



**HAL**  
open science

## Mécanismes et évolution de chevauchements à vergences opposées : exemple des structures de la Sainte Victoire (Provence).

Brigitte Biberon

### ► To cite this version:

Brigitte Biberon. Mécanismes et évolution de chevauchements à vergences opposées : exemple des structures de la Sainte Victoire (Provence).. Tectonique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1988. Français. NNT: . tel-00531526

**HAL Id: tel-00531526**

**<https://theses.hal.science/tel-00531526>**

Submitted on 3 Nov 2010

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

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

OBSERVATOIRE DE GRENOBLE  
ET  
INSTITUT DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES DE GEOLOGIE ET DE MECANIQUE

**THESE**

présentée à

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER  
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR**

Mention : SCIENCES DE LA TERRE

Spécialité : Tectonophysique

par

**Brigitte BIBERON**

SUJET

**MECANISMES ET EVOLUTION  
DE CHEVAUchemENTS  
A VERGENCES OPPOSEES**

**Exemple des structures de la Sainte-Victoire (Provence).**

Soutenue le 29 Septembre 1988 devant la Commission d'Examen

MM. P. VIALON  
J.P. GRATIER  
J.P. BRUN  
G. MENARD  
C. TEMPIER  
F. THOUVENOT  
Mme S. TRIBOULET

Président Rapporteur  
Directeur de thèse  
Rapporteur  
  
Examineurs

9 MAI 1989

UNIVERSITE DE GRENOBLE  
INSTITUT DE GEOLOGIE  
**DOCUMENTATION**  
RUE MAURICE - GIGNOUX  
38031 GRENOBLE CEDEX  
TEL: (76) 87.46.43

Cette recherche est le résultat d'une collaboration entre l'industrie et l'université. La S.N.E.A.(P) l'a financée et l'I.R.I.G.M. m'a accueillie dans des conditions que je souhaite à beaucoup.

Une thèse, ce n'est jamais qu'une formidable leçon d'humilité. A l'heure du bilan, je me rends bien compte que je suis redevable à tous.

Ce travail aurait-il pu voir le jour sans les conseils et la bienveillante vigilance de Mme S. TRIBOULET et M. P. MASSE ?

Ferais-je partie des privilégiés initiés à la technique des coupes équilibrées sans la présence quotidienne du pétillant et loquace G. MENARD ?

L'étude sismique aurait-elle été menée à bien sans avoir pu profiter de toute l'expérience de F. THOUVENOT, l'aide efficace de R. GUIGUET sur le terrain et le matériel de D. HATZFELD ?

Que saurais-je de la modélisation sans les longs entretiens avec J.P. BRUN et son équipe : J. VAN DEN DRIESSCHE et J.F. BALLARD ?

La géologie provençale me serait-elle aussi familière sans les précieuses informations et la fréquente compagnie de C. TEMPIER dans le massif de la Sainte-Victoire ?

Arriverais-je jamais à évaluer ce que je dois à la rigueur et à la bienveillance de M. P. VIALON ?

Et surtout, ce travail aurait-il été mené à son terme si rapidement et si complètement sans son maître d'oeuvre, J.P. GRATIER, qui a patiemment guidé mes pas et davantage encore dans la dernière ligne droite ?

Je n'oublie évidemment pas mes amis, qui se reconnaîtront, encore moins ma famille. Qu'ils trouvent tous ici le témoignage succinct mais sincère de ma profonde affection.

A Francis,  
A ma famille.

## SOMMAIRE

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.  
 MAISON DES GEOSCIENCES  
 DOCUMENTATION  
 B.P. 53  
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX  
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58  
 Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

## INTRODUCTION : BUTS ET METHODES

## PREMIERE PARTIE : ACQUISITION DES DONNEES GEOLOGIQUES ET SISMIQUES

I. PRESENTATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU DOMAINE ETUDIE

I.1. Situation géographique p. 17

I.2. Résumé de l'histoire géologique de la Provence occidentale p. 17

II. LES DONNEES GEOLOGIQUES p. 21

II.1. La stratigraphie p. 23

II.1.1. Les grandes subdivisions lithologiques p. 23

II.1.1.1. La série stratigraphique p. 23

II.1.1.2. Controverses sur les datations p. 25

II.1.2. Les particularités de la série stratigraphique p. 29

II.1.2.1. Les variations de faciès p. 29

II.1.2.2. Les variations d'épaisseurs p. 29

II.1.3. La compétence de la série stratigraphique p. 38

II.1.3.1. Les niveaux de décollement p. 38

II.1.3.2. Un horizon repère : l'Argovien p. 38

II.2. La structure p. 39

II.2.1. Description des structures p. 39

II.2.1.1. Les structures Est-Ouest p. 39

II.2.1.2. Les structures Nord-Ouest - Sud-Est p. 46

II.2.2. <u>Les problèmes liés à la structure</u>	p. 46
II.2.2.1. La faille du Vallon de Bimont	p. 46
II.2.2.2. La zone du Pas-de-l'Escalette	p. 47
II.2.2.3. L'altitude des différents domaines	p. 50
II.2.2.4. La coexistence de structures de directions différentes	p. 50
II.2.3. <u>La cinématique</u>	p. 50
II.2.3.1. La direction de déplacement	p. 50
II.2.3.2. La continuité des déformations	p. 53
II.2.3.3. Le relais des chevauchements à vergence opposée	p. 53
<b>III. LES DONNEES SISMIQUES</b>	p. 55
<b>III.1. Méthodologie de la sismologie expérimentale</b>	p. 55
III.1.1. <u>Les problèmes liés aux enregistrements des tirs de carrière et aux conditions locales</u>	p. 56
III.1.2. <u>La méthode d'enregistrement</u>	p. 56
III.1.3. <u>Le dépouillement des enregistrements et la corrélation des phases</u>	p. 58
III.1.4. <u>L'interprétation : calcul de modèles simples</u>	p. 61
III.1.4.1. L'interprétation des premières arrivées : directes et réfractées	p. 62
III.1.4.2. L'interprétation des arrivées tardives : réfléchies	p. 63
III.1.4.3. Corrections d'altitude et de surface	p. 65
III.1.4.4. Conclusions	p. 65
<b>III.2. Synthèse des données existantes : la sismique pétrolière</b>	p. 65
III.2.1. <u>Les études de sismique réflexion en Provence</u>	p. 65
III.2.2. <u>Le sondage et le sismosondage de Jouques</u>	p. 67

III.3. <u>Etude de la position de la surface du socle dans la région bassin de l'Arc-montagne Vautubière par des profils sismiques longitudinaux</u>	p. 69
III.3.1. <u>Expérience de terrain</u>	p. 70
III.3.2. <u>Résultats et interprétations</u>	p. 73
III.3.2.1. Les profils au Nord de la Sainte-Victoire	p. 75
III.3.2.2. Les profils au Sud de la Sainte-Victoire	p. 85
III.4. <u>Synthèse des données</u>	p. 96
III.4.1. <u>Le réflecteur R1, voisin du toit du socle</u>	p. 96
III.4.2. <u>Le réflecteur R2, limite du Permien ?</u>	p. 99

**DEUXIEME PARTIE : INTERPRETATION GEOMETRIQUE ET CINEMATIQUE DES STRUCTURES : Coupes équilibrées dans la région Bassin de l'Arc-Montagne Vautubière**

I. <u>Eléments à prendre en compte pour le choix d'une hypothèse structurale</u>	p. 103
I.1. <u>La surélévation de la structure du bois de Concors et de la structure de la Sainte-Victoire</u>	p. 103
I.2. <u>Les vergences opposées</u>	p. 106
I.3. <u>La signification de certains accidents</u>	p. 106
II. <u>Eléments d'interprétation communs aux différentes hypothèses structurales</u>	p. 107
II.1. <u>La direction et le sens du déplacement</u>	p. 107
II.2. <u>Le niveau de décollement</u>	p. 107
II.3. <u>L'état initial</u>	p. 107

III. Interprétation des structures	p. 107
III.1. <u>Interprétation des coupes centrale et orientales</u>	p. 108
III.2. <u>Interprétation des coupes occidentales</u>	p. 111
III.2.1. Hypothèse 1 : le déplacement d'une série épaisse sur une flexure de socle	p. 111
III.2.2. Hypothèse 2 : une écaille intracutanée	p. 114
IV. Evolution latérale du raccourcissement	p. 120
TROISIEME PARTIE : INTERPRETATION MECANIQUE DES STRUCTURES :	
Localisation et vergence des chevauchements	
I. Localisation des chevauchements	p. 125
I.1. <u>Profondeur des paliers de décollement</u>	p. 125
I.2. <u>Situation et pendage des rampes</u>	p. 127
I.2.1. Approche dynamique	p. 128
I.2.2. Approche statique	p. 130
II. Vergence des chevauchements	p. 133
II.1. <u>Approche en termes d'énergie minimale</u>	p. 137
II.1.1. Calcul de l'énergie consommée dans les chevauchements	p. 137
II.1.2. Bilans d'énergie pour les coupes à l'Est de la Sainte-Victoire	p. 146
II.1.3. Bilans d'énergie pour les coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire	p. 155
II.2. <u>Approche cinématique</u>	p. 163
CONCLUSIONS	p. 171
BIBLIOGRAPHIE	p. 171
Liste des figures	p. 183

## INTRODUCTION

### BUTS ET METHODES

L'objectif général de ce travail est de définir les facteurs qui déterminent l'amortissement des systèmes chevauchants et en particulier le développement de chevauchements à vergence opposée, assez fréquents dans l'avant-pays des chaînes de collision.

#### Recherche sur le terrain de chevauchements à vergence opposée

Cette étude a été réalisée à partir des structures types (structures en "pop-up" et en "zones triangulaires") retrouvées sur le terrain, en Provence occidentale, dans le secteur de la montagne de Sainte-Victoire. Il s'agit, en effet, d'une région facilement accessible, bien documentée où l'inversion de vergence est bien connue.

Une caractéristique importante des structures de la région est d'une part, le relais latéral (au sein d'une même structure) des chevauchements à vergence opposée qui fonctionnent alors de façon synchrone, mais également leur relais, selon une direction transversale aux structures c'est-à-dire dans l'espace et dans le temps. L'amortissement latéral rapide des structures permet d'avoir un stade peu évolué de la déformation étudiée.

Cet exemple est d'autant plus intéressant qu'il fonctionne en système à peu près clos avec des dépôts sédimentaires synchrones de la déformation et autorise ainsi un bilan des transferts érosion-sédimentation.

La nécessité de travailler à une échelle régionale et non pas à l'échelle d'un seul chevauchement inversé par rapport à la direction générale de déplacement, s'est rapidement imposée. En effet, c'est à cette échelle seulement que l'on peut espérer comprendre l'ensemble de la structure et expliquer ainsi des structures de taille inférieure. Pour expliquer une structure kilométrique (montagne Sainte-Victoire), on a du acquérir des données dans un secteur plurikilométrique (bassin de l'Arc-Montagne Vautubière).

### Analyse géométrique et cinématique des structures

L'analyse des mécanismes de déformation implique nécessairement la parfaite compréhension préalable de la géométrie et de la cinématique des structures. Il s'agit de "comprendre l'état actuel (structure) et de rechercher comment on est passé de l'état initial non déformé à l'état actuel déformé (cinématique)" (G. MENARD, 1988).

La méthode la plus efficace, actuellement, pour intégrer au mieux toutes les données et en rechercher une cohérence d'ensemble est celle des coupes équilibrées. La méthodologie des coupes équilibrées est très bien connue (C.D.A. DAHLSTROM, 1969, 1970 ; D. ELLIOTT, 1983 ; J.R. HOSSACK, 1979 ; J.L. MUGNIER, 1984 ; G. MENARD, 1988 ; ouvrage collectif, J.P. GRATIER coordinateur, 1988), nous nous contenterons d'en rappeler les principes de base :

- la coupe doit être construite parallèlement à la direction de déplacement,
- on suppose qu'il y a conservation du volume des roches lors de la déformation,
- on suppose que la valeur de déformation perpendiculaire au plan de coupe est nulle.

La construction d'une coupe équilibrée nécessite de nombreuses contraintes géométriques sous la forme de données de surface (épaisseurs, limites stratigraphiques, pendages des couches ou des failles) et de données de subsurface (forages, sismique). La fiabilité d'une interprétation est directement fonction de la qualité de l'acquisition des données.

Dans le but de contraindre au mieux le modèle, nous avons donc réalisé :

- une synthèse des données existantes ;
- des compléments d'étude tels que la recherche de la direction de déplacement, de nouvelles mesures d'épaisseurs et de pendages, des datations stratigraphiques ou la position relative de diverses formations dans la mesure où ces éléments se sont révélés importants pour la suite de l'étude ;
- une étude de sismologie expérimentale grand angle, en utilisant des tirs de carrière pour contraindre au mieux la position et la géométrie du plan de décollement, très peu documentée par ailleurs (sismique verticale pétrolière au Nord-Ouest de secteur étudié).

Nous nous sommes, en outre, particulièrement attaché à prendre en compte la continuité latérale des structures et la compatibilité en carte des solutions. Un travail - non pas sur une coupe isolée (deux dimensions) - mais sur plusieurs coupes parallèles sériées intègre d'une certaine manière, la troisième dimension de l'espace (carte).

Le fait de s'imposer une évolution - constante ou progressive - des paramètres tels que la valeur du raccourcissement et de la surface transférée, la profondeur de la surface de décollement, l'altitude des différents niveaux, correspond à une contrainte supplémentaire qui s'est avérée parmi les plus fortes. Certaines hypothèses admissibles sur une coupe ne peuvent être maintenues latéralement.

### Interprétation mécanique des conditions "vraisemblables" de formation des structures à vergence opposée

C'est donc en s'appuyant sur un exemple contraint que l'on a calé quelques paramètres mécaniques susceptibles de commander les conditions de formation de chevauchements à vergence opposée. Le principe est simple : on suppose que le chemin cinématique choisi est celui qui consomme le moins d'énergie. Le respect rigoureux de la géométrie des structures à vergence inverse (biseau d'épaisseur des couches, pendage du palier et des rampes) et l'observation de leur évolution latérale a permis de proposer des modèles numériques d'évolution des structures basés sur le principe du calcul de l'énergie minimale dissipée dans la déformation.

En comparant les évolutions cinématiques décrites par les coupes équilibrées avec les résultats des calculs, le meilleur ajustage des valeurs des paramètres mécaniques associées aux changements de vergence a été recherché.

Les résultats d'expérimentations analogiques, et plus particulièrement celles développées par J.F. BALLARD (équipe de J.P. BRUN) sur le problème de la vergence des chevauchements ont été également utilisés pour interpréter les structures observées.

Il faut enfin insister sur l'importance accordée au caractère interactif en ce qui concerne l'interprétation géométrique, cinématique et mécanique des structures.

*PREMIERE PARTIE*

**ACQUISITION DES DONNEES  
GEOLOGIQUES ET SISMIQUES**

Dans l'introduction, l'importance de l'acquisition de données fiables a été exposée. Le degré de fiabilité d'une interprétation structurale est directement fonction de la qualité des contraintes géométriques qui lui sont imposées.

Les données de surface sont, dans le meilleur des cas, fournies par une coupe géologique complète et détaillée. Les données de subsurface sont fournies par forages ou par sismique, également par gravimétrie et magnétisme.

## I. PRESENTATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU DOMAINE ETUDIE

### I.1. Situation géographique

Le domaine étudié correspond à la partie centrale de la Provence Occidentale. Il est limité par la vallée de la Durance au Nord, le bassin d'Aix à l'Ouest, la dépression de Barjols à l'Est et, au Sud, par les sommets de l'Olympe et de l'Aurélien (fig. 1).

