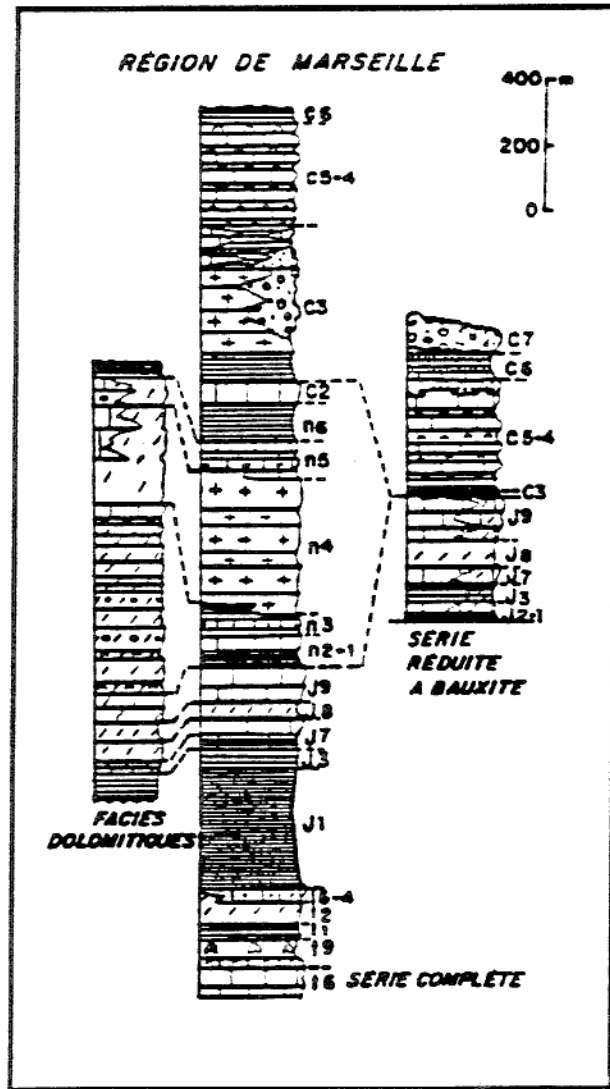


Fig.26. Colonnes stratigraphiques en Basse-Provence Méridionale. (GOUVERNET 1979).
Notations de la carte géologique de la France au 1/50 000°.

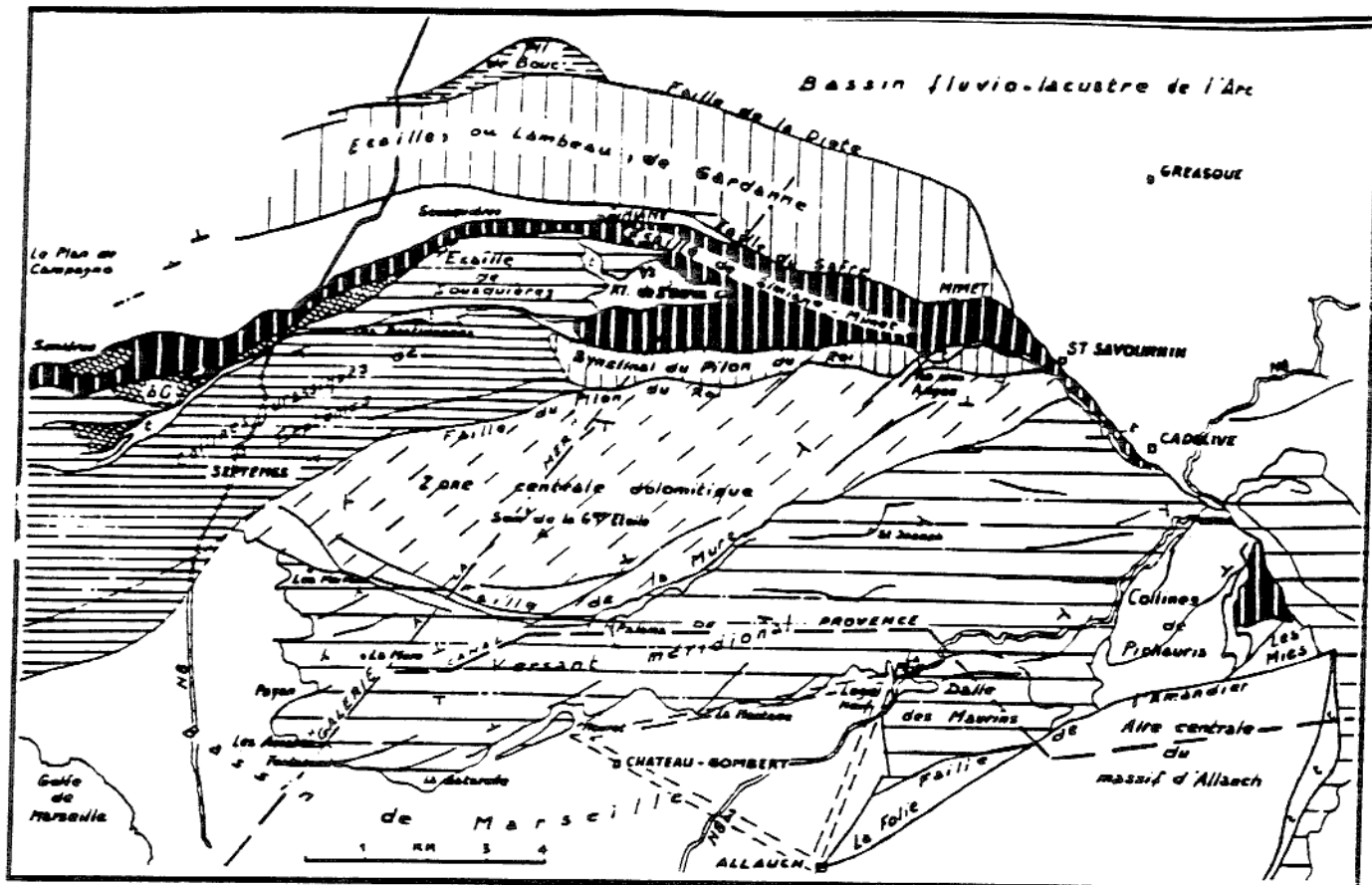
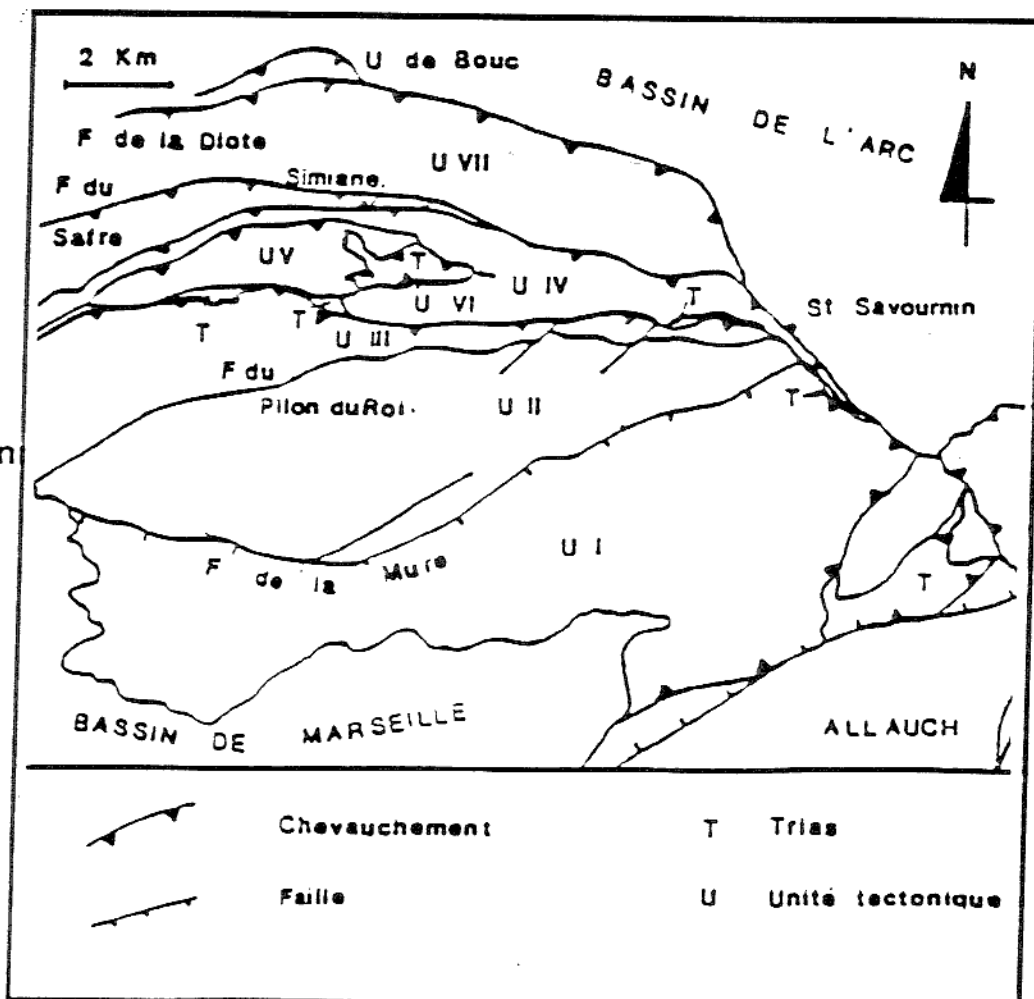


Fig.27. Schéma structural du chevauchement de l'Etoile, d'après G.GUIEU, 1968.

Le schéma simplifié, ci contre, présente les différentes unités :

- U VIII : Ecaille de Gardanne.
- U VII : Ecaille de Simiane-Mimet.
- U V : Lambeau de Sousquières.
- U IV : Trias de St-Germain.
- U III : Syndinal du Pilon du Roi.
- U II : Zone centrale dolomitique.
- U I : Plateau de la Mure.



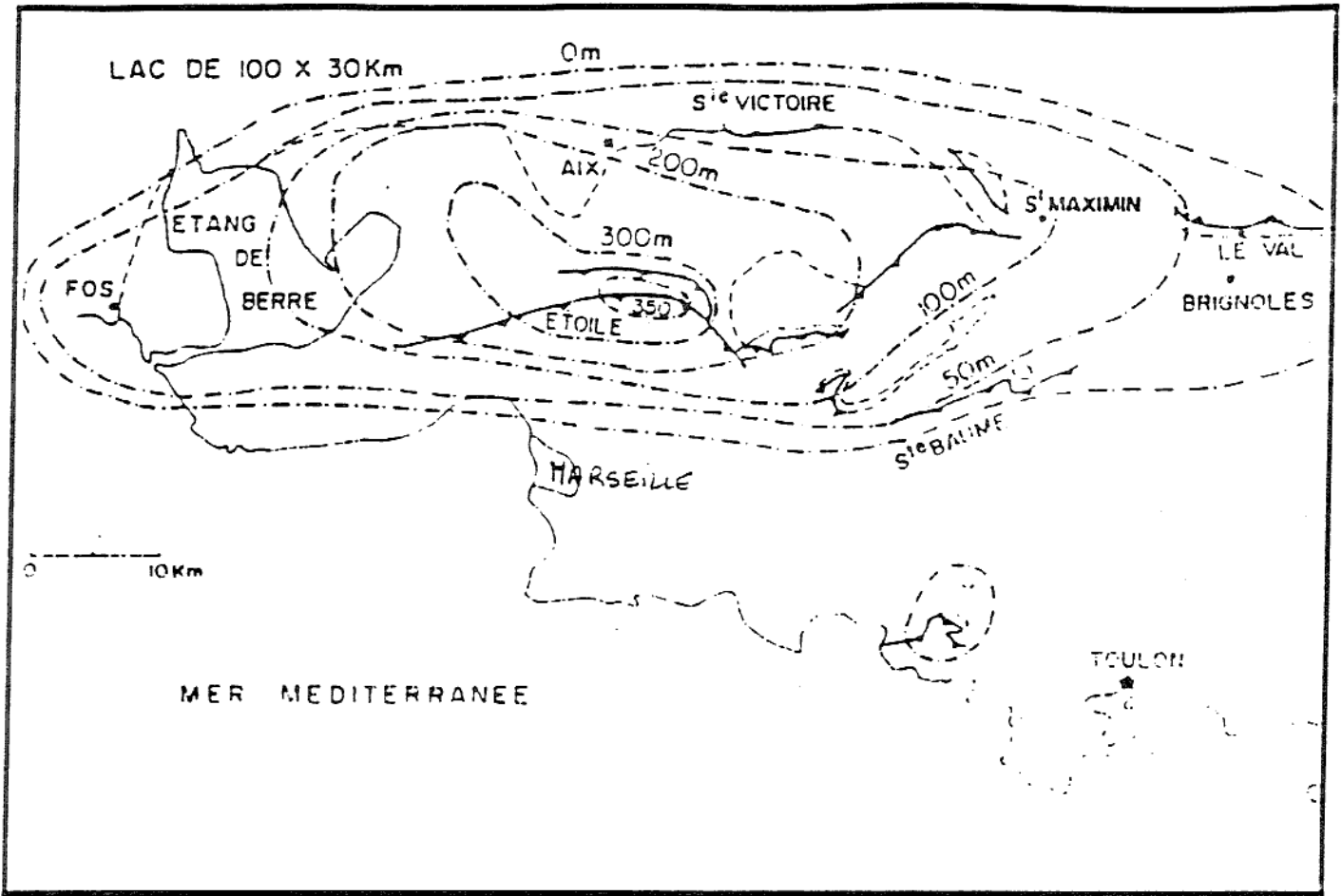


Fig.28. Limites du bassin de l'Arc au Fuvélien. (à partir des variations d'épaisseur du Fuvélien) (DURAND 1980).