La topographie est accentuée, les reliefs hétérogènes. Les collines du Sambuc (450 m - 650 m) et la montagne Sainte-Victoire (point culminant 1011 m) sont bordées à l'Est par les plateaux de Pourières. Au Sud, une vaste dépression peu accidentée est empruntée par l'Arc. Au Nord, les reliefs sont Nord-Ouest - Sud-Est. Il s'agit de la colline de Concors (500 - 600 m) séparée des collines de Vautubière et Mont-Major (450 m - 600 m) par la dépression Peyrolles -Rians -St Martin-les-Pallières.

### I.2. Résumé de l'histoire géologique de la Provence occidentale

En Provence occidentale, il faut noter le rôle majeur joué par la faille d'Aix - Meyreuil (faille de la Durance plus au Nord) durant toute la sédimentation jurassique. A cette faille de direction N 30 est associée une grande différence d'épaisseur des séries jurassiques qui passe d'un compartiment à l'autre de cette faille de 3 ou 4 kilomètres (à l'Est) à plus de 10 km (à l'Ouest). La région étudiée est située dans le compartiment Est. Elle a été affectée par trois épisodes tectoniques essentiels.

Le premier, daté de l'Albien supérieur - Cénomanién inférieur (J.-P. MASSE et J. PHILIP, 1976), entraîne un épisode d'émersion qui donne la série à bauxite. Cette phase de compression est mal caractérisée, elle aurait provoqué l'apparition d'anticlinaux et de synclinaux à grands rayons de courbure (notion de bombement durancien). Elle est également responsable du jeu décrochant de failles Nord-Est - Sud-Ouest, dont les lèvres étaient érodées avant le dépôt du Santonien (Puylobier, Brignoles) (C. TEMPIER, 1987).

Le deuxième est marqué par l'existence de brèches à éléments locaux intercalées dans les formations continentales du Maestrichien et du Montien. Les marqueurs de déformation associés à cette phase sont encore mal connus. La Provence serait, dès cette époque, structurée selon des rides Est-Ouest qui annoncent l'individualisation des bassins dans lesquels s'accumulent les séries fluvio-lacustres. Les anticlinaux en cours de surrection fournissent un abondant matériel détritique qui a donné les brèches bégudo-rognaciennes et montiennes de la Sainte-Victoire (J.-P. DURAND et C. TEMPIER, 1962).

Ces phases anciennes n'ont provoqué qu'un faible raccourcissement, mais ont eu un rôle important en créant des discontinuités et des zones affaiblies dans la couverture (C. TEMPIER, 1987).

La phase majeure de la tectonique pyrénéo-provençale est d'âge Eocène supérieur. Sous l'effet d'une poussée, la couverture se décolle et glisse sur le Trias en se déplaçant vers le Nord-Nord-Est. Les grandes unités chevauchantes (Nerthe, Etoile, Sainte-Baume) sont mises en place, elles absorbent l'essentiel du raccourcissement. Des divergences subsistent quant à la valeur du raccourcissement total résultant de ces déplacements vers le Nord-Nord-Est : il est estimé à 75 km par G. Guieu et C. Rousset (1980), 25 km par C. Tempier (1987). Par contre, tous les auteurs s'accordent pour associer à ces mouvements de chevauchements des processus de sédimentation et d'érosion syntectoniques. La sédimentation dans les bassins Crétacé supérieur et Eocène est considérée comme synchrone du déplacement des unités décollées, la localisation de ces bassins étant imposée par le déplacement de ces unités. On soulignera notamment l'augmentation d'épaisseur de ces sédiments du Nord vers le Sud qui implique une flexion générale de l'avant-pays provençal, avec basculement des unités décollées vers l'arrière de la chaîne, au fur et à mesure de leur déplacement selon des modèles classiques de flexion de croûte chevauchée (P. MOLNAR, H. LYON-CAEN, 1987). Lors des déplacements vers le Nord-Nord-Est de ces unités décollées, la faille d'Aix a été reprise en décrochement sénestre. Cette limite latérale des chevauchements de la Sainte-Victoire, parallèle au déplacement, a dû aussi être prise en compte pour ces effets de bordure.

Les déformations postérieures oligo-miocènes alpines avec raccourcissement Nord-Est-Sud-Ouest ne se sont pas traduites par des déformations significatives comparables aux déplacements plurikilométriques précédents.

Notre étude a été conduite en trois étapes : une synthèse de toutes les données géologiques et géophysiques, une interprétation de la géométrie des structures et une caractérisation des paramètres mécaniques jouant un rôle lors de la structuration.

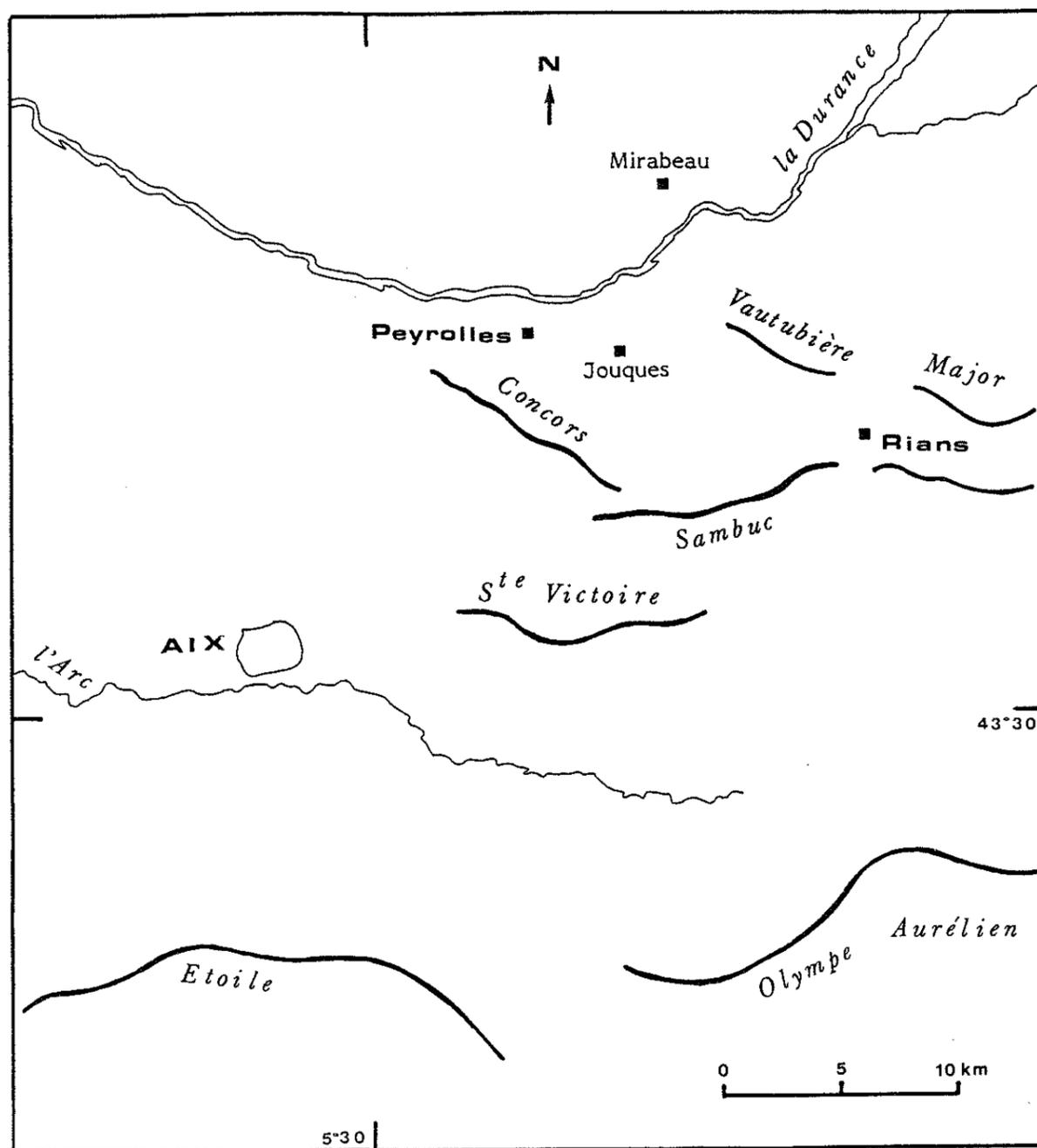


Figure 1 : Esquisse géographique.

## II. LES DONNEES GEOLOGIQUES

Le massif de la Sainte-Victoire a déjà fait l'objet d'une abondante littérature géologique. Les données stratigraphiques et structurales sont nombreuses.

Quant à la cartographie, il s'est avéré nécessaire, pour la suite de l'étude, de vérifier certains aspects des structures de la région encore controversés, tels que :

- l'existence de la faille décrite par R. Ruiz (1978) dans le vallon de Bimont (fig. 3).
- la datation des brèches et l'existence d'un pli en genou sur le synclinal du Beauroux (R. RUIZ, 1978 ; J. CHOROWICZ, 1979 - fig. 4, fig. 14) ;
- la réalité du chevauchement au Pas-de-l'Escalette (C. TEMPIER et M. BAUDRIMONT, 1961, 1962 - fig. 15, paragraphe II. 2.2.2) ;
- les replis crétacés inférieurs au Sud de la Sainte-Victoire (G. CORROY, 1957 ; G. CORROY et al., 1964 - fig. 14).

Les observations de terrains ont, en outre, apporté des informations importantes et diverses : relevés complémentaires de pendages, appréciation de l'importance à accorder aux chevauchements et aux failles cartographiés, vérification locale des datations du Crétacé inférieur, recherche d'un niveau sans déformation interne, mesures de stries (direction de transport) et de microplis.

Ces différentes données une fois réunies, une synthèse de documents géologiques a été réalisée, à l'échelle de l'ensemble des structures suivantes : bassin de l'Arc, montagne Sainte-Victoire, bassin de Concors, montagne Vautubière. En effet, on s'est aperçu progressivement que c'est à cette échelle seulement que l'on peut espérer comprendre l'ensemble de la structure et expliquer ainsi des structures de taille inférieure.

Dans une région aussi étudiée, les cartes géologiques au 1/50 000 sont curieusement souvent insuffisantes : trop rares valeurs chiffrées de pendages, de la stratification ou de la schistosité, épaisseurs souvent moyennes et mal localisées des formations lithostratigraphiques. Ces données de base, dispersées dans les thèses et les monographies régionales, ont été synthétisées et - dans la mesure du possible - collectées auprès des personnes qui ont réalisé une cartographie (minutes de terrain de C. TEMPIER, J.-P. DURAND, F. CHENEVAS). En outre, les données nombreuses sur le bassin de l'Arc et l'exploitation du gisement charbonnier de Gardanne (cartes et forages), ainsi que les informations disponibles sur le canal de Provence ont été largement exploitées. Enfin, des documents précieux ont été consultés, à savoir les logs de forages, les cartes structurales et les coupes mesurées levées par les équipes de géologues pétroliers (J. BATHIARD, 1963 ; C. LAMBERT, 1962 ; A.F. BAUDRIMONT, 1962).

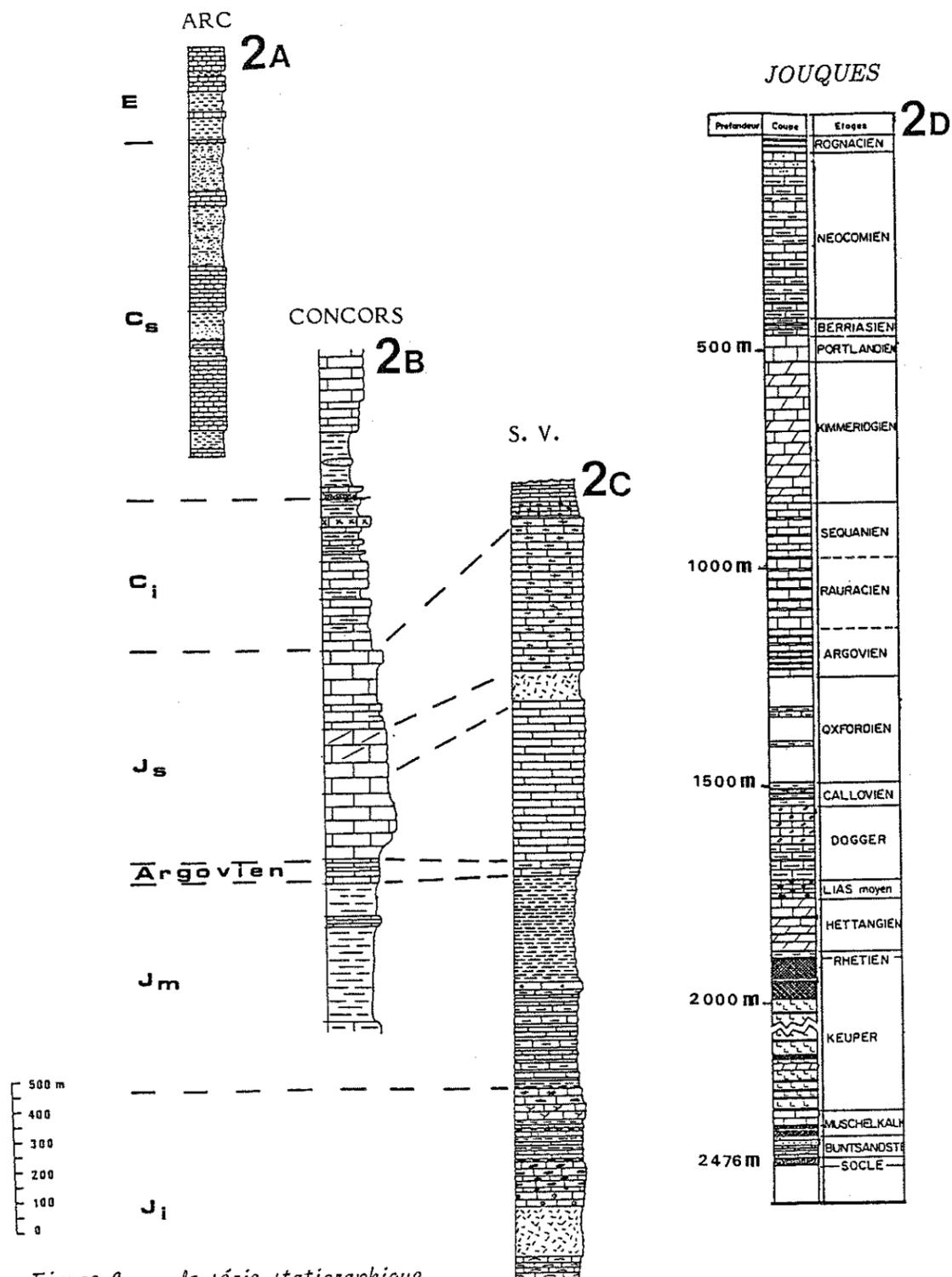


Figure 2 : la série stratigraphique.

Fig. 2a : Eocène et Crétacé supérieur du bassin de l'Arc (DURAND et al., 1980) ;  
 Fig. 2b : Crétacé inférieur du bassin de Concors (LAMBERT, 1962) ; Fig. 2c : Crétacé inférieur et Jurassique de Sainte-Victoire (RUIZ, 1978) ; Fig. 2d : Coupe du sondage de Jouques (Données Elf-ERAP, 1970).