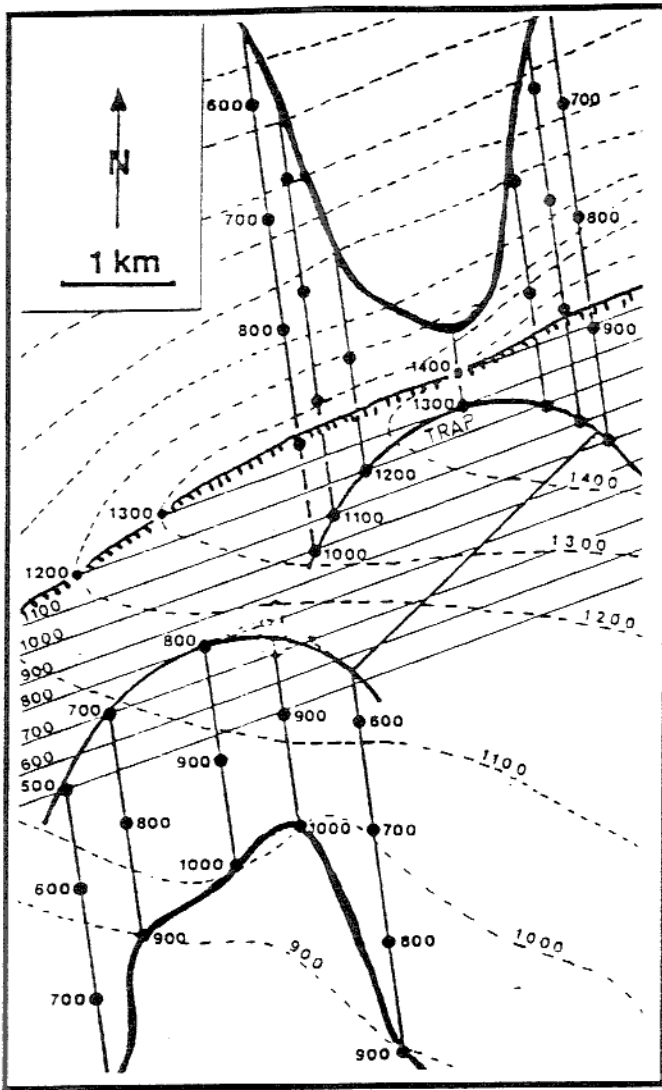





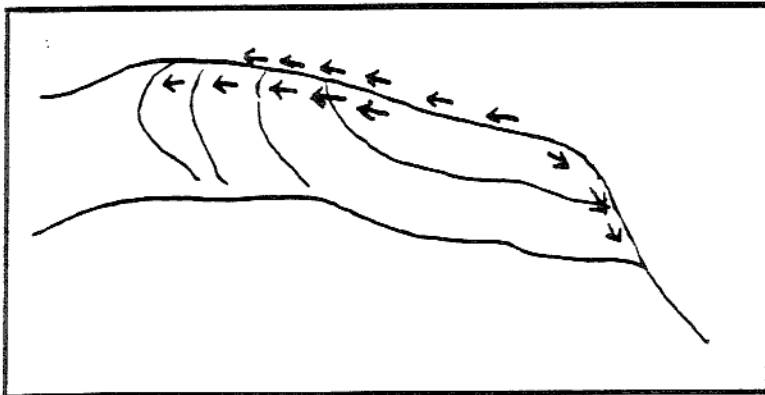


Fig.29. Lignes de recoupement au toit et au mur d'une faille (DEPAOR 1988). Dans cet exemple, les lignes de recoupement sont obtenues à partir des lignes d'affleurements en surface par projection selon des lignes de plongement.

-  Tracé de la faille X en surface.
-  Ligne d'affleurement en surface d'un niveau stratigraphique Y.
-  Lignes de plongement.
-  Courbes de niveau topographiques.
-  Lignes de recoupements du niveau repère Y avec la faille X.



← Sens du "Younging".

Echelle 1/250.000°

Fig.30. Sens du "younging" au toit et au mur du chevauchement de la Diote.

En utilisant la méthode définie par LISLE R.J (Cf Géométrie des surfaces de chevauchement), il faut constater que la forme concentrique des lignes d'affleurements au toit de la surface du chevauchement de la Diote est la traduction cartographique de la formation d'un pli passif lors du franchissement de la rampe.

En effet au toit se produit une variation dans le sens du "younging" qui ne s'observe pas au mur : ceci indique un plissement induit par le chevauchement.

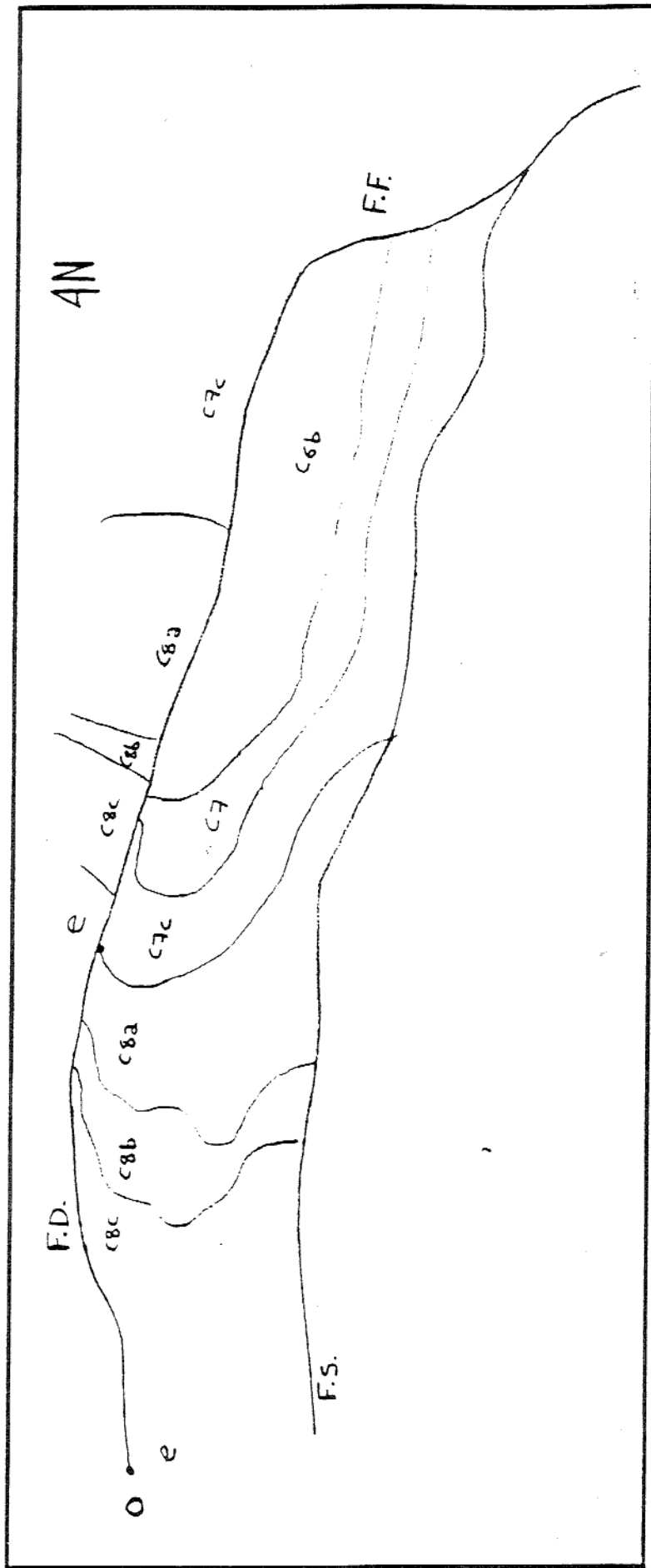


Fig.31. Contours géologiques du lambeau de Gardanne (Extrait de la carte géologique au 1/50.000° Aix-en-Provence. Seul sont figurés :

→ les limites stratigraphiques. (Notation de la carte géologique).

→ les points de recouvrement au mur et au toit de ces limites avec le tracé du chevauchement de la Diote.

O point d'amortissement

FS faille du Safré

FD faille de la Diote

FF faille de Fontbelle

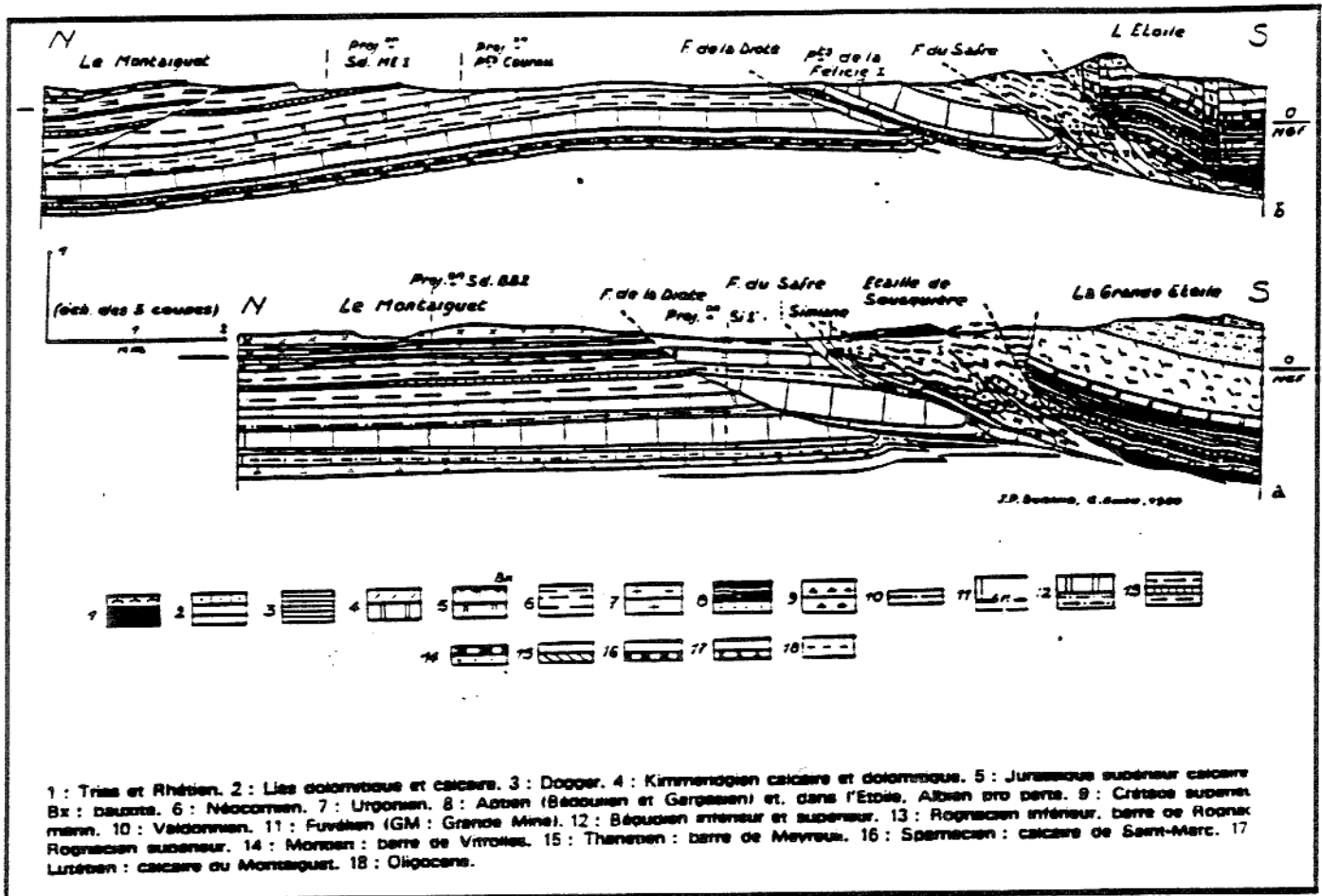


Fig.32 Coupes dans le bassin de l'Arc.

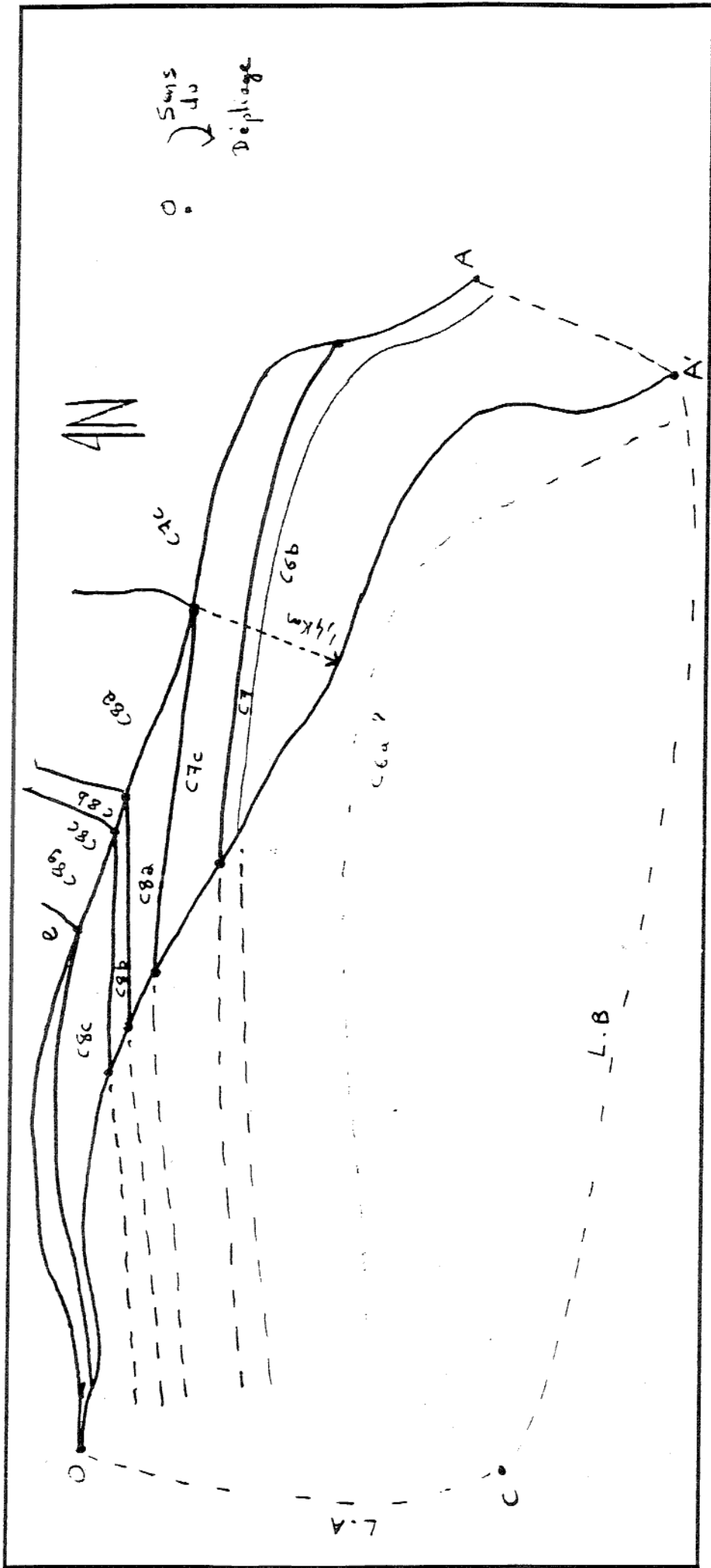


Fig. 33. Dépliage en utilisant les lignes de recouvrement.

Les lignes de recouvrement sont tracées sur la surface du chevauchement de la Diote.

Elles sont interpolées en rejoignant les points de recouvrement au mur et ceux au toit après rotation du tracé de la surface de chevauchement.

Pour mieux se représenter la surface de chevauchement, notons que la ligne OA' est moins élevée que la ligne OA (représentant le tracé actuel du chevauchement en surface). Les lignes de recouvrement pendent légèrement vers l'ouest.

O Point d'amortissement.

LA ligne d'amortissement.

LB ligne de branchement.

C Coin (Point où la ligne de branchement rejoint la ligne d'amortissement).

La localisation de la limite Valdonien-Fuvélien au mur de la surface de chevauchement doit se faire au sud de la ligne OA' car aucun point de recouvrement de cette limite ne s'y observe. L'augmentation de la largeur d'affleurement ainsi obtenue correspond à une horizontalisation de la surface de chevauchement au niveau du plat de la base du Valdonien.

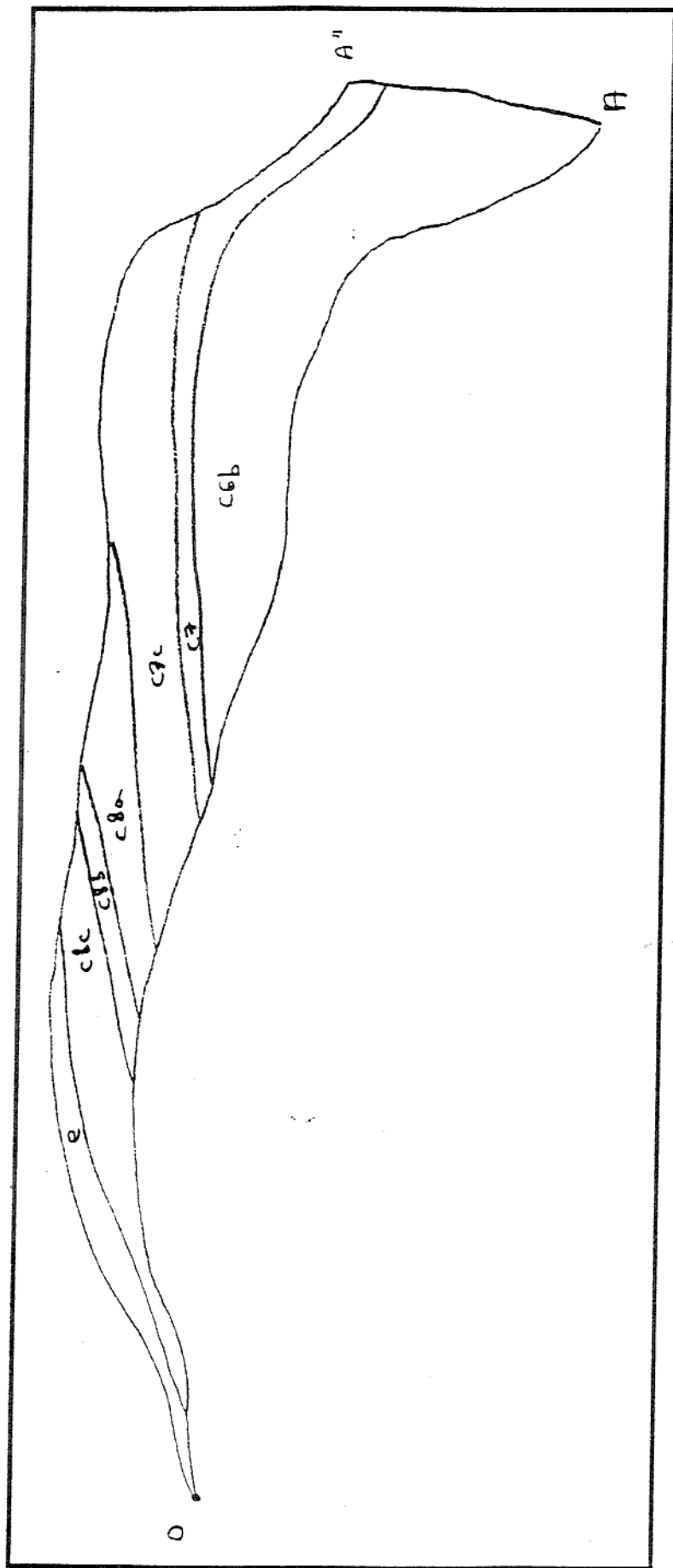


Fig. 34 Reconstitution de la partie érodée de l'écaille de Gardanne.
OA tracé actuel en surface de la faille de la Diote

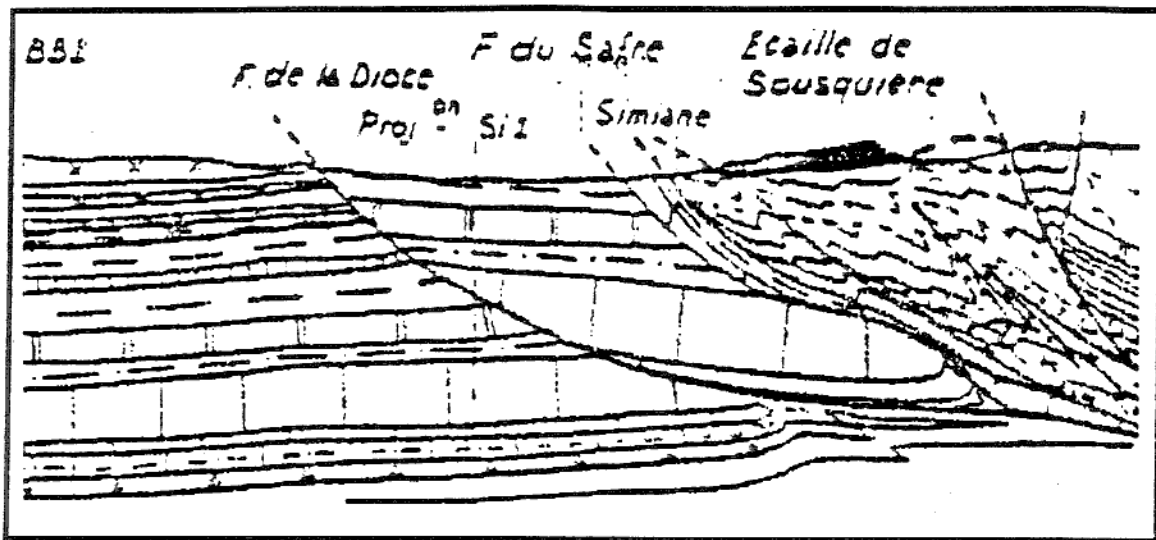


Fig.35 Coupe scannerisée.