## II.1. La stratigraphie

### II.1.1. les grandes subdivisions lithologiques

#### II.1.1.1. La série stratigraphique

Les termes les plus récents (Eocène et Crétacé supérieur) sont largement développés dans le bassin de l'Arc au Sud, le bassin de Rians au Nord. Le Crétacé inférieur est rencontré en Sainte-Victoire et bien représenté dans le bassin de Concors.

Le Jurassique supérieur constitue l'ossature de tous les anticlinaux. Le Jurassique moyen et inférieur affleure très bien au coeur des charnières anticlinales.

Le Trias est visible aux environs du village de Rians. Il est traversé par le sondage de Jouques.

a- La série fluvio-lacustre éocène et crétacée supérieure du bassin de l'Arc (fig. 2A).

Elle est caractérisée par une grande homogénéité de la sédimentation. De l'Eocène (Lutétien) au Maestrichtien supérieur (Rognacien) les formations sont argileuses et marneuses, plus ou moins épaisses. Elles sont intercalées d'horizons carbonatés (calcaire de Saint-Marc, de Meyreuil, de Vitrolles, de Rognac) qui constituent d'excellents repères. Deux épisodes bréchiques sont reconnus, l'un dano-montien, l'autre bégudo-rognacien. Le Maestrichtien inférieur (Bégudien) est constitué de niveaux argilo-marneux et gypseux. Il passe progressivement au Campanien supérieur (Fuvélien) qui peut être défini comme un ensemble essentiellement carbonaté constitué d'une alternance plus ou moins irrégulière de calcaires micritiques argileux et comporte 8 niveaux principaux de lignite dont la couche principale est dénommée "Grande Mine". Le Campanien inférieur (Valdonien) est composé de marnes et de calcaires gris. Le Santonien est calcaire.

Ces séries sont parfaitement reconnues grâce aux sondages. Le Fuvélien est donc bien localisé.

La base du Crétacé supérieur est marquée par une discordance soulignée par des dépôts lenticulaires de bauxite. L'Aptien et l'Albien sont érodés. L'Urgonien calcaire est parfois conservé.

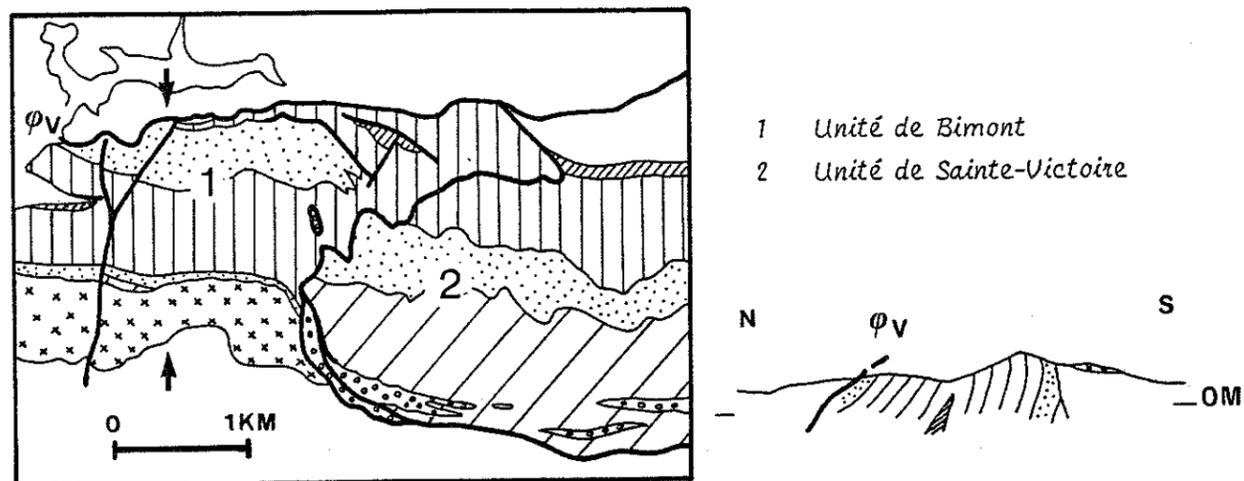


Figure 3a : Cartographie du vallon de Bimont et coupe associée d'après G. Corroy et al. (1964).

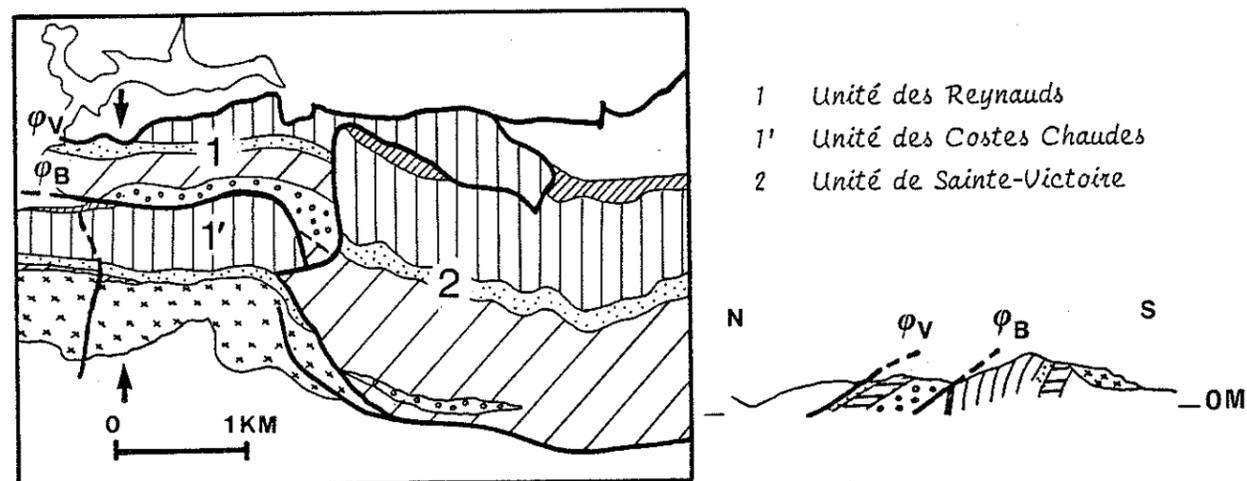


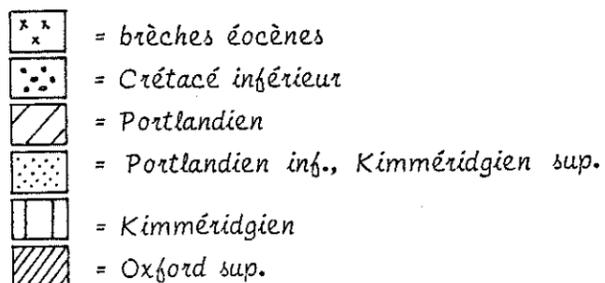
Figure 3b : Cartographie du vallon de Bimont et coupe associée d'après R. Ruiz (1978 ; J. CHOROWICZ et R. RUIZ, 1979).

Figure 3 : Controverses portant sur les datations du Crétacé inférieur dans le vallon de Bimont, à l'Ouest de la Sainte-Victoire. Deux interprétations différentes sont proposées.

$\phi_V$  = chevauchement Vauvenargues

$\phi_B$  = chevauchement Bimont

→ ← = tracé de la coupe



b- La série crétacée du bassin de Concors (fig. 2B) et la série jurassique marine de la Sainte-Victoire (fig. 2C).

Le Crétacé inférieur, bien développé dans le bassin de Concors est calcaréo-marneux. Le Jurassique supérieur forme un ensemble calcaréo-dolomitique d'épaisseur très variable. Le Portlandien supérieur comprend deux faciès principaux : dans l'unité de la Sainte-Victoire des calcaires blancs récifaux, ailleurs des calcaires sublithographiques.

Le Jurassique moyen est constitué de formations marno-calcaires : alternances de calcaires noirs et de calcaires marneux pour le Bajocien et le Bathonien, marnes essentiellement pour le Callovien et l'Oxfordien inférieur. L'Oxfordien supérieur (Argovien) est formé de calcaires noduleux.

La série jurassique inférieure est très complète. Elle est principalement calcaire du Rhétien au Carixien, avec un Hettangien calcaréo-dolomitique. Du Domérien inférieur à l'Aalénien, elle est représentée par des calcaires marneux et des marnes.

c- La série triasique rencontrée dans le sondage de Jouques (fig. 2D).

Elle est composée pour l'essentiel de sel et d'anhydrite.

#### II.1.1.2. Controverses sur les datations :

Des controverses portent sur la datation du Crétacé inférieur du vallon de Bimont et, par voie de conséquence, sur la polarité des séries et l'existence d'un accident important. Il a donc été nécessaire de confirmer cette datation pour lever l'incertitude dans l'interprétation de la structure générale.

a- Le Crétacé inférieur à l'Ouest de la Sainte-Victoire, dans le vallon de Bimont.

C. Corroy (1957, et al. 1964) décrit dans le vallon de Bimont un anticlinal à noyau de Callovien supérieur, désigné sous le nom d'anticlinal de Bimont. Sa charnière, observée au fond du vallon, disparaît rapidement vers l'Est. Son flanc septentrional est formé par une succession de couches à forts pendages Nord en série normale, allant du Kimméridgien au Sud, au Portlandien au Nord. Il constitue les collines qui bordent le vallon des Reynauds. Son flanc méridional, déversé à 50°N, forme la crête des Costes Chaudes (fig. 3A).

D'après R. Ruiz, les collines au Nord du vallon de Bimont correspondent, non pas au flanc septentrional du pli anticlinal de Bimont, mais à une unité indépendante en série renversée, limitée au Sud par une faille qui longe ce vallon, avec du Néocomien au Sud et du Portlandien au Nord (fig. 3B). Cette unité est nommée l'unité des Reynauds (R. RUIZ, 1978).

En clair, a-t-on au Nord du vallon de Bimont :

\* du Kimméridgien et une série normale, dans ce cas l'Argovien a valeur de coeur d'un grand pli (CORROY et al., 1964) ?

\* ou du Crétacé inférieur et une série inverse, dans ce cas on est en présence de deux séries monoclinales superposées et renversées, le pli d'Argovien correspond alors à une structure mineure et a valeur de pli local ?

C. Tempier et moi-même avons retrouvé sur le terrain la succession décrite par R. Ruiz : des dolomies grises formant la crête, surmontées en série inverse par des calcaires en gros bancs à nodules de silex et des calcaires marneux. Nous avons échantillonné le long d'une petite coupe Nord-Sud (Coordonnées Lambert : X = 861 km, Y = 143 km).

Les lames minces ont montré la présence de foraminifères benthiques profonds (Dorothia, Lenticulina, Lituolidés, Néotrocholina) mais surtout de Calpionelles parmi lesquelles : Calpionella alpina et Tintinnopsella carpathica. La microfaune à Calpionelles donne un âge sommet du Portlandien, base du Berriasien.

La détermination de la microfaune et la datation ont été réalisées par J.-P. Masse (Université d'Aix - Marseille I).

Nous sommes donc convaincus de la présence du Crétacé inférieur dans le vallon du Bimont et de l'existence d'une série inverse. La coupe du vallon de Bimont de la figure 3B (d'après R. RUIZ, 1978) a été adoptée pour la suite du travail.

b- Les formations bréchiques de Sainte-Victoire et des Ubacs.

La datation des dépôts syntectoniques est indispensable à l'interprétation cinématique des structures. Ici encore, il y a débat.

\* Il est admis qu'il existe au pied du massif de la Sainte-Victoire deux épisodes bréchiques : l'un dano-montien, l'autre bégudo-rognacien. Les brèches, à débris d'oeufs de Dinosauriens, au Nord et à l'Ouest du Tholonet (Pli de l'Infernet, crête du Marbre) sont clairement surmontées par la trilogie rognacienne : argiles rouges et grès-calcaire de Rognac - argiles rouges. Elles sont, sans contestation possible, à rattacher à la limite du Bégudo-Rognacien. La datation des brèches dano-montiennes (Nord du Tholonet, Sud des

Costes Chaudes) est basée sur le fait qu'elles sont plus récentes que le calcaire de Rognac, situées au-dessus du calcaire de Vitrolles et antérieures aux marnes thanétiennes à oeufs d'oiseaux (fig. 4).

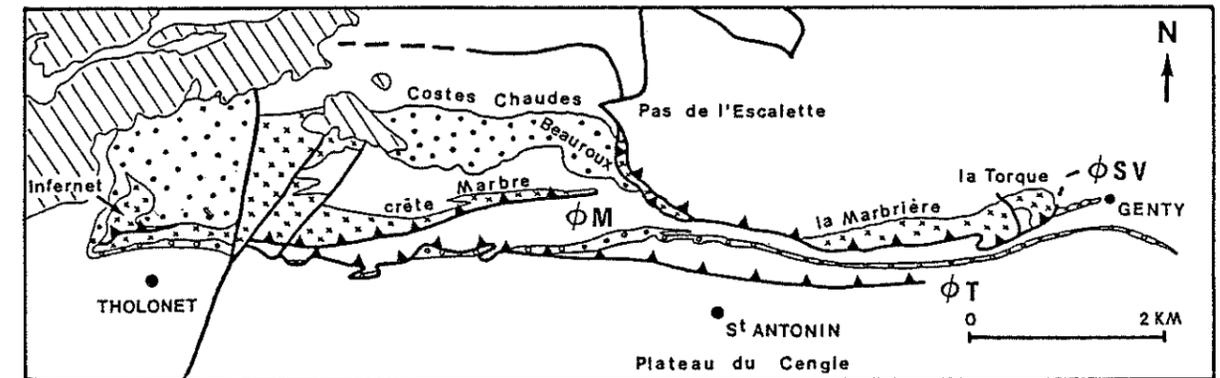


Figure 4 : Cartographie des formations bréchiques au pied du massif de la Sainte-Victoire.

	miocène discordant.	$\phi_M$	= chevauchement crête du Marbre
	brèche dano-montienne.	$\phi_T$	= chevauchement Tholonet
	brèche bégudo-rognacienne.	$\phi_{SV}$	= chevauchement Sainte-Victoire

La controverse principale porte sur les formations à l'Est de la Sainte-Victoire aux lieux-dits la Marbrière et la Torque (fig. 4). Elles sont attribuées à l'Eocène par R. Ruiz (1978, J. CHOROWICZ et R. RUIZ, 1979), datées du Crétacé pour C. Tempier (1964).

C. Tempier (1981) a montré que ces brèches sont d'âge bégudo-rognacien (fig. 4, fig. 14) : "... Les brèches de la Torque sont surmontées, en série normale, par des argiles rouges et des grès qui renferment des débris d'oeufs de Dinosauriens (il n'y a pas de grès dans les formations argileuses de la base du Tertiaire dans la région)". C'est son interprétation qui a été adoptée.

\* Au Nord de la montagne des Ubacs (bassin de Rians, fig. 1, fig. 12), C. Rousset (carte géologique au 1/50 000, feuille de Pertuis, 1970) distingue les brèches montiennes des brèches thanétiennes. Pour C. Tempier, cette distinction est discutable : en effet, les formations bréchiques du bassin de Rians sont intercalées dans une série de marnes-lie-de-vin comme dans le bassin de l'Arc où elles sont datées du Dano-montien. Cette analogie de faciès entre les deux bassins ne permet pas d'imputer de façon certaine un des épisodes bréchiques au Thanétien. Le problème reste entier.

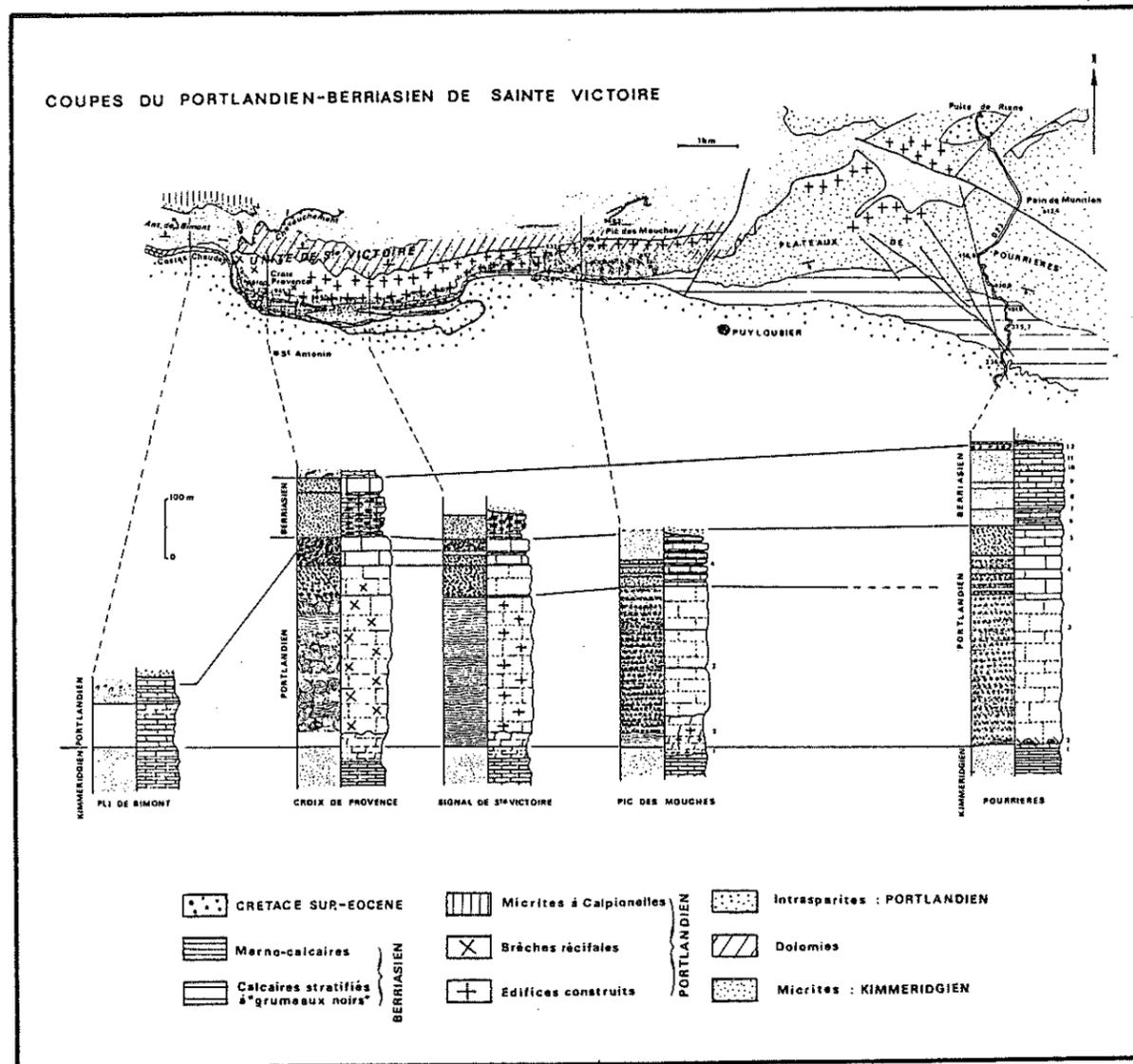


Figure 5 : Répartition des faciès du Jurassique supérieur dans le massif de la Sainte-Victoire, d'après C. Tempier (1972).

## II.1.2. Les particularités de la série stratigraphique

La série stratigraphique présente des variations fréquentes de faciès et d'épaisseur.

### II.1.2.1. Les variations de faciès

La distribution des faciès est complexe au Jurassique (C. TEMPIER, 1966, 1968, 1972). Elle est remarquable par l'existence, au Portlandien, d'une édification récifale en Sainte-Victoire et par les importantes variations latérales observées dans les autres parties du massif. Lors de la restitution à l'état anté-déformation (coupes équilibrées) on sera conduit à envisager, au Jurassique supérieur, un dépôt non horizontal. L'étude de la bathymétrie, fournit dans ce cas des renseignements utiles.

Dans la montagne Sainte-Victoire, de la Croix de Provence au Pic des Mouches, le Portlandien est représenté par un faciès récifal : calcaires construits à Madréporaires et à Algues (fig. 5). Ce faciès s'étend jusqu'au Sud du bassin de Rians (fig. 1, fig. 12). Le récif est toujours à fleur d'eau (niveau de la mer).

Il passe à l'Est (Pain de Munitien) et au Sud (bassin de l'Arc) à un faciès de destruction récifale : calcarénites à Stromatolithes. Ces formations se développent à la limite de l'émergence. La bathymétrie varie entre 0 et 15 m.

Au Nord (montagne des Ubacs, bois de Concors) (fig. 1, fig. 12) et à l'Ouest (vallon de Bimont) sont décrits des faciès à influences pélagiques : calcaires sublithographiques à Calpionelles. Des turbidites retrouvées au Nord de la montagne des Ubacs (ou Sambuc, fig. 1, fig. 12) permettent de présumer de l'existence d'une paléopente. D'après C. Tempier (communication orale), la bathymétrie serait du même ordre de grandeur que la subsidence, environ de 400 à 500 mètres.

Dans la cluse de Pont-de-Mirabeau, en rive droite de la Durance, une coupe montre un Jurassique supérieur de type mixte entre les faciès provençaux et subalpins : calcarénites, calcaires construits à Polypiers et calcaires à Calpionelles. Une succession du même type est retrouvée dans la montagne Vautubière et au Mont Major (fig. 1). Les bassins seraient comblés au Barrémien.

### II.1.2.2. Les variations d'épaisseurs

Pour définir la géométrie initiale des formations, il est important de préciser leurs variations d'épaisseur. Encore faudra-t-il déterminer comment elles s'opèrent.

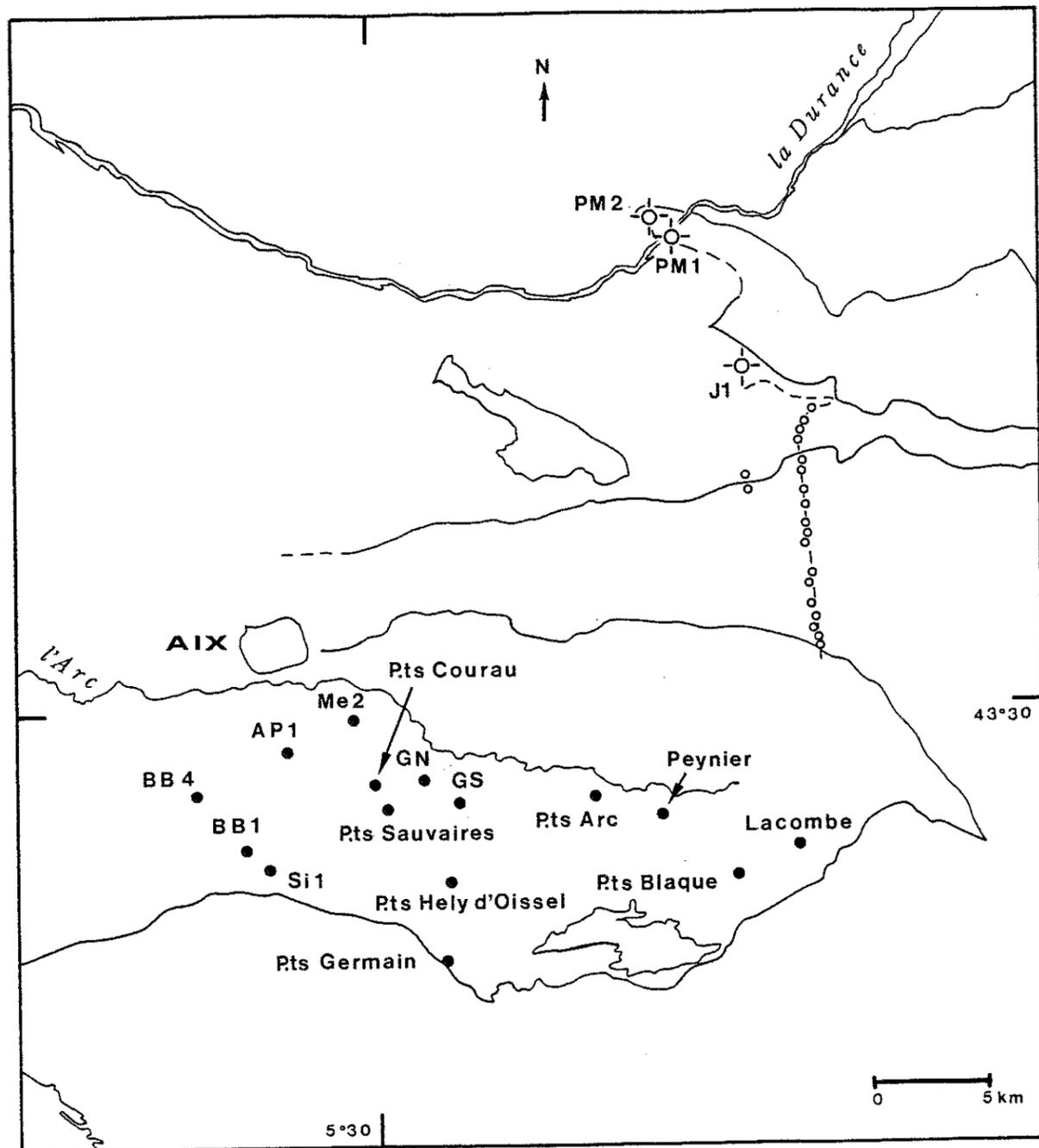


Figure 6 : Carte de situation des forages dans la région étudiée.

- ⊗ = forage pétrolier.
- = forage des Houillères de Provence.
- = forage du canal de Provence.

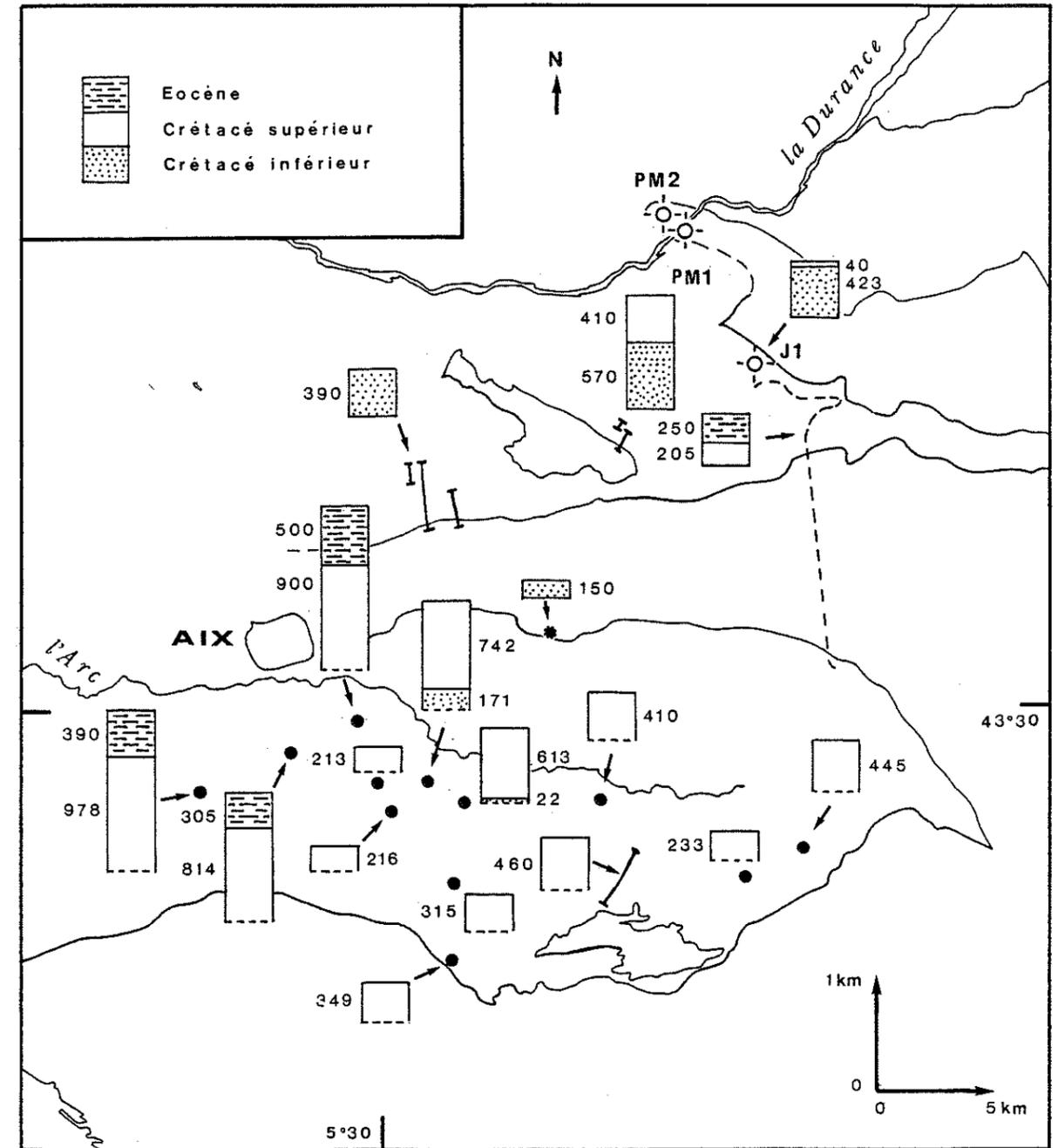


Figure 7 : Carte des variations d'épaisseur de l'Eocène et du Crétacé.

Les chiffres donnent l'épaisseur en mètres de chaque niveau.

La carte a été établie à partir de données variées.

- ⊗ = forage pétrolier.
- = forage des Houillères de Provence.
- = tracé du canal de Provence.
- ⊥ = arrêt du forage.
- ∩ = coupe mesurée (J. BATHIARD, 1963 ; C. LAMBERT, 1962).
- \* = épaisseur (C. TEMPIER, communication orale).

Les épaisseurs sont relativement bien connues pour les termes allant de l'Eocène au Jurassique moyen. Elles le sont beaucoup moins précisément pour les séries plus anciennes : jurassique inférieure à permienne.

#### a- L'Eocène et le Crétacé.

Ces séries présentent des variations importantes d'épaisseur (fig. 6, fig. 7) entre le Nord (bassin de Concors, bassin de Rians) et le Sud (bassin de l'Arc).

\* Dans le bassin de Rians, l'Eocène et le Crétacé supérieur (fig. 7) sont réduits à certains termes (250 m pour l'Eocène inférieur et 400 m pour le Rognacien), le Crétacé inférieur également puissant (390 à 570 m).

\* En revanche, dans le bassin de l'Arc, l'Eocène et le Crétacé supérieur sont bien plus complets (jusqu'à 500 m de puissance du Montien au Lutétien, 978 m du Santonien au Rognacien) alors que le Crétacé inférieur est peu épais ou inexistant (300 m au maximum vers le centre du bassin).