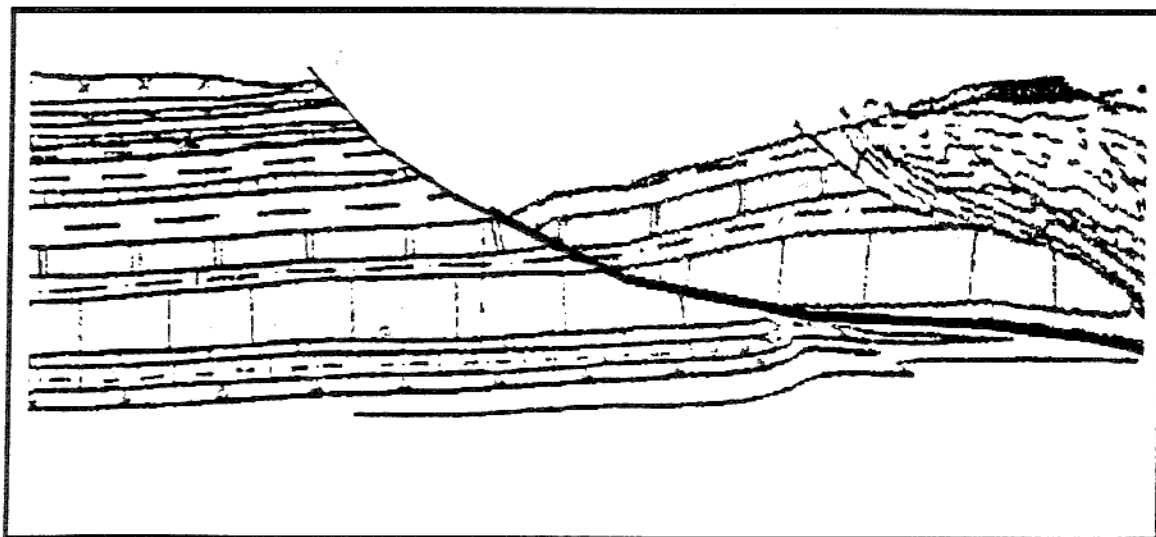


Fig.36 Coupe dépliée.

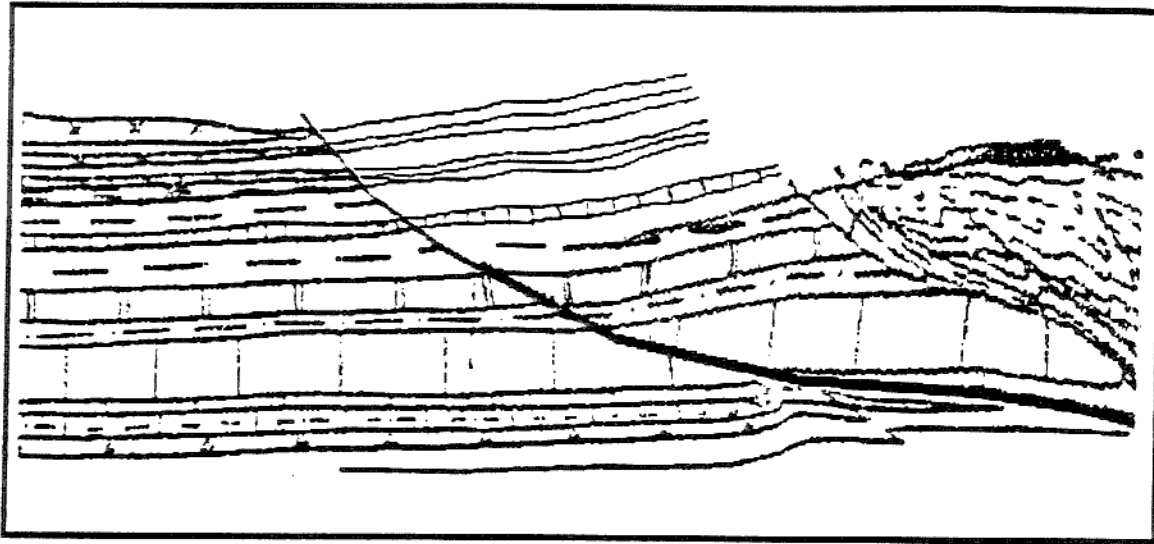


Fig.37 Coupe dépliée «reconstituée».

La partie érodée ayant été redessinée à la souris, le tracé est très grossier.

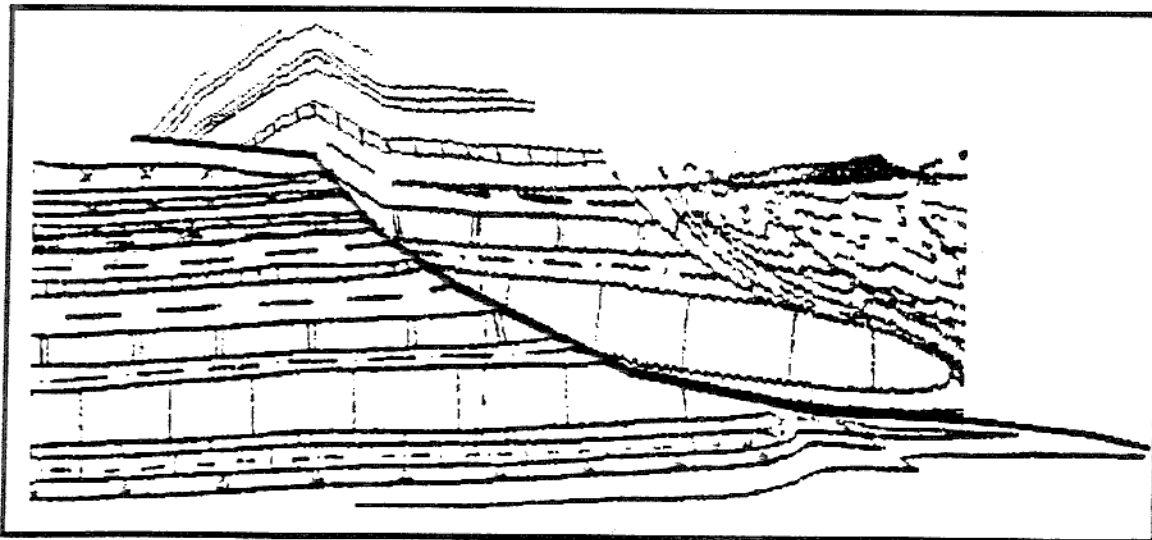


Fig.38 Coupe «reconstituée repliée».

Calcul de la surface d'un polygone

	X	Y	
A	5	5	-119
B	12	12	-340
C	22	22	100
D	28	20	0
E	34	20	-75
F	41	21	0
G	48	21	108
H	60	20	130
I	70	19	0
J	77	19	0
K	86	19	1232
L	68	11	636
M	38	5	0
N	10	5	0
A	5	5	836 En mm2

Echelle en mm/Km >>>>35
 Epaisseur Strati. en Km >>>0.2
 Longueur initiale en Km >>>3,4122449

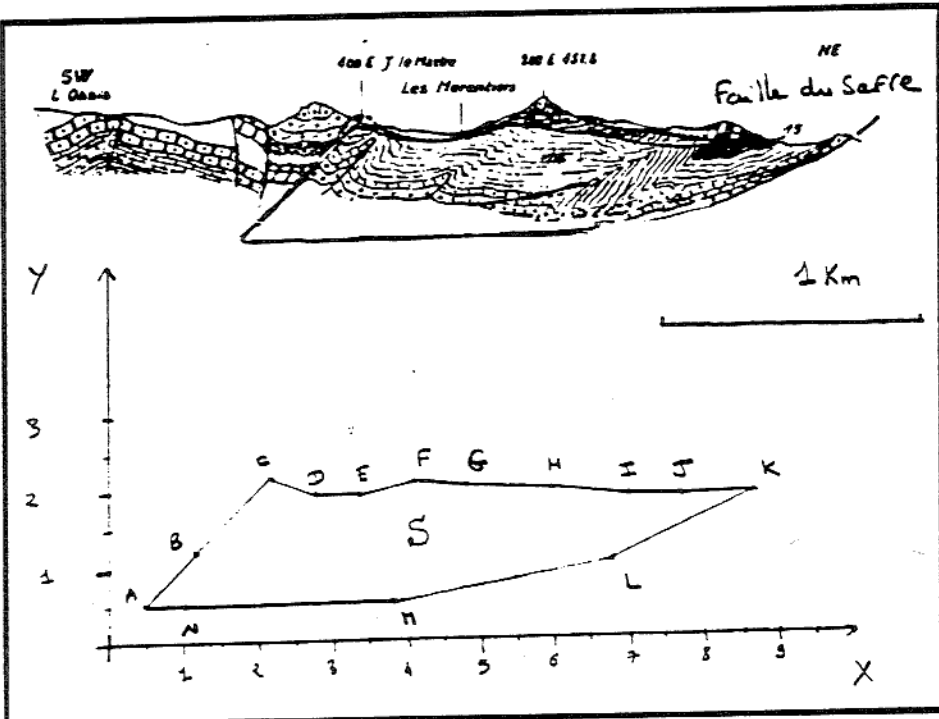
Calcul de la surface d'un polygone

	X	Y	
A	5	5	=(B3+B4)*(C3-C4)
B	12	12	=(B4+B5)*(C4-C5)
C	22	22	=(B5+B6)*(C5-C6)
D	28	20	=(B6+B7)*(C6-C7)
E	34	20	=(B7+B8)*(C7-C8)
F	41	21	=(B8+B9)*(C8-C9)
G	48	21	=(B9+B10)*(C9-C10)
H	60	20	=(B10+B11)*(C10-C11)
I	70	19	=(B11+B12)*(C11-C12)
J	77	19	=(B12+B13)*(C12-C13)
K	86	19	=(B13+B14)*(C13-C14)
L	68	11	=(B14+B15)*(C14-C15)
M	38	5	=(B15+B16)*(C15-C16)
N	10	5	=(B16+B17)*(C16-C17)
=S4S3 =S8S3 =S13S3 =SOMME(D3:D16)/2			
En mm2			
Echelle en mm/Km >>>> 35			
Epaisseur Strati. en Km >>> 0.2			
Longueur initiale en Km >>> =D17/(C19*C18)/C18			

Calcul de la surface d'un polygone

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} (x_i + x_{i+1})(y_i + y_{i+1})}{2}$$

avec n = nombre de sommets.
 et
 $x_{n+1} = x_1$
 $y_{n+1} = y_1$



La faille du Safré et la surface du chevauchement de l'Etoile délimitent l'échelle aptienne de Simiane-Mimet (ces failles sont prolongées en profondeur).

$S = l \times e$ avec
 l : longueur initiale des couches.
 e : épaisseur stratigraphique.

—> la longueur initiale approximative des couches est d'environ 3,5 Km.

Les coordonnées (X,Y) sont en mm.

Fig.39 Application de la méthode des surfaces totales.

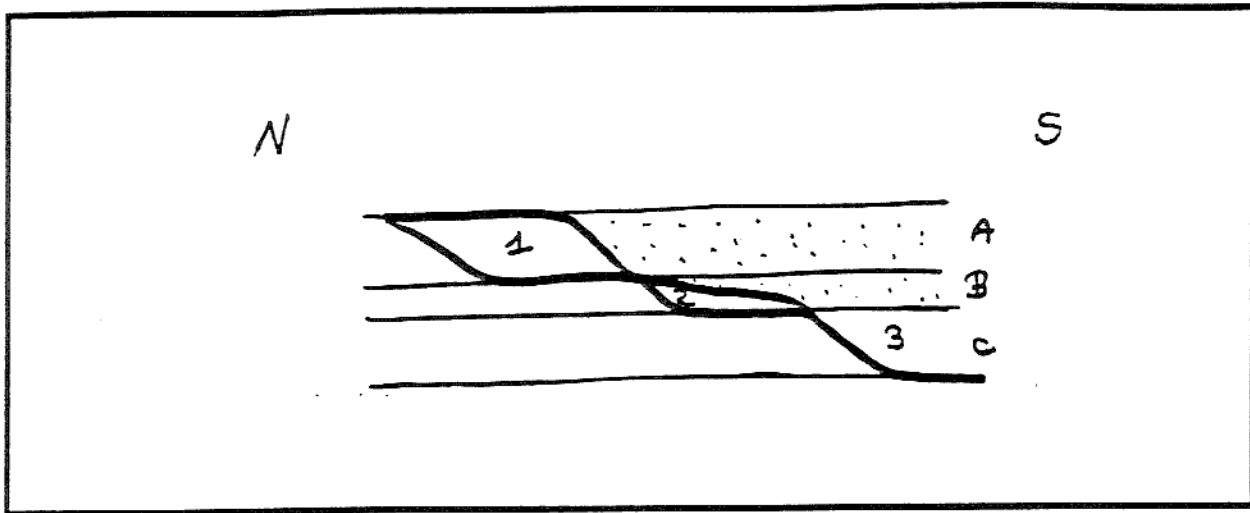


Fig.40 Reconstitution avec des couches horizontales.