Pour avoir une bonne image de la géométrie profonde de ce bassin, a été utilisée -en plus des données de sondages- une carte en isobathes du niveau de la couche "Grande Mine" qui se situe vers la base du Fuvélien (figure 8, Ch. GLINTZBOECKEL, 1980). Le bassin de l'Arc présente d'autre part un important biseau d'érosion au Crétacé inférieur dont la cartographie exacte est impossible à connaître avec précision dans l'état actuel des données. Les dépôts du Crétacé inférieur, rencontrés dans les sondages de Gardanne Sud (DUFAURE, 1967) et Gardanne Nord (170 m d'Hauterivien, pas entièrement traversé), se biseautent vers le Nord (fig. 9a) et sont supposés érodés à l'Est de ces sondages dans la partie orientale du bassin (fig. 9b). La limite, très approximative, du Crétacé inférieur serait de direction Nord-Est - Sud-Ouest. Deux arguments corroborent l'existence de ce biseau d'érosion. Le premier est cartographique : on sait que dans le massif de Regagnas, le Crétacé supérieur marin est discordant sur le Jurassique supérieur karstifié et bauxitifère, sans trace de Néocomien intercalé. Dans la partie orientale du bassin, la disposition est identique : le Valdonien repose directement sur du Jurassique supérieur érodé. Le deuxième argument est indirect : le puits de l'Arc (fig. 9b), en 1918, avait été envahi à 425 m (Fuvélien atteint, niveau "Grande Mine") par des eaux dont l'origine jurassique est quasi-certaine (G. DUROZOY, 1980). On suppose qu'il n'existait donc pas de Néocomien marneux au-dessus du Jurassique pour jouer le rôle d'écran.

En résumé, le Néocomien qui existe à l'Ouest du secteur du Regagnas, serait érodé à l'Est. Cette érosion serait liée au bombement durancien.

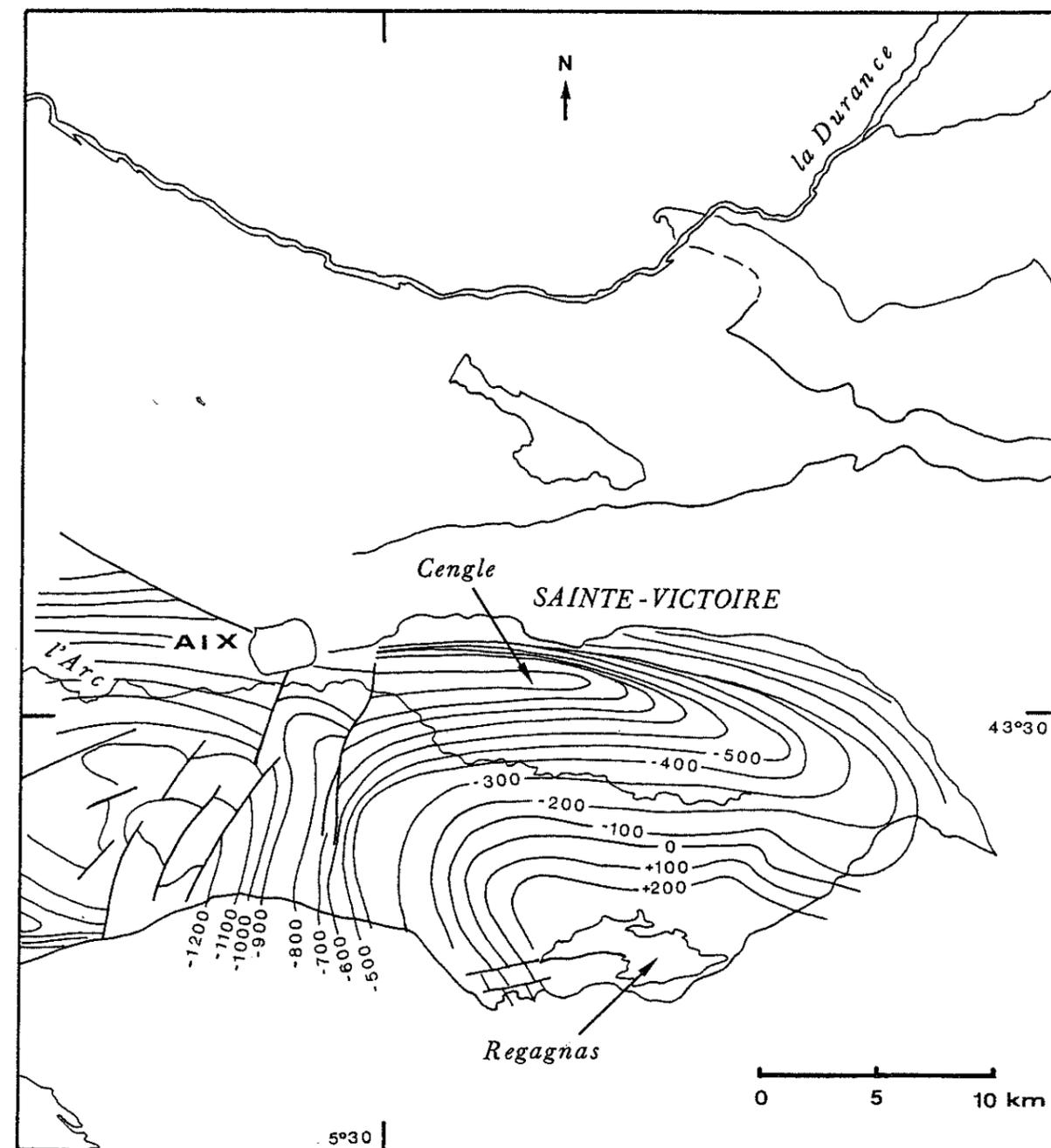


Figure 8 : Esquisse structurale - Isobathes du niveau "Grande Mine" qui se situe vers la base du Fuvélien, d'après Ch. GLINTZBOECKEL, 1980.

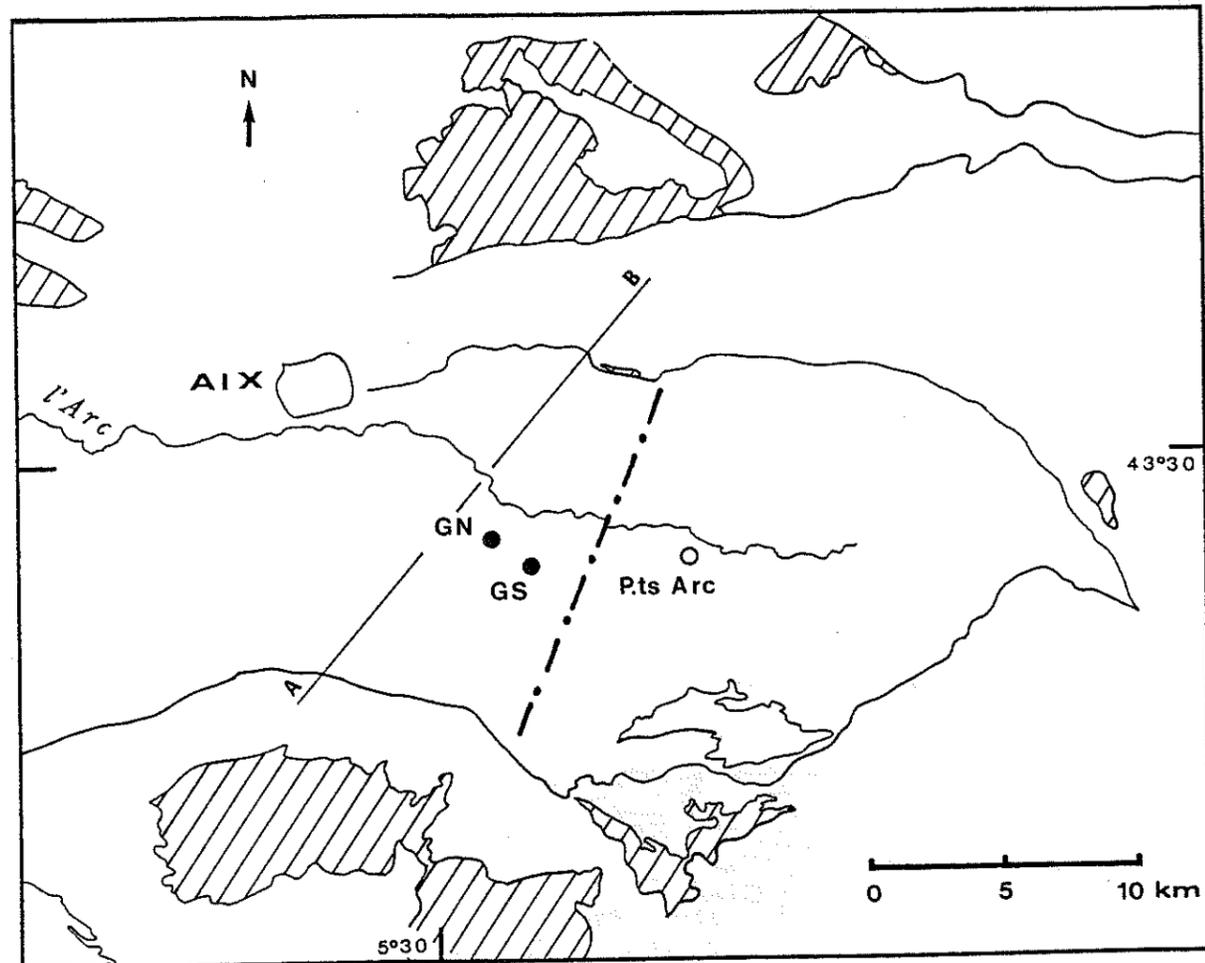


Figure 9a : Affleurements de Crétacé inférieur et limite supposée du biseau d'érosion dans le synclinal de l'Arc.

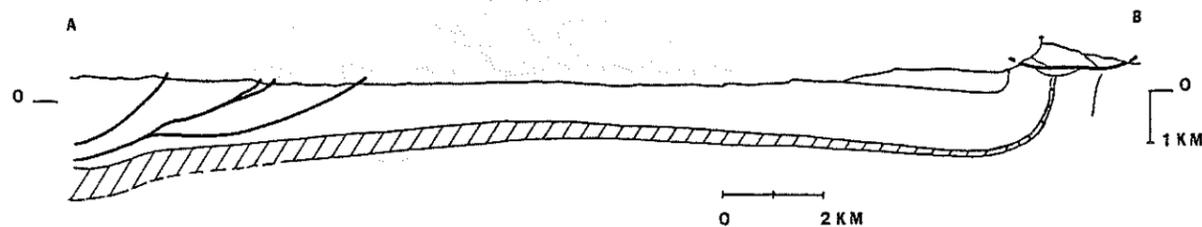


Figure 9b : Coupe dans le synclinal de l'Arc, d'après J.P. Durand (1980). On notera la disparition vers le NE du Crétacé inférieur.

Figure 9 : Le biseau d'érosion du Crétacé inférieur dans le synclinal de l'Arc.

- GN = sondage de Gardanne Nord
- GS = sondage de Gardanne Sud
- = limite supposée du biseau d'érosion
- ▨ = Crétacé inférieur

b- Le Jurassique.

\* Le Jurassique supérieur (fig. 10)

L'épaisseur du Jurassique supérieur est maximale (1400 m) dans la partie centrale du massif de la Sainte-Victoire entre la Croix de Provence et le Pic des Mouches (fig. 5), en liaison avec l'édification récifale. Elle est réduite d'environ moitié dans les autres directions de l'espace (600 m en moyenne à l'Est, l'Ouest et au Nord, 500 m au Sud).

Dans le sondage de Jouques, le Portlandien est anormalement peu épais. Il s'agit certainement d'un problème de subdivisions lithostratigraphiques. En effet, le Portlandien est représenté par des calcaires micritiques gris (faciès Tithonique). Seule sa partie supérieure est bien caractérisée par une microfaune de Tintinides. La limite inférieure du Portlandien est alors très difficile à fixer avec précision.

L'Oxfordien supérieur (Argovien) formé de calcaires noduleux de plus en plus calcaires vers le sommet, est volontairement décrit avec l'ensemble calcaréo-dolomitique du Jurassique supérieur stricto-sensu. Au point de vue lithologique, on peut considérer qu'il est "solidaire" de cette formation. Il constitue un bon niveau repère, son épaisseur est à peu près constante à l'échelle de nos coupes. Il est érodé au Sud dans la montagne du Regagnas.

\* Le Jurassique moyen et le Jurassique inférieur (fig. 11).

Les variations de ces séries sont encore importantes et rapides (réduction, voire absence de certains niveaux). Les épaisseurs sont maximales à l'Ouest (Nord-Ouest de la croix de Provence), encore importantes au centre (Pic des Mouches) et au Nord (sondage de Jouques), réduites à l'Est (Caugnon, Mont Major) et au Sud (montagne de Regagnas). Les chiffres fournis par les travaux du canal de Provence sont peu fiables pour ces niveaux (sondages peu profonds, succession de roches souvent broyées).

Ces données ponctuelles (coeur de l'anticlinal, sondage) ne permettent en aucun cas d'affirmer que les épaisseurs de ces séries sont les mêmes sous les massifs calcaires. Les caractéristiques de la sédimentation liasique sont très mal connues.

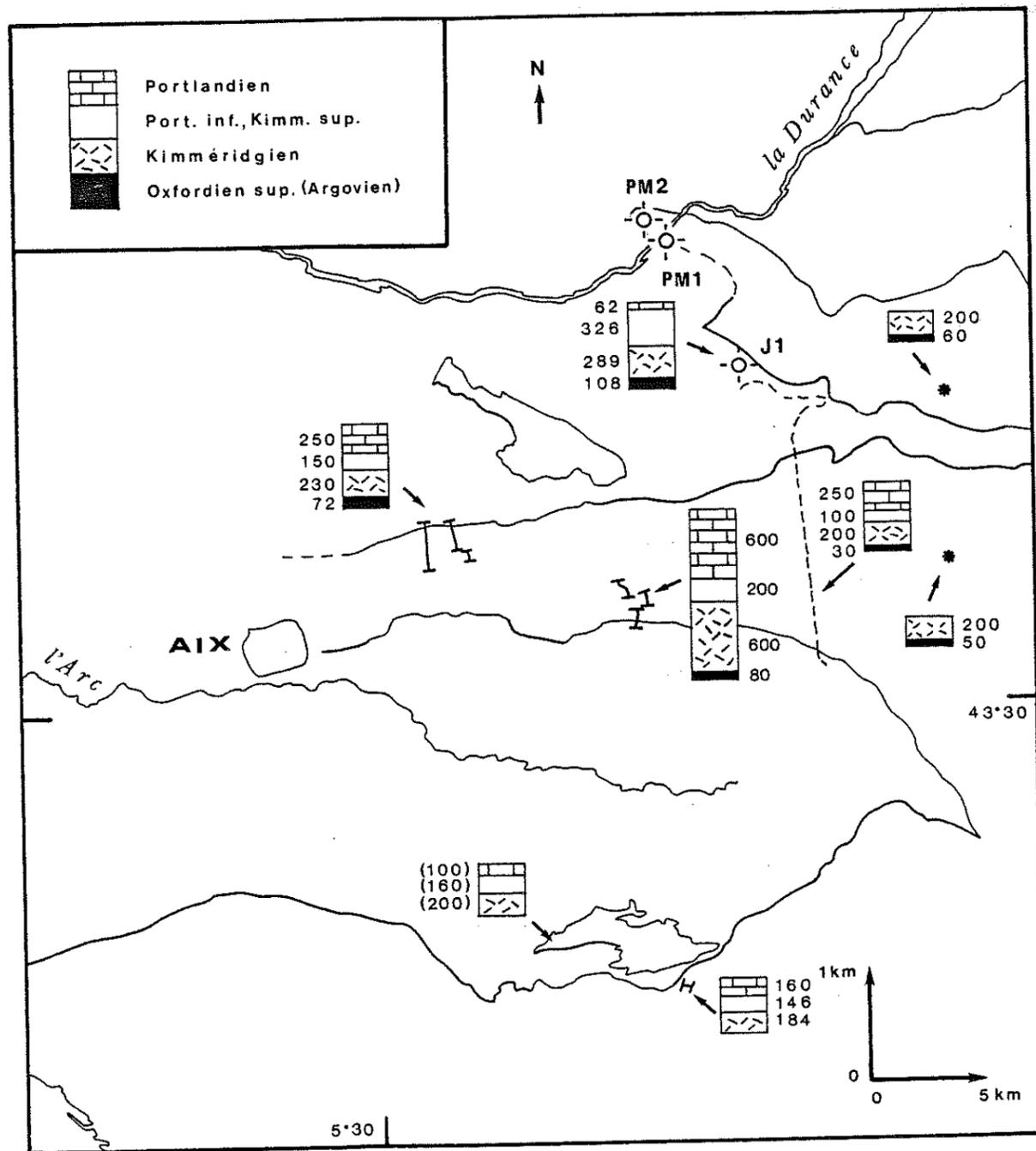


Figure 10 : Carte des variations d'épaisseur du Jurassique supérieur.  
 Les chiffres donnent l'épaisseur en mètres de chaque niveau.  
 (200) épaisseur supposée.

- = forage pétrolier.
- - - = tracé du canal de Provence
- ↗ = coupe mesurée (A.F. BAUDRIMONT, 1962)
- \* = épaisseur (C. TEMPIER, Communication orale).

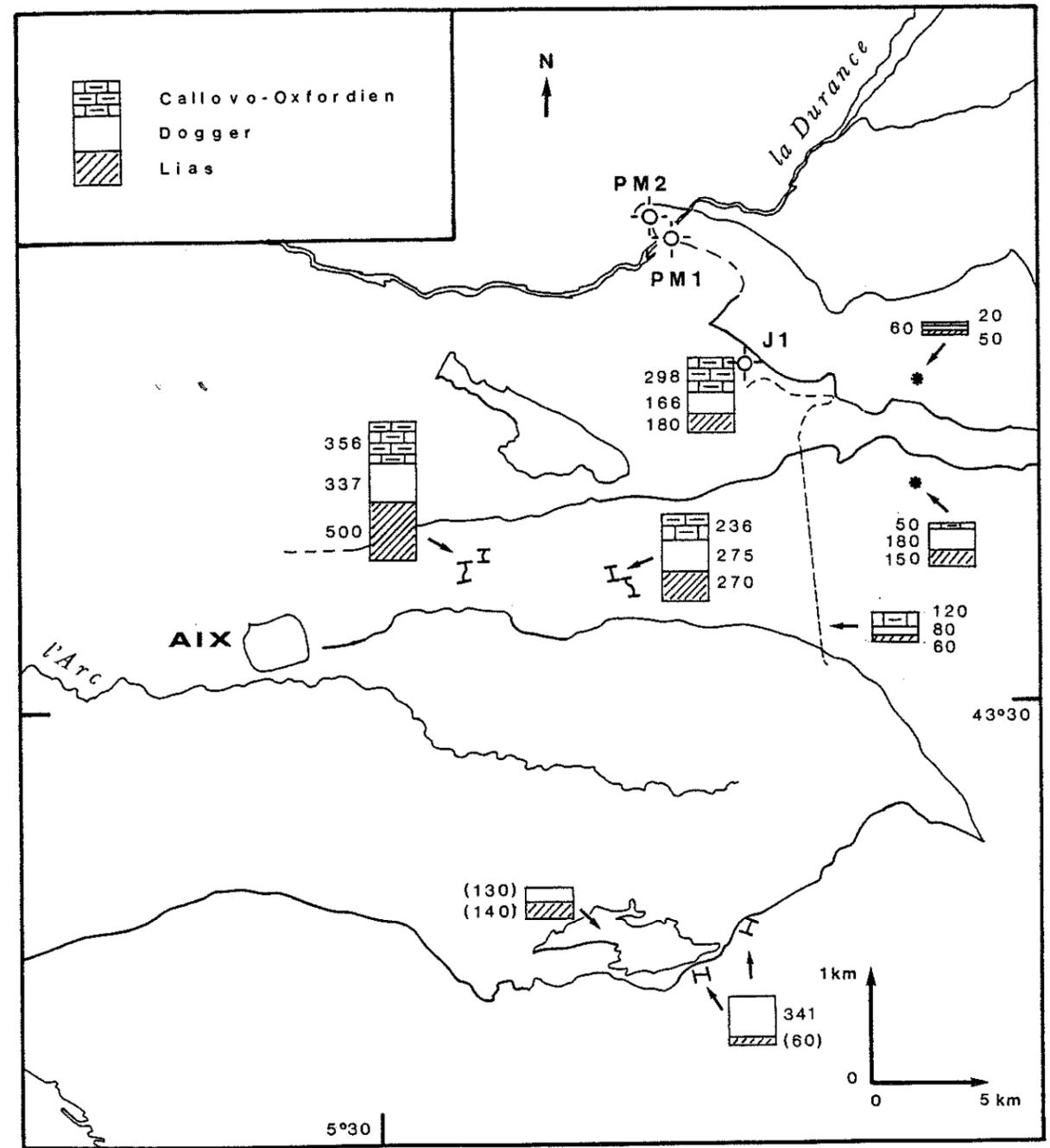


Figure 11 : Carte des variations d'épaisseur du Jurassique moyen et inférieur.  
 Les chiffres donnent l'épaisseur en mètres de chaque niveau.

- = forage pétrolier.
- - - = tracé du canal de Provence.
- ↗ = coupe mesurée (A.F. BAUDRIMONT, 1962).
- \* = épaisseur (C. TEMPIER, Communication orale).

### c- Le Permien et le Trias

Très peu d'informations sont disponibles pour ces niveaux profonds. Les seules données précises et fiables sont celles du sondage de Jouques : pas de Permien, 568 m de Trias.

On peut néanmoins supposer qu'il existe dans le bassin de l'Arc des dépôts permien ou permo-carbonifères épais. En effet, ce bassin est situé dans le prolongement d'une ligne Est-Ouest passant par le Muy où l'on rencontre plus de 1000 mètres de Permien.

#### II.1.3. La compétence de la série stratigraphique

Une bonne connaissance de la compétence de la série sédimentaire permet de présumer de la position des plans de décollement potentiel, du style tectonique et de fixer un horizon repère.

##### II.1.3.1. Les niveaux de décollement

Ils sont associés à deux horizons stratigraphiques bien déterminés :

- \* le Trias gypseux (Keuper : anhydrite et sel) : sa lithologie l'impose comme plan de glissement principal et privilégié ;
- \* le Callovo-Oxfordien marneux (faciès Terres Noires). Un décollement est envisageable dans ces niveaux incompétents.

La présence de Terres Noires peut également influencer le style tectonique. Elles créent une possibilité de disharmonie. D'autre part, elles facilitent le développement éventuel de plats. En l'absence de Terres Noires, les chevauchements recoupent une série homogène compétente (rampe simple). Ainsi, au Sud du bassin de l'Arc on observe fréquemment des séries monoclinales chevauchantes (C. TEMPIER, communication orale).

##### II.1.3.2. Un horizon repère : l'Argovien

L'Oxfordien supérieur ou Argovien, niveau compétent de faible épaisseur (100 m au maximum) a été choisi comme horizon repère.

Les raisons de ce choix sont simples :

- \* il a peu ou pas été déformé. Sur le terrain, des fossiles intacts ont été fréquemment observés dans ces calcaires marneux ;
- \* il est très contraint cartographiquement. On le rencontre souvent à l'affleurement ou à proximité de la surface. Cela permet de minimiser les erreurs sur l'appréciation des longueurs.

## II.2. La structure

La région étudiée peut se diviser en deux ensembles structuraux qui sont du Sud au Nord (fig. 12) :

- \* un ensemble de structures de direction globalement Est-Ouest : il s'agit d'un massif complexe formé de terrains jurassiques, limité au Sud par le synclinal de l'Arc, au Nord-Ouest par le chevauchement des Ubacs. Il est composé principalement de la Sainte-Victoire et des Ubacs.

- \* un ensemble de structures de direction Nord-Ouest - Sud-Est très différente de la précédente : deux synclinaux (Rians à l'Est, bois de Concors à l'Ouest) et deux anticlinaux (Mont Major-Vautubière, Concors).

Sept coupes sériées Nord-Sud ont été réalisées pour prendre en compte l'évolution latérale des structures et respecter la cohérence géométrique (fig. 13). Elles sont localisées sur un schéma structural simplifié (fig. 12).

Après une simple description des structures rencontrées (la description ne portant que sur les structures qui n'apparaissent pas clairement sur la carte ou sur les coupes), les problèmes qu'elles posent et la cinématique des déformations seront discutés.

### II.2.1. Description des structures

#### II.2.1.1. Les structures Est-Ouest

##### a- Le synclinal de l'Arc

Seule la partie orientale du bassin de l'Arc a été étudiée. Elle est chevauchée au Sud-Est par les massifs de l'Olympe et l'Aurélien, au Sud-Ouest par la chaîne de l'Etoile. Les couches du Crétacé marin et fluvio-lacustre se moulent autour du demi-anticlinal faillé du Regagnas (fig. 8, fig. 12). Elles s'ordonnent en larges auréoles régulières et plongent faiblement vers le Nord (10 à 15°). L'axe de ce synclinal, orienté Est-Ouest, se situe approximativement sous le plateau du Cengle.

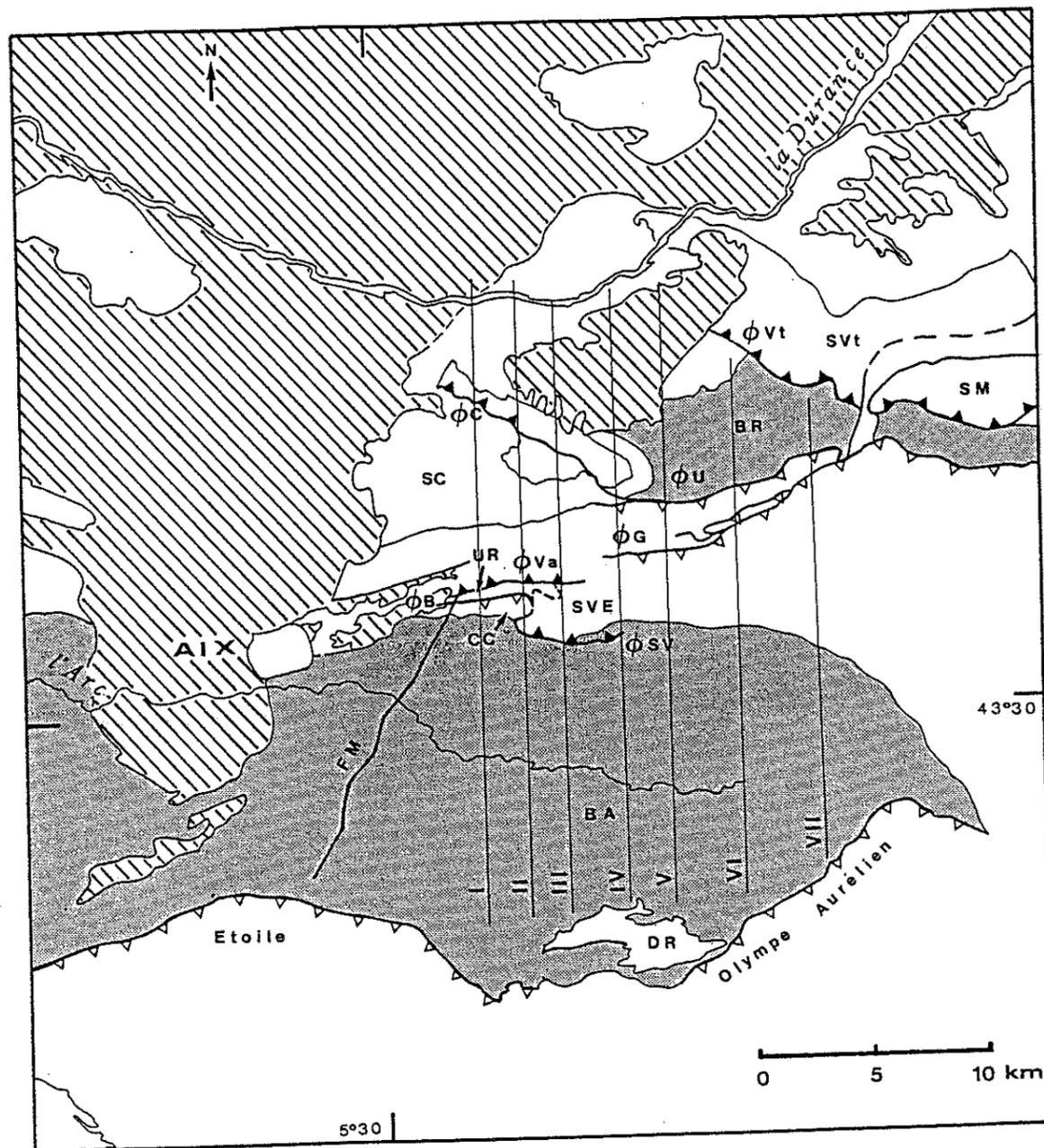


Figure 12 : Schéma structural simplifié

Dénomination des structures :

D.R. = dôme du Regagnas, B.A. = bassin de l'Arc, S.V.E. = structure Sainte-Victoire Est, C.C. = Costes Chaudes, U.R. = unité des Reynauds, S.U. = structure des Ubacs, B.R. = bassin de Rians, S.C. = structure du bois de Concors.

Dénomination des chevauchements et des failles :

φSV = chevauchement Sainte-Victoire, φB = chevauchement Bimont, φVa = chevauchement Vauvenargues, φG = chevauchement Gardiole, φU = chevauchement Ubacs, φVt = chevauchement Vautubière, φC = chevauchement de Concors, FM = faille de Meyreuil.

-  Terrains discordants
-  Eocène et Crétacé supérieur
-  Crétacé inférieur et Jurassique

La faille la plus importante reconnue en surface est celle de Meyreuil qui se prolonge au Sud en direction de Gardanne. Cet accident est à rattacher à la faille d'Aix, zone de cisaillement senestre majeure (P. GAVIGLIO, 1985).

Le synclinal se ferme à l'Est périclinalement contre le Jurassique supérieur. Sa limite septentrionale est complexe, jalonnée par deux formations bréchiques : l'une dano-montienne, l'autre bégudo-rognacienne. Ces brèches résultent de l'érosion du massif de la Sainte-Victoire au cours de sa mise en place tectonique, leur situation est donnée sur la figure 14 et leur âge a été discuté précédemment (II. 1.1.2, b).

\* Les brèches dano-montiennes (limite Crétacé supérieur-Eocène, fig. 14)

Ces brèches sont en contact stratigraphique clair avec les terrains datés de l'Eocène. Verticales au pied du massif de la Sainte-Victoire, elles se renversent (80-85° N) au Nord-Ouest de Saint-Antonin et sont affectées vers l'Ouest d'un chevauchement subhorizontal vers le Sud qui disparaît dans les argiles maestrichiennes (J.-P. DURAND et C. TEMPIER, 1962).