Si le modèle avec des couches initialement horizontales est choisi, les volumes au-dessus des écaïles 2 et 3 devraient apparaître en leur sein.

1 écaïlle de Gardanne.

2 écaïles imbriquées dans la faille du Safré.

3 écaïlle aptienne de Simiane-Mimet.

A Crétacé supérieur continental.

B Crétacé supérieur marin.

C Aptien-Albien.

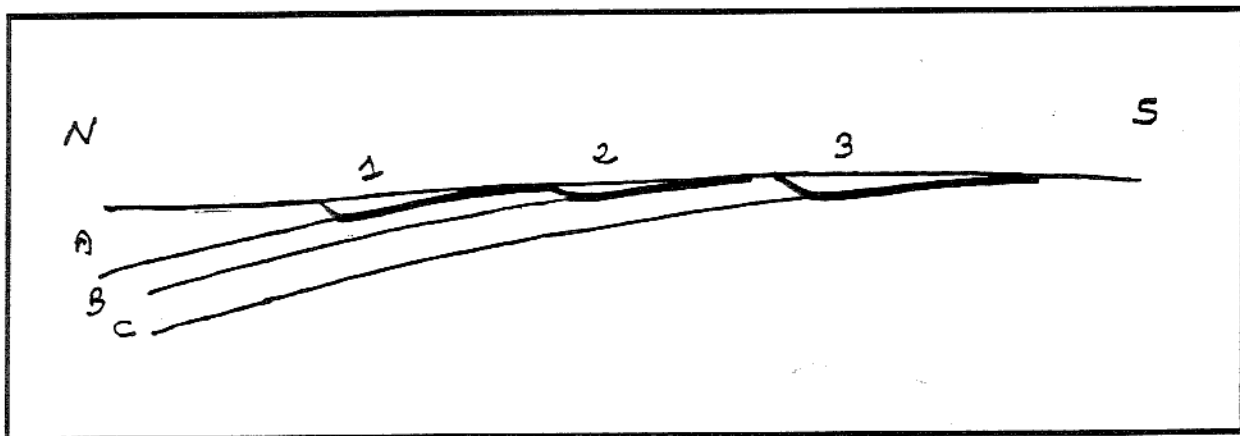


Fig.41 Rapport entre l'autochtone, l'écaïlle de Gardanne et l'écaïlle de Simiane-Mimet.

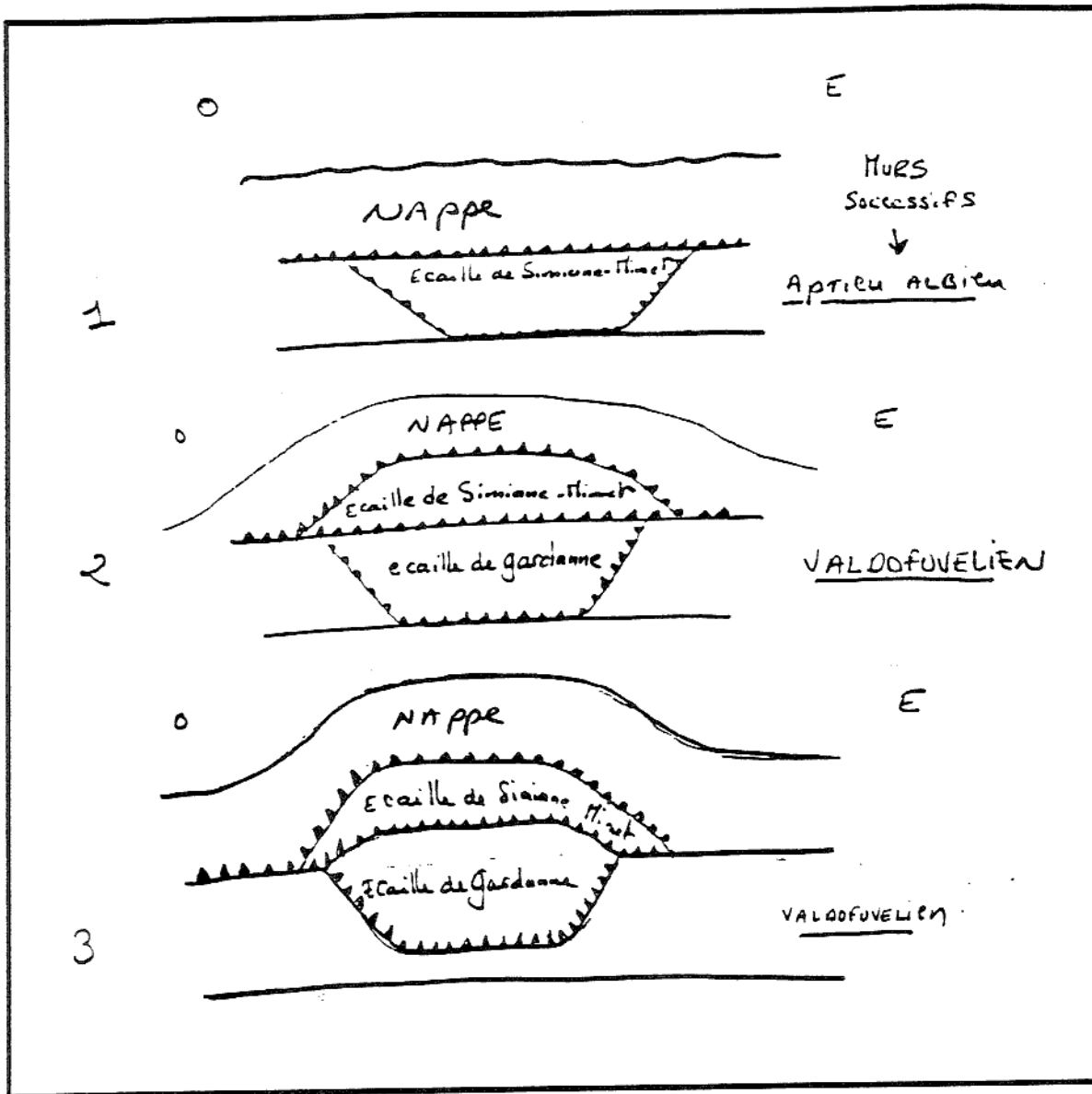


Fig. 42 Diagramme de séquence de chevauchement.

Le déplacement de la nappe et les écaillages successifs se font du sud vers le nord (de 1 à 3).

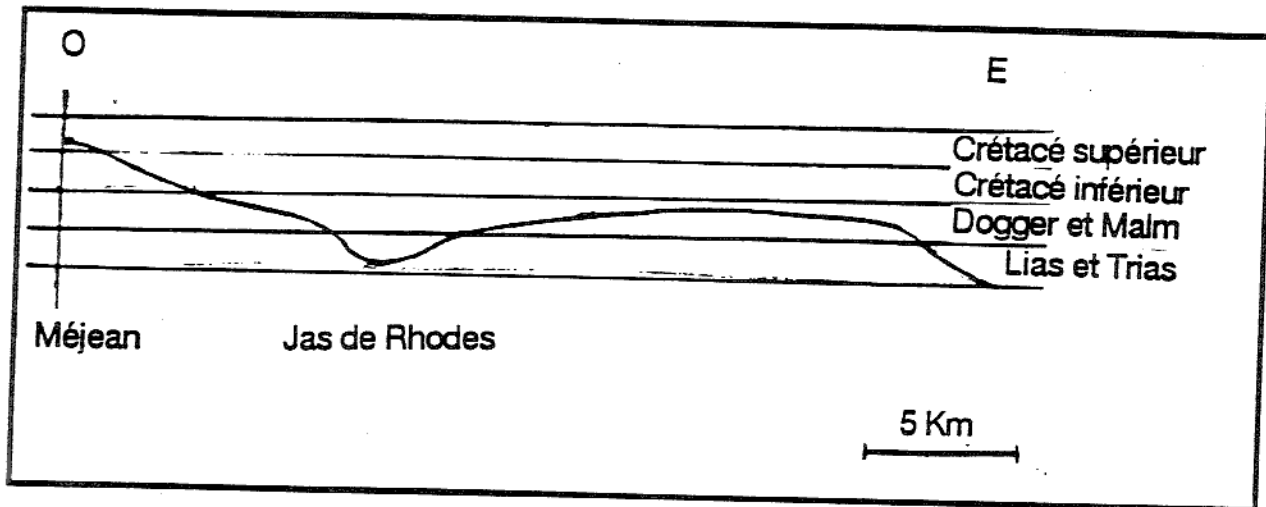
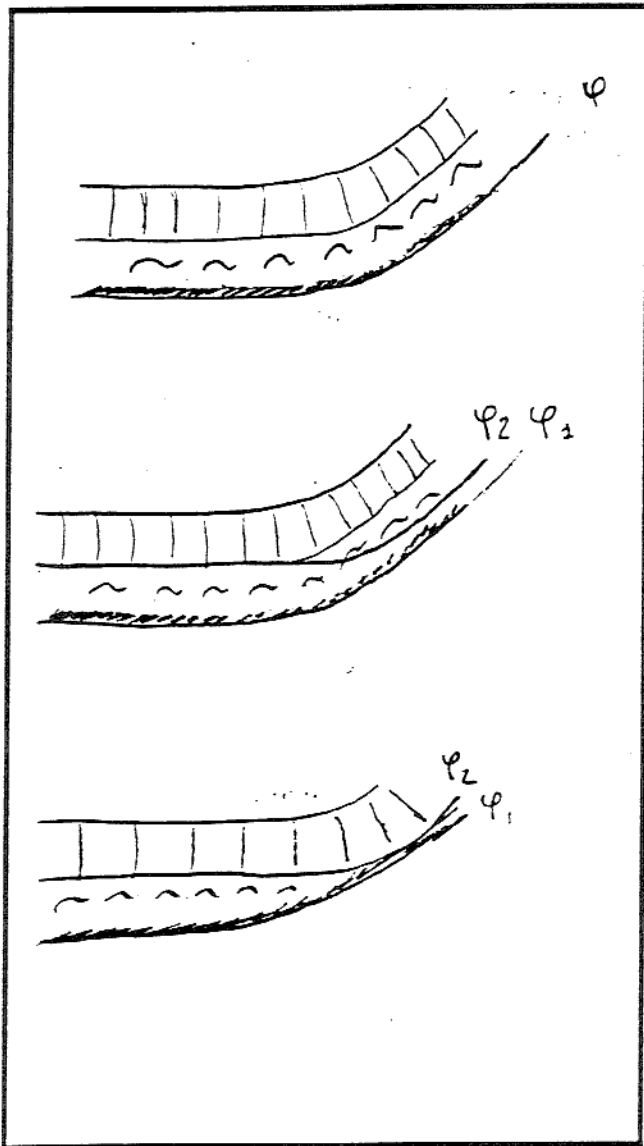


Fig.43 Diagramme de séquence du toit.

L'échelle verticale n'est pas représentative des épaisseurs réelles de la couverture charriée. Elle sert uniquement à représenter les limites entre ces ensembles.






-  Jurassique Supérieur et Crétacé inférieur
-  Jurassique moyen
-  Trias et Lias

Fig.44 Séquence de recoupement.