Au pied des Costes-Chaudes, elles reposent en discordance angulaire d'environ 90° sur la série jurassique. Leur pendage moyen de 40° S décroît régulièrement pour devenir horizontal sur le plateau de Beauroux (fig. 14, coupe 2). La charnière anticlinale en genou décrite par R. Ruiz (1978) au Sud du Pas-de-l'Escalette n'a pas été observée sur le terrain. Mais des pendages verticaux à déversés ont été retrouvés vers le Nord (80° N).

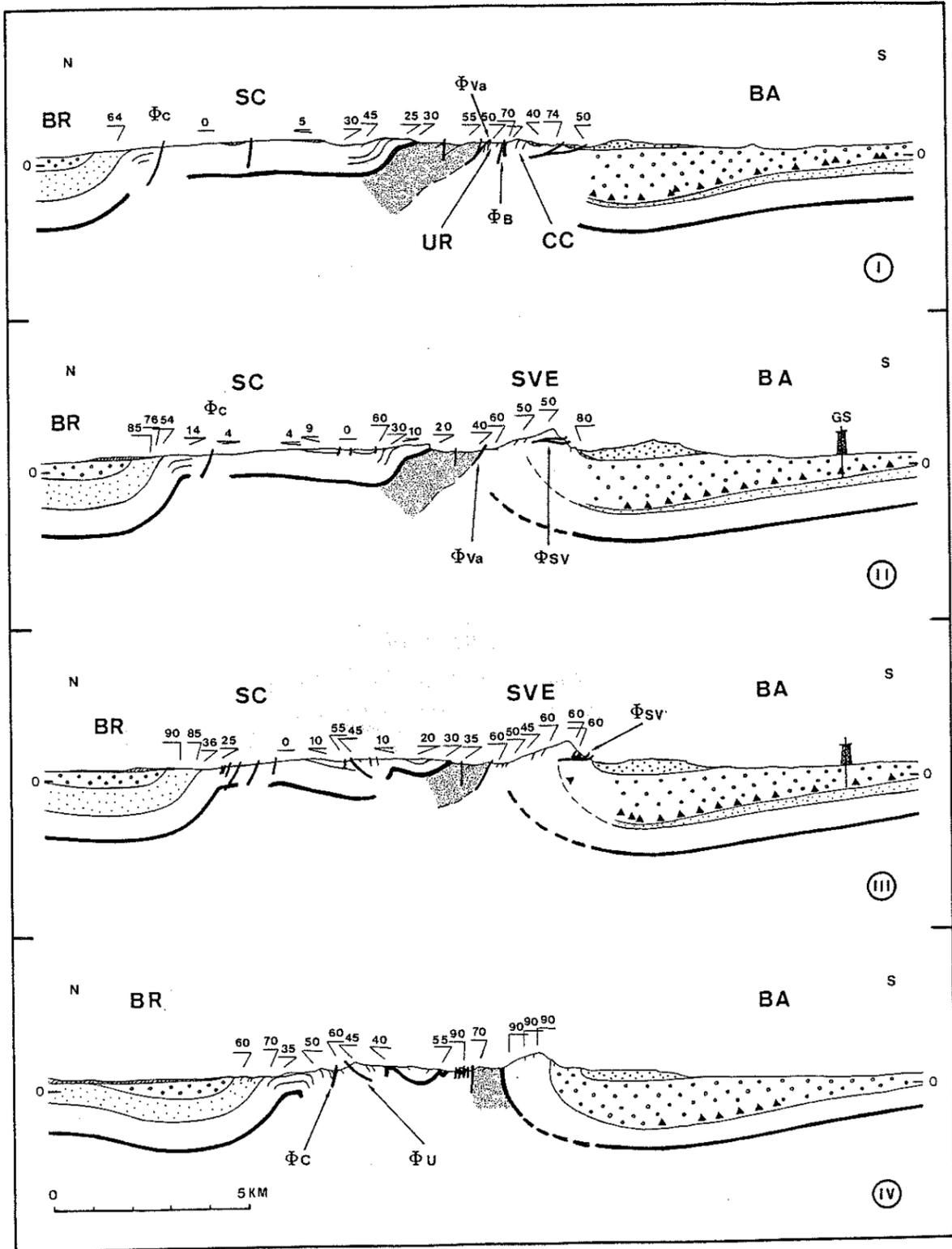
A l'Ouest (barrage de Zola), elles masquent les brèches bégudo-rognaciennes du pli-faillé de l'Infernet.

\* Les brèches bégudo-rognaciennes (Crétacé supérieur, fig. 14)

A l'Est (Genty), des brèches bégudo-rognaciennes s'effilent en biseau dans les grès à Reptiles, au Nord du calcaire de Rognac (C. TEMPIER, 1981).

A l'Ouest, elles constituent la crête du Marbre, limitée au Sud par une faille inverse assez redressée (70° N), et se prolongent vers le Nord par un vaste épandage qui repose en discordance sur le Jurassique supérieur. L'angle de discordance est de l'ordre d'une trentaine de degrés (minute de terrain de F. CHENEVAS, barrage de Bimont).

Elles se terminent au Nord du Tholonet par le pli-faillé de l'Infernet, masquées à l'Ouest par l'Eocène (fig. 14, coupe 4).



.../...

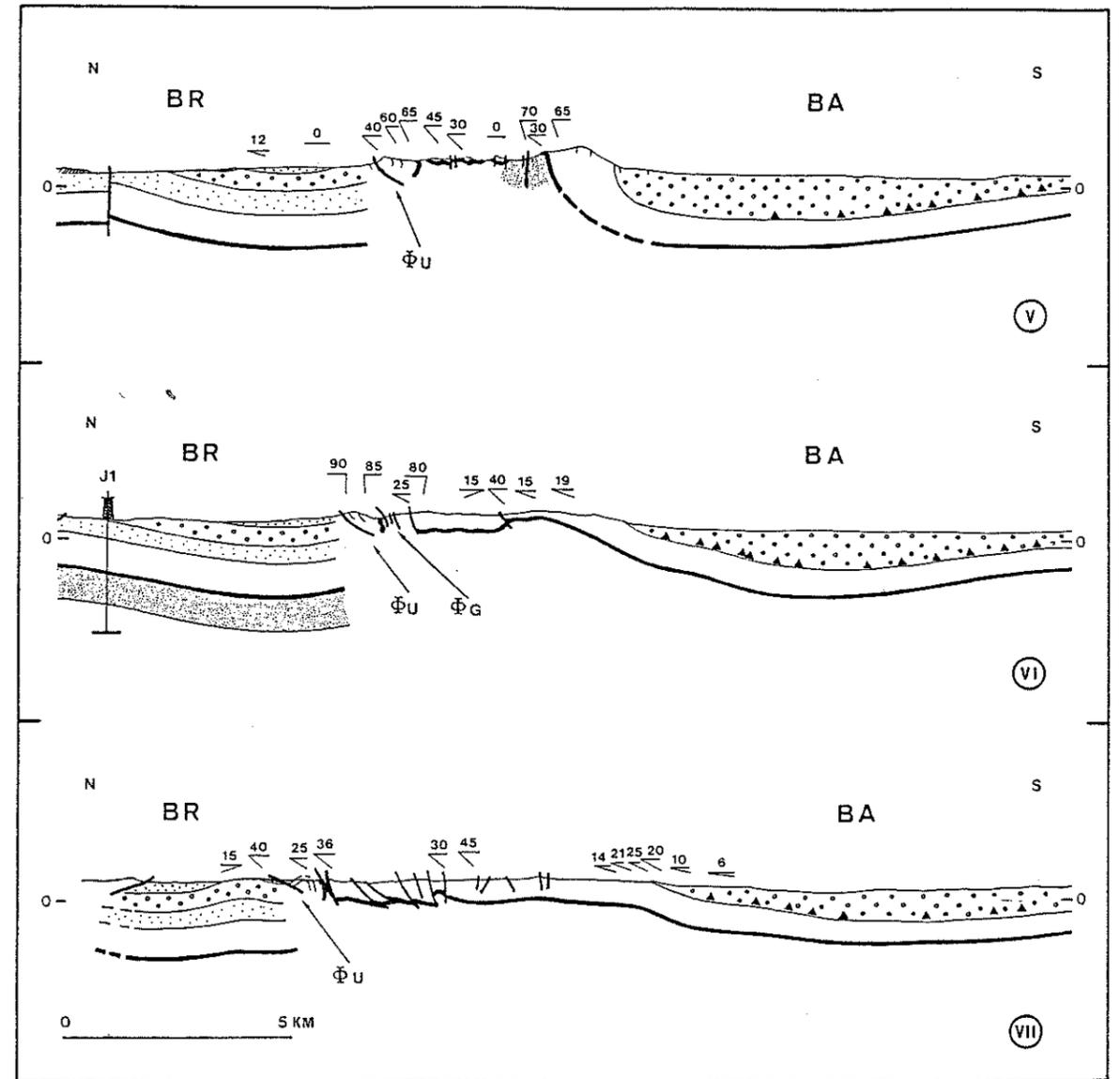


Figure 13 : Coupes s riees.

La terminologie des structures et des chevauchements est donn e sur la figure 12.

- |   |                   |   |                               |
|---|-------------------|---|-------------------------------|
|  | Eocène supérieur  |  | Jurassique supérieur          |
|  | Crétacé supérieur |  | Argovien                      |
|  | Crétacé inférieur |  | Jurassique moyen et inférieur |

▲ profondeur report e à partir de la carte en isobathes du toit de la grande mine (figure 8).

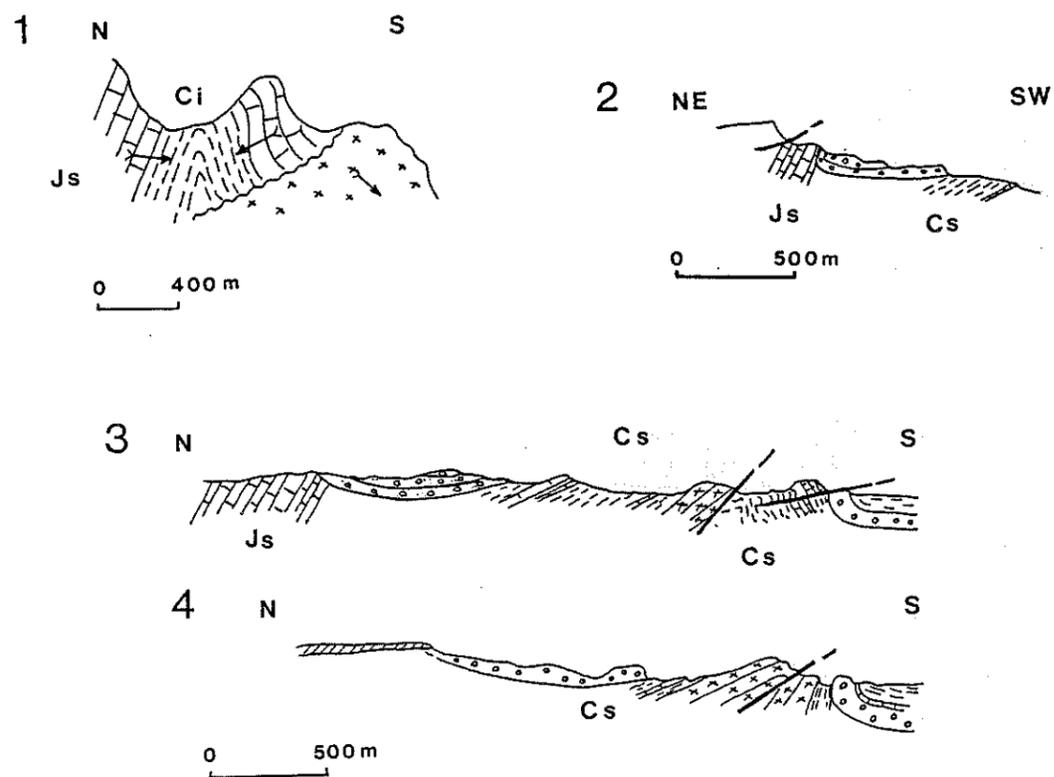
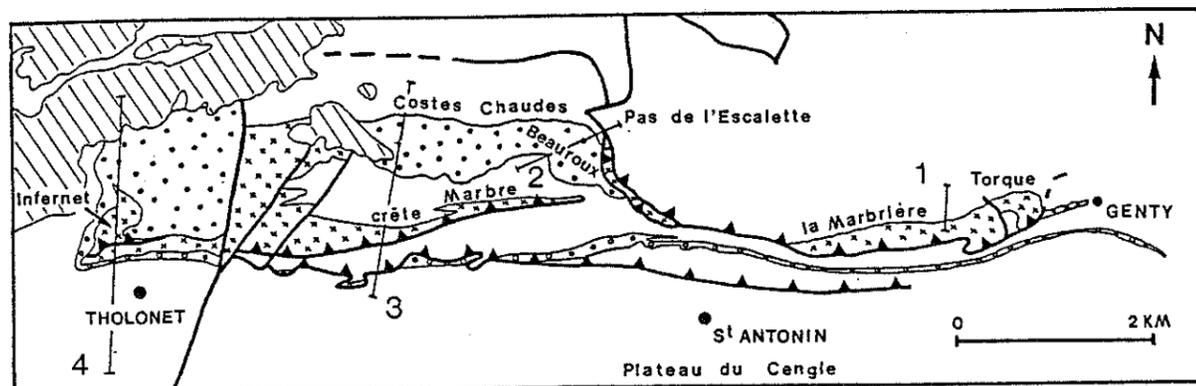
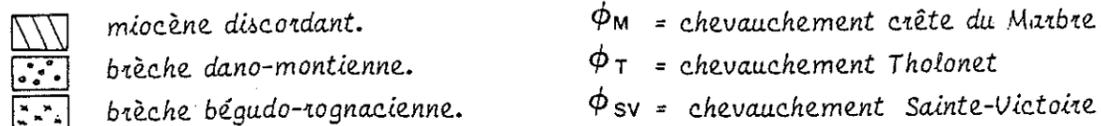


Figure 14 : Cartographie des formations bréchiques au pied du massif de la Sainte-Victoire et coupes correspondantes. Coupe 1, d'après C. Tempier et J.P. Durand (1981) ; coupes 3 et 4, d'après J. Chorowick et R. Ruiz (1979).



b- La structure méridionale Est-Ouest : la Sainte-Victoire au sens large

Schématiquement, on se trouve en présence d'une seule grande structure anticlinale, composée pour l'essentiel de Jurassique supérieur : la Sainte-Victoire au sens large (fig. 12, fig. 13). Mais une évolution apparaît latéralement : en 15 km et d'Est en Ouest, on passe d'un vaste bombement monoclin à faible pendage Sud, à un pli coffré symétrique à flancs verticaux dont le flanc Sud se déverse. A l'Ouest, ce flanc Sud se complique en deux unités renversées.

Dans la haute chaîne, les calcaires portlandiens et les calcaires argileux néocomiens, en série inverse, sont affectés de petits replis secondaires antiformes et synformes (G. CORROY et al., 1964 ; C. TEMPIER, 1981). Ces microplis supportent en contact de ravinement des brèches datées du Bégudo-Rognacien (fig. 14, coupe 1 ; C. TEMPIER, 1981), limitées par le chevauchement de la Sainte-Victoire. Il faut retenir la succession de déformation qui découle d'une telle description : plissement, érosion, dépôt des brèches et chevauchement.