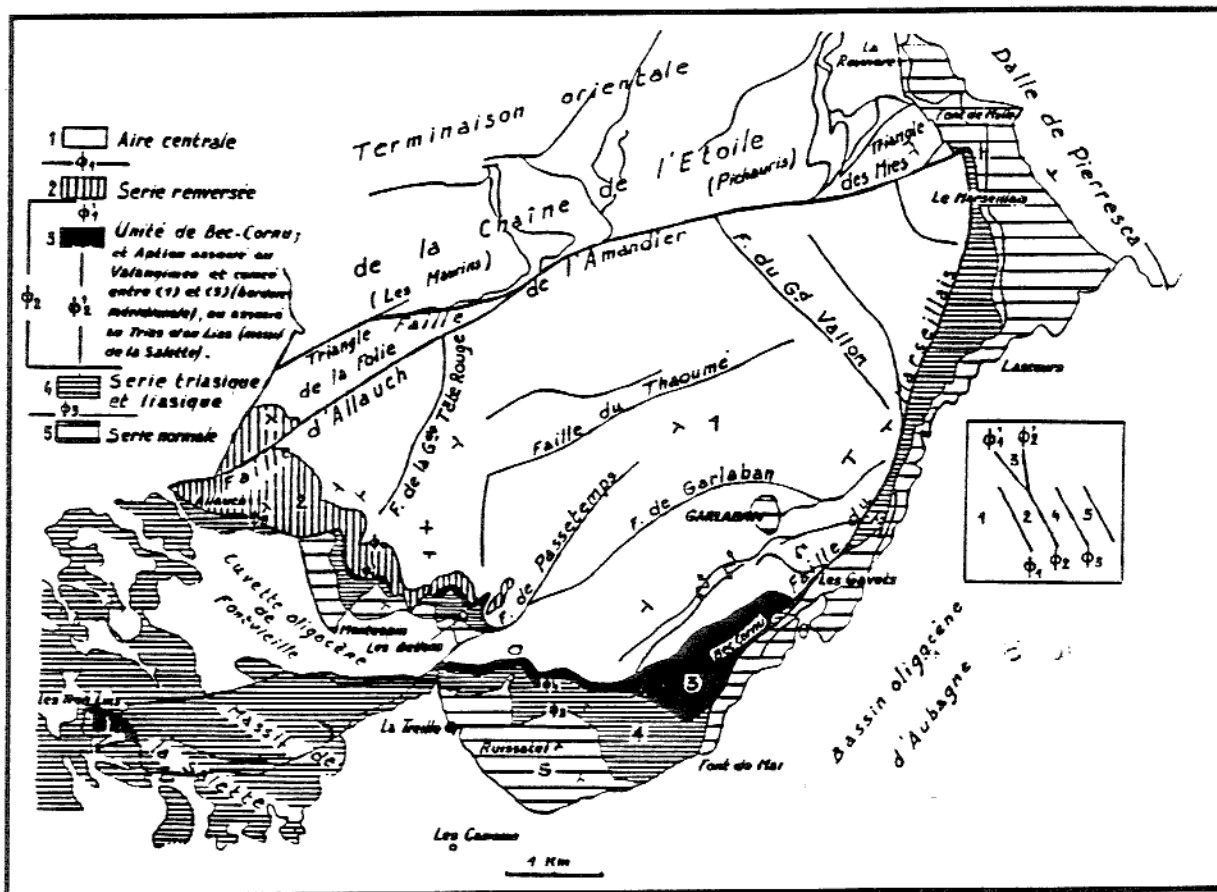
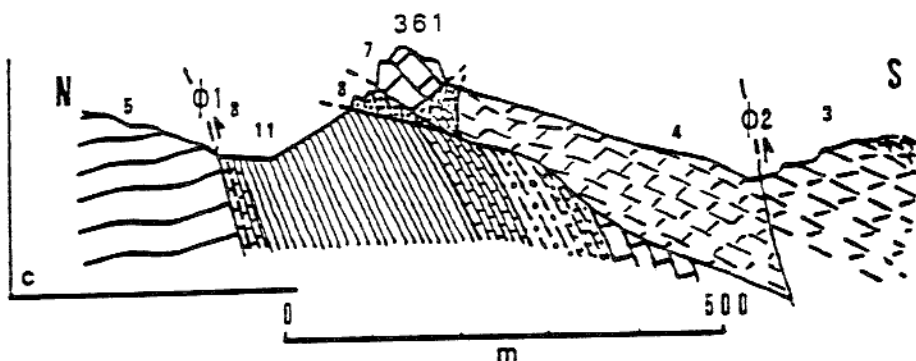
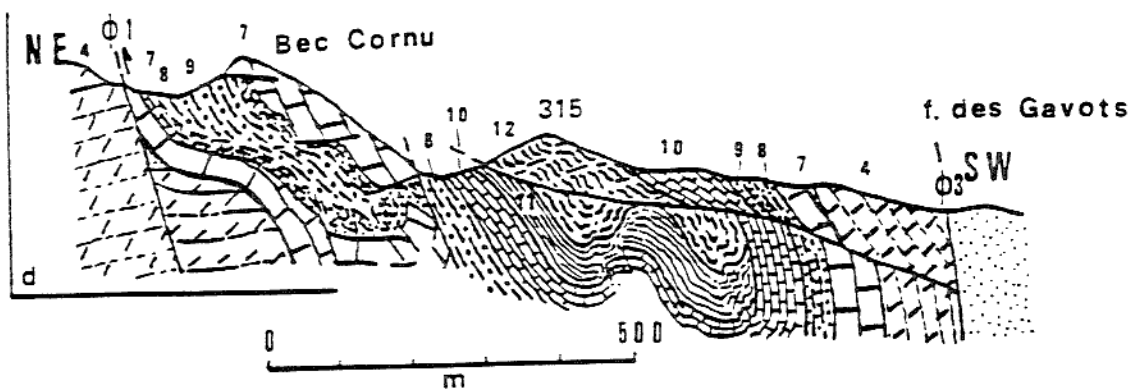


Fig.45 Schéma structural du massif d'Allauch. (GUIEU 1968)



Légende - 1 : Keuper; 2 : Rhétien; 3 : Hettangien; 4 : Jurassique supérieur; 5 : Néocomien indifférencié; 6 : Valanginien de l'unité de Bec Cornu; 7 : Urgonien; 8 : Bédoulien, calcaire à silex; 9 : Bédoulien, calcaire marneux; 10 : Gargasien - Albien : calcaire à orbitolines; 11 : Albien supérieur (black shales); 12 : Vraconien - Cénomaniens inférieur; 13 : Turonien; 14 : Oligocène; 15 : terrains post-oligocènes.


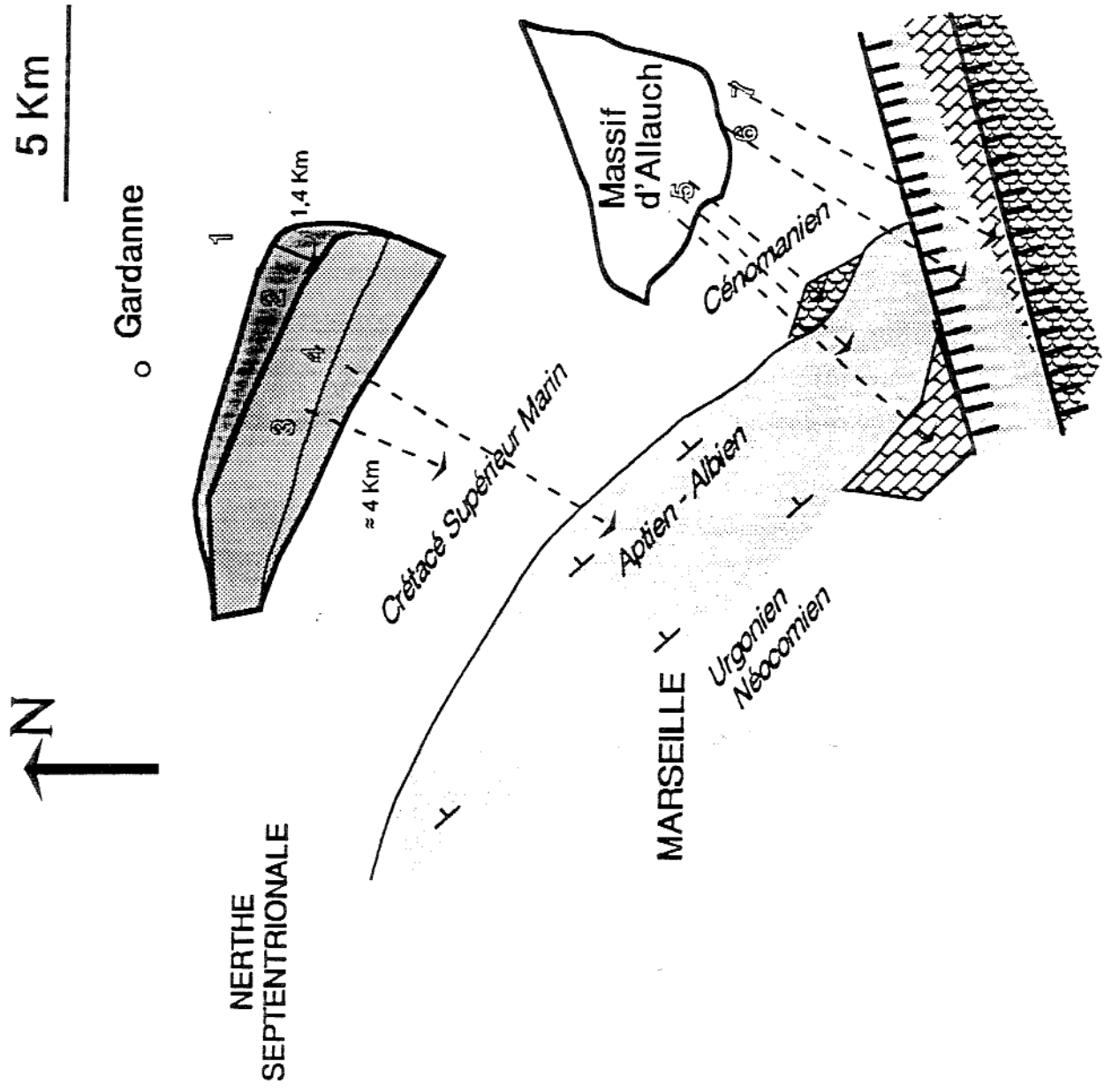
 Série chevauchante normale indifférenciée

Fig.46 Coupes dans l'unité du Bec-Cornu. (GUIEU 1985)



LEGENDES	
1	Autochtone
2	Ecaille de Gardanne
3	Ecailles de Crétacé Supérieur Marin dans la Faille du Safré
4	Ecaille aptienne de Simiane-Mirnet
5	Ecailles de la Série Renversée d'Allauch
6	Association Valanginien-Aptien
7	Unité du Bec-Cornu
Y	Pendage stratigraphique probable

LEGENDES (SUITE)	
	Position actuelle de l'écaille de Gardanne
	Position dépliée de l'écaille de Gardanne
	Cénomanién
	Aptien-Albien
	Néocomien Urgonien
	Faille normale

Fig. 47 Dépliage des séries para-autochtones de l'Etoile et du Massif d'Allauch

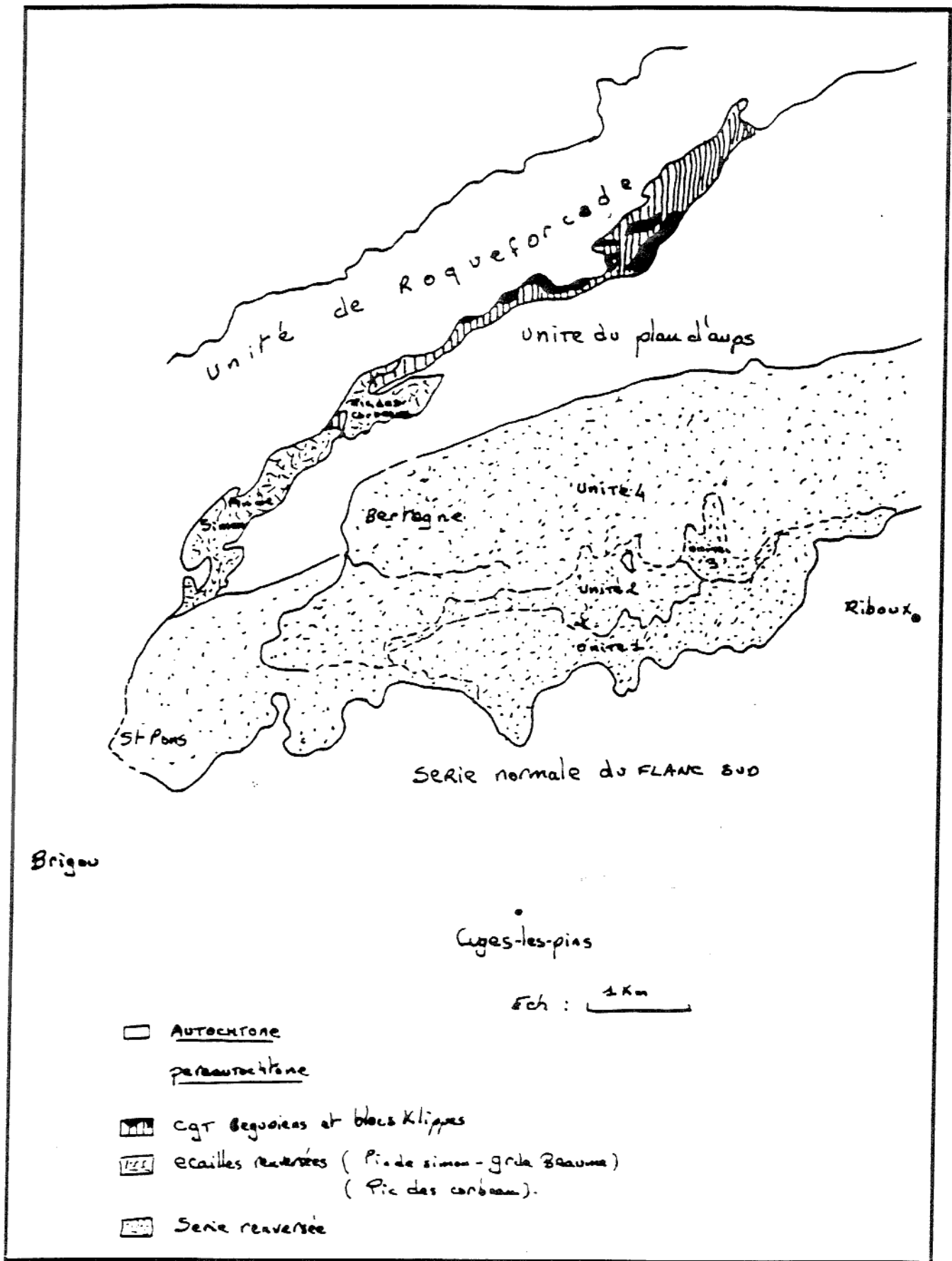


Fig.48 Schéma structural de la partie occidentale de la Sainte-Baume.
 (D'après GUIEU 1968)

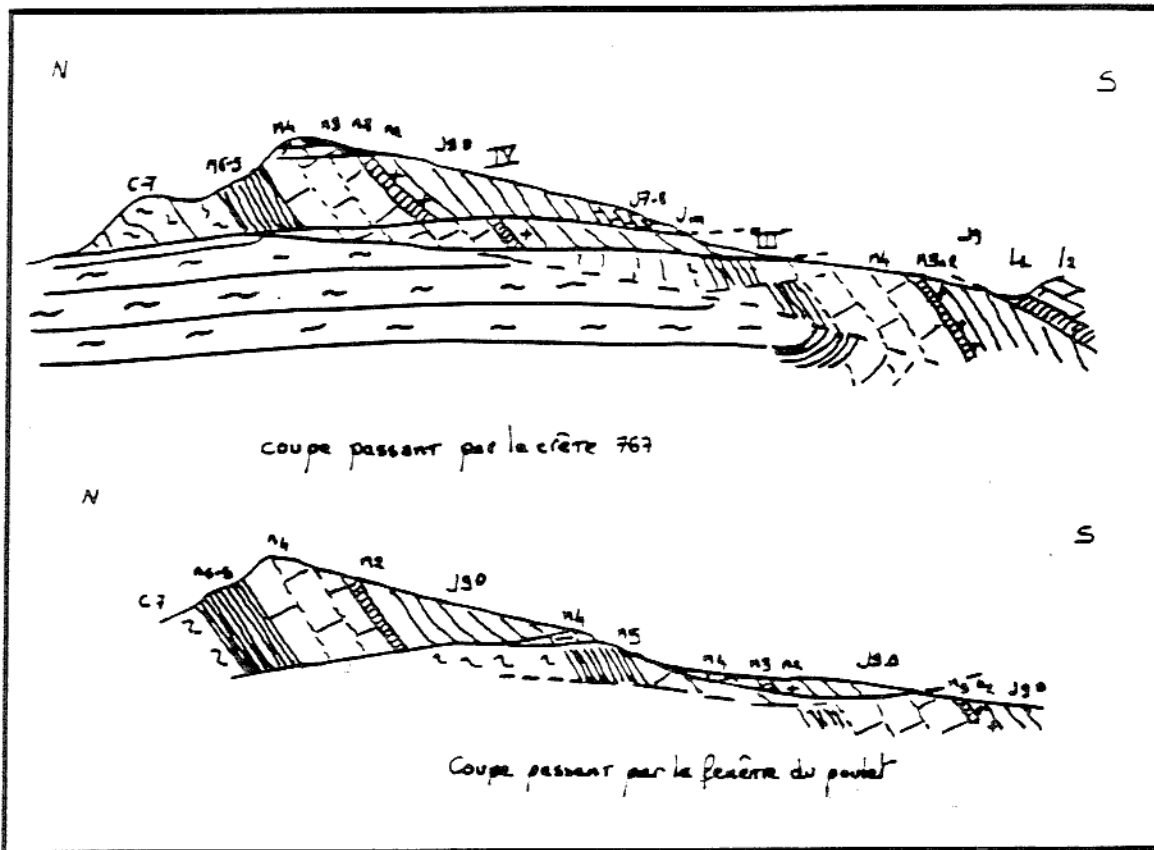
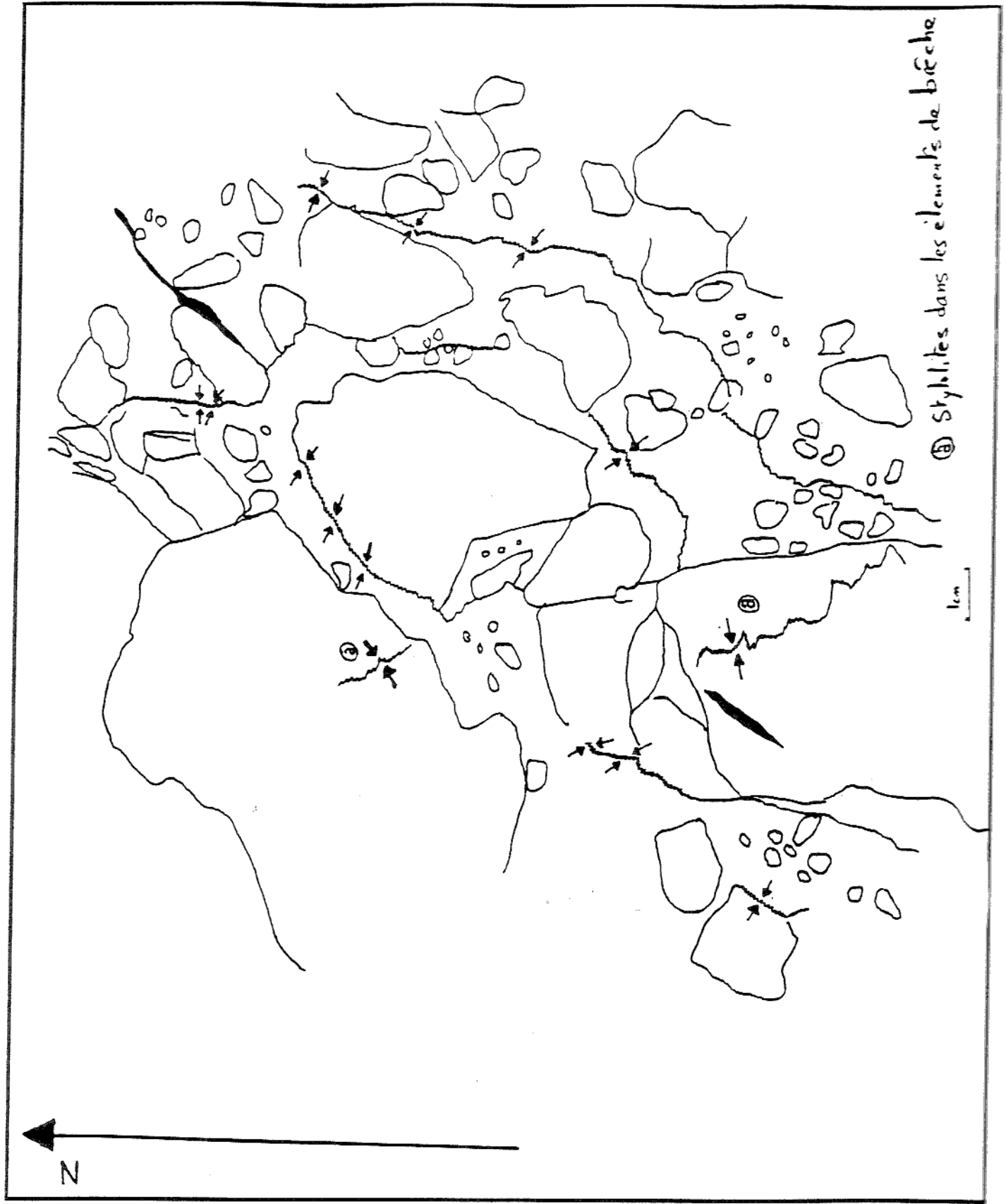


Fig.49 Coupes dans la série renversée de la sainte-Baume. (CARON 1968)
 Echelle 1/20 000°.



① Stylolites dans les éléments de brèche

Fig. 50 Miroir de faille plate.

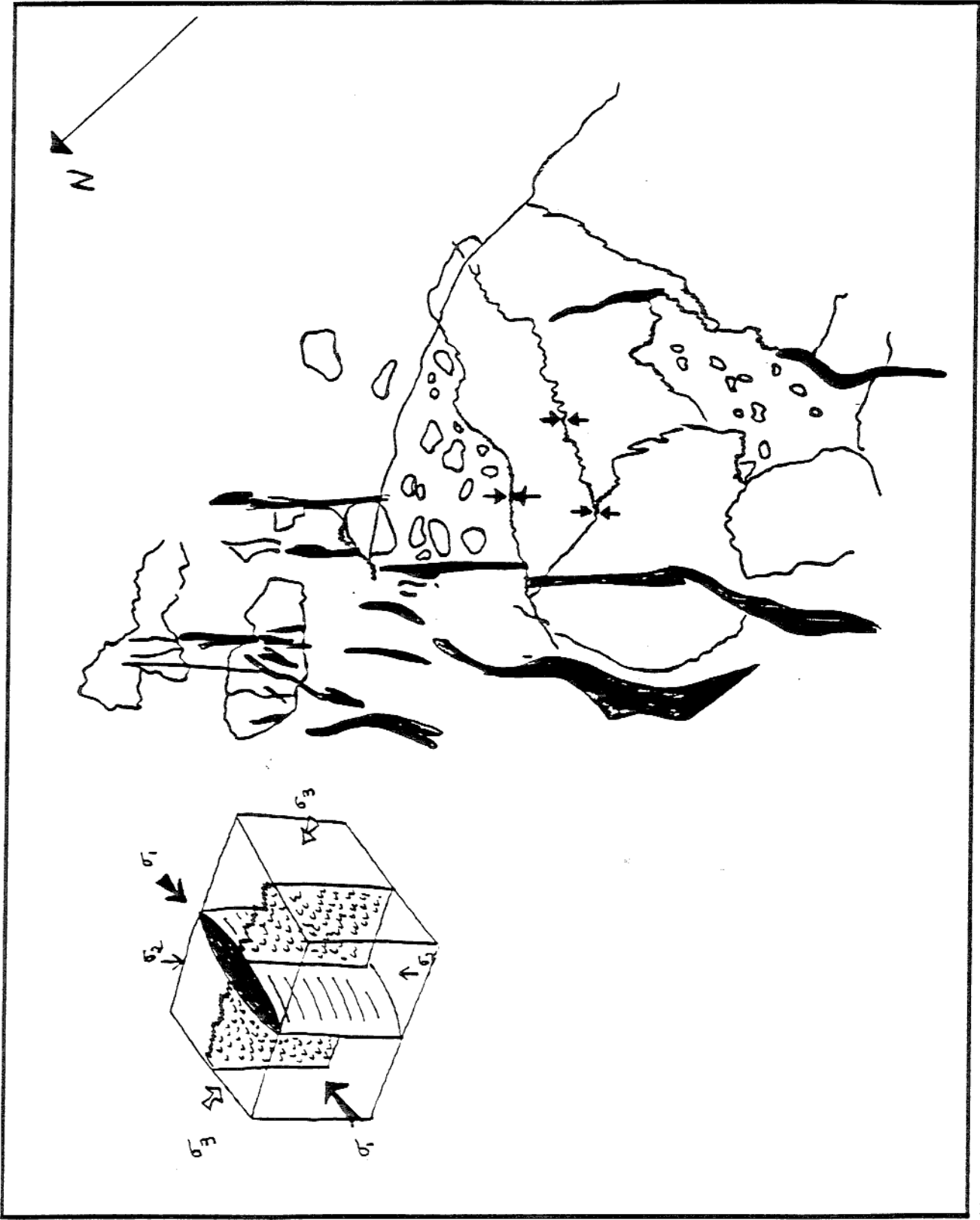


Fig.51 Fentes de traction et stylolites associés.

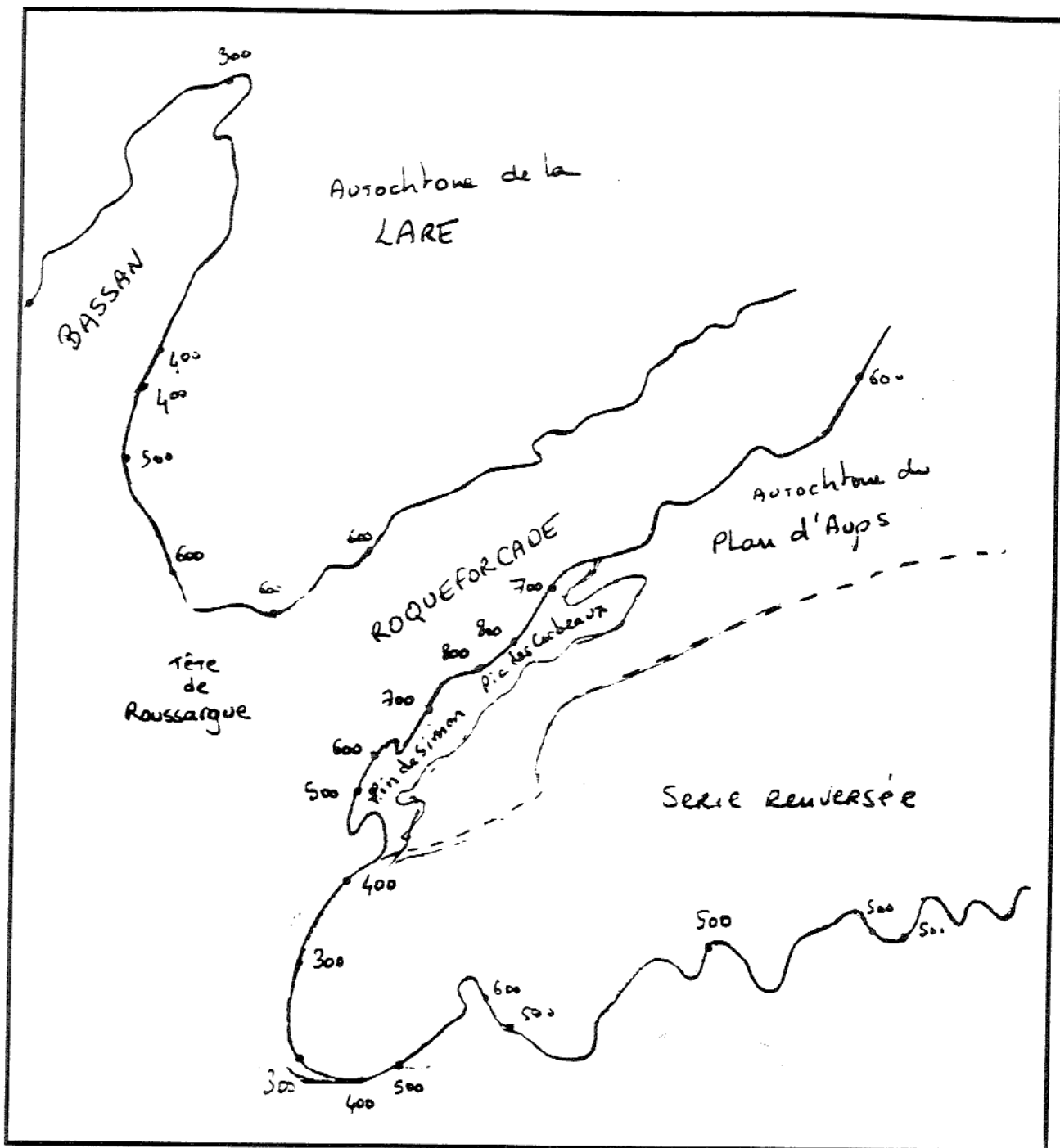


Fig.52 Altitude du tracé de la surface de chevauchement de la Sainte-Baume.

Thesis produced at the University of Provence (Aix-Marseilles I).

Author's name : Yves SUDREAU

Title : The restoration of nappe-thrust parautochtonous units. The use of balanced cross-sections concept. The study of several cases around Marseilles.

ABSTRACTS

The purpose of this work concerns applications of restoration methods upon overthrust parautochtonous units beneath Etoile nappe-thrust in the neighbourhood of Marseilles (Provence, France).

The restoration of carried imbrications below nappe-thrust is made from the analysis of thrust surfaces geometry and use of balanced cross-section techniques.

The studied example is the restoration of parautochtonous structures from the northern front of Etoile, Allauch hills and Sainte-Baume massif.

Known data and conceptions peculiar to regional model are compared with new methods of analysis of thrust surfaces geometry and the concept of balanced cross-sections.

Although these new methods are more general, they are applied to many thrust structures and are also more accurate since they imply several direct and simple rules.

Thus we restore with these rules. According to the available information types, various methods are applied :

- Cartographical restoration with cut-off lines.
- Cross-section balance with graphical software.
- Cross-section area.

Without data to evaluate the slip from geometrical arguments, restoration will be made from stratigraphic discriminations between autochtonous, parautochtonous and allochtonous units. The use of these methods may define autochtonous structures before the emplacement of nappe thrust by paleostructures inherited from albocenomanian and maastrichtian stages. These previous structures explain some anomalies and involve some more general results which go beyond the regional framework. Thus several structural rules are adjusted with these previous structures.

KEY - WORDS

Nappe-thrust, Restoration, Balanced cross-section, Cut-off line,
Parautochtonous units, Provence.

Диссертация Университета Прованса (Экс-марсель I).

Имя : Ив СЮДРО.

Заглавие : Раскрывание паравтохтонных чешуй в шарьяже покрова.

Использование понятия « разрезы в равновесии ». Изучение некоторых случаев в окрестностях Марсели (Прованс, Франция).

АВТОРЕФЕРАТ

Целью этого исследования является приложение методов равновесия паравтохтонных чешуй под шарьяжом Этоала округ Марсели (Прованс, Франция). Раскрывание чешуй тащенных под шарьяж совершается с анализом геометрии поверхностей взбросов и использованием техник уравновешенных разрезов.

Раскрывание паравтохтонных структур касается тех, расположенных в северном фронте Этуала, вокруг холмов Ало и в Сэнт-Бом кряже.

Знакомые данные и зачатия присущие областного модела сравниваются с новыми методами анализа геометрии поверхностей взбросов и с понятием «разрезы в равновесии». Хотя эти новые методы общее, они применимы на всех надвигах. Они тоже точнее потому что введут несколько простые и непосредственные правила. Так, раскрывание делается с этими правилами. По виду справок, разные методы прикладные :

- Картографическое разворачивание с линиями усечения .
- Равновесие разрезов с графической и компьютерной программой.
- Площадь разрезов.

Без данных необходимых, чтобы подкрепить смещение с геометрическими аргументами, разворачивание основывается на стратиграфических различиях между автохтонными, паравтохтонными и аллохтонными структурами.

Использование этих методов позволяет уточнить автохтонное албосеноманское и маастрихтское палео-строение до генезиса шарьяжа. Это предшествующее устройство объясняет некие аномалии и ведёт к более обобщенным выводам, которые обгоняют пределы областного окружения. Так, в зависимости от предшествующего устройства применимы разные структуральные правила.

КЛЮЧИ

Шарьяж, Тектонический покров, Разворачивание, Уравновешенный разрез,

Линия усечения, Паравтохтонные чешуи, Прованс.

Thèse présentée à l'Université de PROVENCE (Aix-Marseille I)

Nom de l'auteur : Yves SUDREAU

Titre de l'ouvrage : Dépliage des unités para-autochtones dans une nappe de couverture. Utilisation du concept de coupes équilibrées. Etude de quelques cas dans la région de Marseille.

RESUME

L'objectif de ce travail concerne l'application de méthodes de dépliage aux unités paraautochtones entrainées sous la nappe de l'Etoile dans les environs de Marseille (Provence, France).

Le dépliage des écailles entrainées sous une nappe de charriage s'effectue à partir d'une analyse de la géométrie de surfaces de chevauchement et de l'utilisation des techniques des coupes équilibrées. Le dépliage des structures paraautochtones concerne celles situées au front nord de l'Etoile, autour du massif d'Allauch, et dans le massif de la Sainte-Baume.

Les données connues et les conceptions propres au modèle régional sont comparées avec les méthodes nouvelles d'analyse de la géométrie des surfaces de chevauchement et du concept de coupes équilibrées. Ces méthodes nouvelles sont certes plus générales mais applicables à toutes structures charriées et aussi plus précises puisqu'elles introduisent certaines règles immédiates et simples. Ainsi le dépliage s'effectuera en s'appuyant sur ces règles. Selon le type d'informations disponibles, différentes méthodes sont appliquées:

- ➔ Dépliage cartographique avec les lignes de recoupement.
- ➔ Equilibrage en coupe avec un logiciel graphique.
- ➔ Méthode des surfaces totales.

En l'absence de données permettant d'estimer de manière géométrique les déplacements, le dépliage sera fondé sur des différenciations stratigraphiques entre les structures autochtones, paraautochtones et allochtones. L'utilisation de ces différentes méthodes permet de préciser la structuration de l'autochtone avant le charriage par la mise en évidence de paléostructures héritées des « phases » albocénomaniennes et maastrichtiennes.

Cette structuration antérieure explique certaines anomalies et implique certaines conséquences plus générales dépassant le cadre strictement régional. Ainsi différentes règles structurales sont adaptées en fonction de cette structuration antérieure.

MOTS-CLES

Nappe de charriage, Dépliage, Coupe équilibrée, Lignes de recoupement,
Ecailles para-autochtones, Provence.

Adresse: Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, case 28.
Centre scientifique Saint-Charles. Université de Provence.
3 Place Victor Hugo. 13331 MARSEILLE Cedex 3.