Le Néocomien du flanc Sud de la Sainte-Victoire n'est pas disposé en synclinal déversé vers le Sud à coeur d'Hauterivien (R. RUIZ, 1978, J. CHOROWICZ, R. RUIZ, 1979).

La structure anticlinale de Sainte-Victoire est affectée par trois failles inverses principales de direction Est-Ouest qui s'amortissent vers l'Est :

\* le chevauchement de Vauvenargues (fig. 12 ; fig. 13, coupes I, II, III) au coeur du pli : il apparaît à l'Ouest de la Citadelle, très redressé, légèrement chevauchant vers le Sud. La flèche du chevauchement augmente vers l'Ouest et met en contact au Nord du vallon de Bimont, le Lias de la série normale de Sainte-Victoire et le Kimméridgien de l'unité des Reynauds. Il est alors faiblement incliné vers le Nord ( $30^\circ$  N à horizontal) et jalonné de lambeaux de poussée arrachés à la série sous-jacente.

\* le chevauchement à vergence Sud de Sainte-Victoire (fig. 12 ; fig. 13, coupes I, II) : il cisaille le flanc inverse du pli et donne son individualité à la bordure septentrionale du synclinal de l'Arc (cf. II. 2.1.1.a). Il limite à l'Est les brèches bégudo-rognaciennes poussées sur les formations autochtones du synclinal. Il a donc fonctionné après le Bégudo-Rognacien. Le contact longe la falaise du versant Sud, il est bien visible au Sud et se traduit par une série de plans de cisaillement subhorizontaux bien développés dans des niveaux argileux rouges. Il est post-lutétien pour C. Tempier (1964, 1981).

\* la faille du vallon de Bimont (fig. 12 ; fig. 13, coupes I, II, fig. 15) : son existence même pose problème puisqu'elle a été présentée par R. RUIZ (1978) et méconnue par les autres auteurs. Les datations stratigraphiques (cf. II. 1.1.2 b) ont permis de confirmer l'existence de cette faille, mais une ambiguïté subsiste quant aux relations angulaires faille-couches. Il en sera discuté ultérieurement.

En dehors de ces chevauchements d'orientation Est-Ouest, on distingue en Sainte-Victoire :

\* une famille de failles Est-Ouest subverticales, à compartiment Nord effondré. Elles affectent surtout la série normale. Elles sont tardives, mais antérieures au Miocène supérieur puisque scellées par le Tortonien.

\* une famille de failles NE-SW moins bien exprimée dont le jeu décrochant est faible.

c- La structure septentrionale Est-Ouest à Est-Nord-Est - Sud-Sud-Ouest : les Ubacs

La structure de la Sainte-Victoire se poursuit vers le Nord-Est par le pli anticlinal à coeur de Lias des Ubacs d'orientation ENE-WSW, déversé vers le Nord et chevauchant (fig. 12 ; fig. 13, coupes V, VI, VII) le synclinal de Rians. A l'Ouest, la structure des Ubacs disparaît en se diverticulant en deux replis anticlinaux qui s'amortissent dans le flanc Nord de la structure de la Sainte-Victoire.

#### II.2.1.2. Les structures Nord-Ouest - Sud-Est

D'Est en Ouest, se développent les plis du Mont-major et de la Vautubière, à vergence Sud. Au Nord-Ouest, l'anticlinal de la montagne Vautubière se poursuit par le pli étroit de Pont-de-Mirabeau. Ces plis sont séparés de l'anticlinal de Concors par le synclinal de Rians.

L'anticlinal de Concors, déversé vers le Sud-Ouest, limite au Nord une zone haute cartographique en forme de cône, large à l'Ouest et se terminant à l'Est contre le chevauchement des Ubacs.

### **II.2.2. Problèmes liés à la structure**

#### II.2.2.1. La faille du vallon de Bimont

On a vu qu'une ambiguïté subsiste quant aux relations angulaires entre le pendage de la faille et le pendage de la stratification. La faille est décrite soit moins pentée que la stratification (R. RUIZ, 1978), soit plus pentée que la stratification (C. TEMPIER, communication orale, mai 1988).

Deux hypothèses peuvent être envisagées :

\* La faille est moins pentée que la stratification (fig. 15).

R. Ruiz décrit une faille faiblement pentée et une stratification monoclinale régulière qui pend de 50° N de part et d'autre de l'accident. Il doit s'agir alors d'un chevauchement à vergence Nord dont le plan était à l'état initial penté au Sud, qui a été basculé et qui est en l'état actuel penté Nord.

\* La faille est plus pentée que la stratification (C. TEMPIER, communication orale, mai 1988, fig. 16).

C. Tempier parle d'une faille pentée à 70° N avec au Nord de l'accident, une stratification 50° N et au Sud de l'accident, localement des couches pentées à 30° N puis de façon régulière des couches pentées 50° N (fig. 16). Il doit s'agir alors d'un chevauchement initialement à vergence Sud qui a été enroulé. Ce chevauchement dit du vallon de Bimont peut se raccorder au Nord au chevauchement de Vauvenargues (fig. 14). On a alors un seul plan unique replissé similaire au chevauchement de la Sainte-Victoire à l'Est.

Mais cette interprétation pose un problème : la faille est supposée tordue de près de 180° alors que les séries qu'elle implique sont monoclinales. Aucun pendage peu penté n'a été décrit au Nord de l'accident sur les différentes minutes de terrain consultées. Une variation si rapide des rapports angulaires entre la faille et la stratification implique un cisaillement couches sur couches très important. Cette solution est très peu probable.

#### II.2.2.2. La zone du Pas-de-l'Escalette (fig. 15)

La liaison entre le chevauchement de Vauvenargues et le chevauchement de la Sainte-Victoire est délicate. Il n'a pas été retrouvé sur le terrain de plans de cisaillements susceptibles - sans contestation possible - de traduire le passage de l'accident de Sainte-Victoire au Pas-de-l'Escalette et vers le Nord. Seuls quelques petits plans porteurs de très rares microstructures ont été observées. Aucun argument de terrain ne permet de décider de façon définitive si le chevauchement se prolonge ou non vers le Nord. On note par contre l'existence d'une bande de terrain large de quelques mètres très chaotique et fracturée, située en arrière du Pas-de-l'Escalette qui peut être interprétée comme une zone de transfert entre l'Est et l'Ouest.

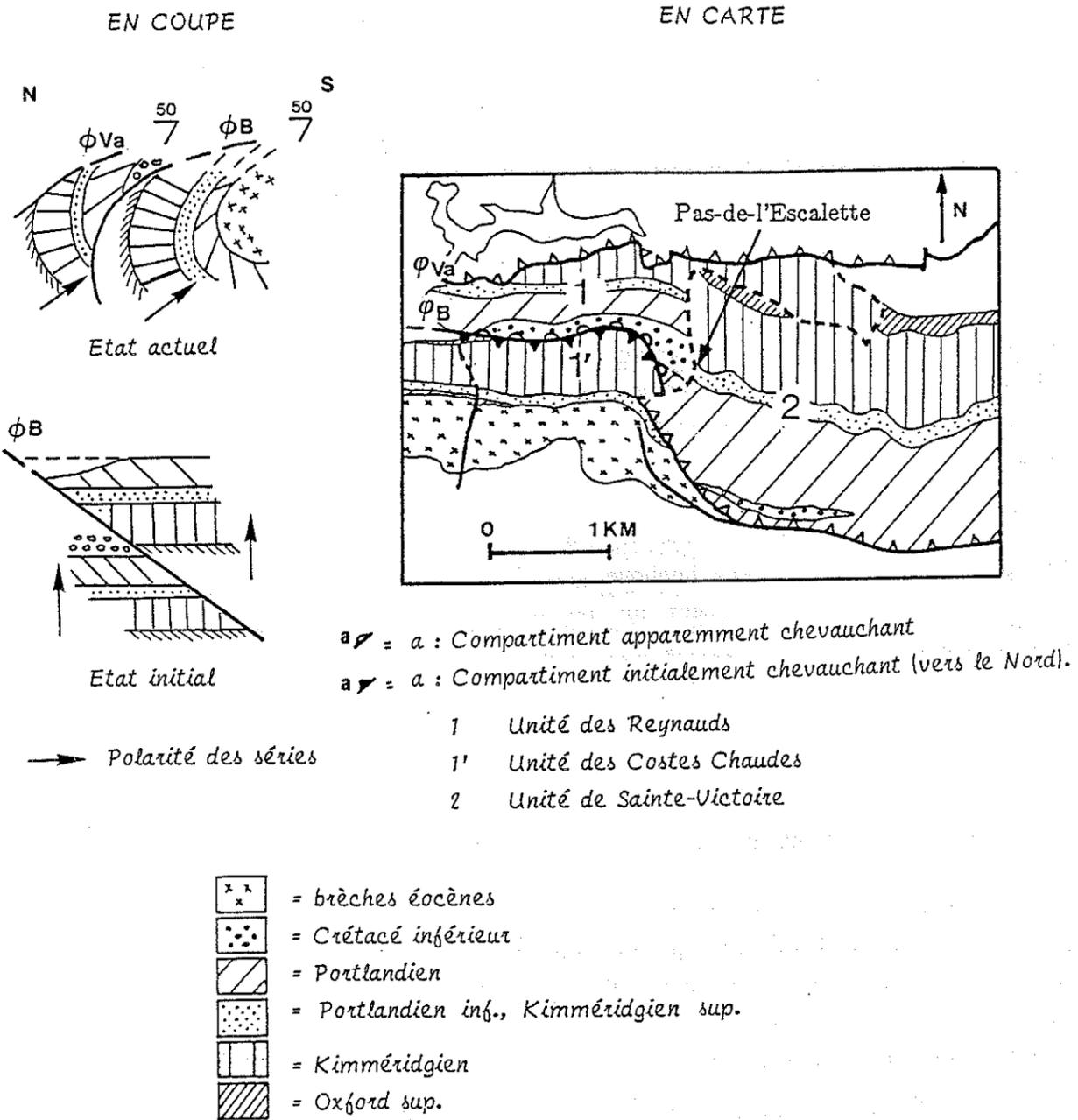


Figure 15 : Interprétation de la faille du vallon de Bimont : la faille est moins pentée que la stratification.

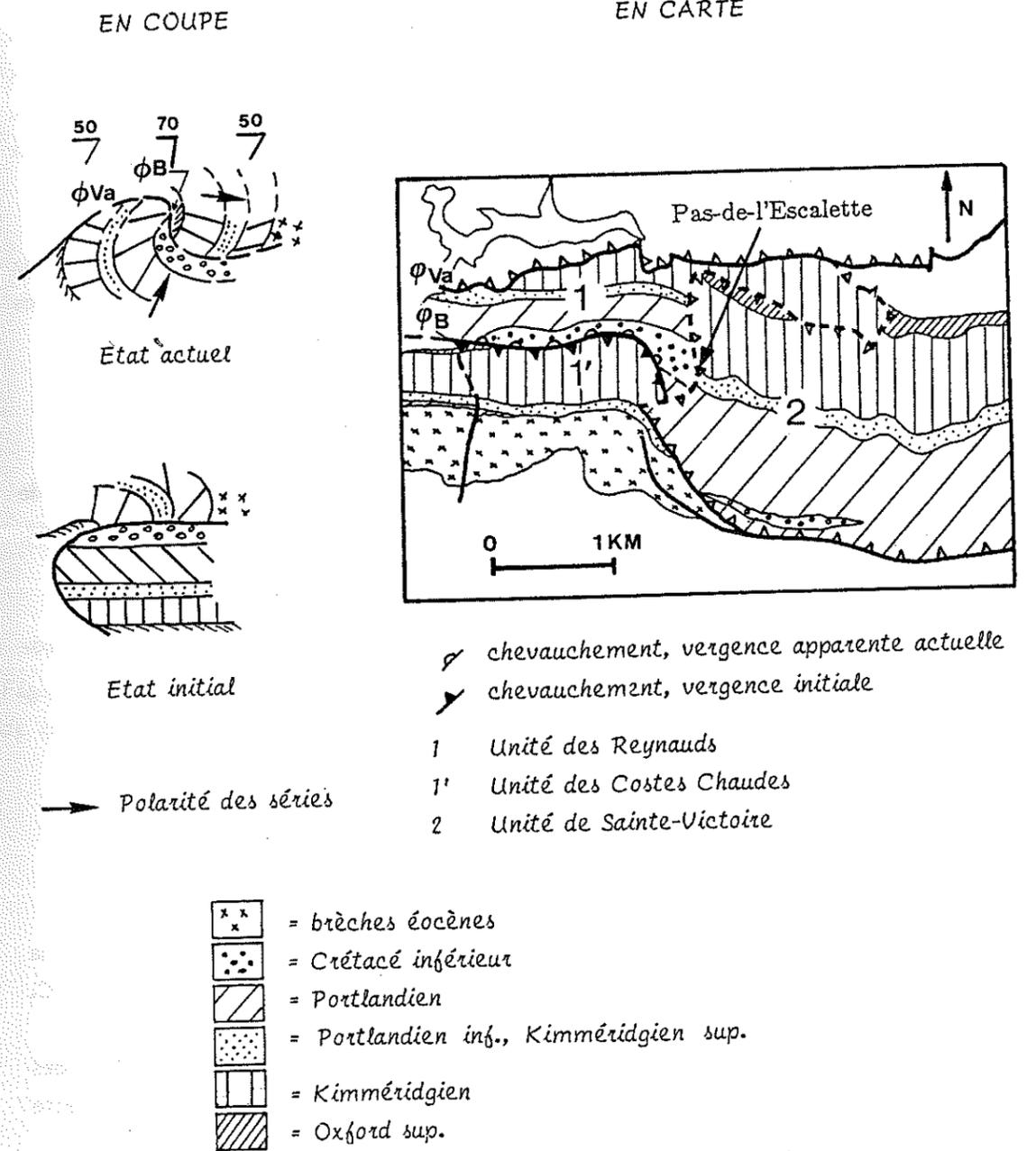


Figure 16 : Interprétation de la faille du vallon de Bimont : la faille est plus pentée que la stratification. L'état initial est peu probable.

### II.2.2.3. L'altitude des différents domaines (fig. 13)

La structure de la Sainte-Victoire montre clairement des complications dont il faudra tenir compte ultérieurement. La structure de bois de Concors est moins évoluée et très monoclinale. Néanmoins, ces deux domaines possèdent un Jurassique affleurant ou subaffleurant, à une altitude très élevée par rapport à son altitude moyenne dans les deux bassins voisins (bassin de l'Arc, bassin de Rians).

Cette élévation devra nécessairement être prise en compte dans l'interprétation globale des structures. Il s'agit de savoir comment les divers domaines ont été mis à des altitudes si différentes. Il en sera discuté dans l'interprétation.

### II.2.2.4. La coexistence de structures de directions différentes (fig. 12)

Dans la région étudiée, des structures de direction Est-Ouest (anticlinaux de Sainte-Victoire et des Ubacs) coexistent avec des structures de direction NW-SE (anticlinaux de Vautubière et de Concors).

S'agit-il de directions préexistantes, c'est-à-dire contrôlées par des accidents profonds hérités ? Ce problème sera également discuté dans l'interprétation.

## II.2.3. La Cinématique

### II.2.3.1. La direction de déplacement

A l'échelle de la Provence (Nerthe, Etoile, Sainte-Baume, Puget-Carpiagne), la direction de transport est donnée méridienne (J.P. DURAND, G. GUIEU, 1980 ; C. TEMPIER, 1987).

Dans la région étudiée, l'orientation Est-Ouest à Nord-Ouest Sud-Est des grandes structures suggère une direction de transport plus ou moins perpendiculaire à cette orientation, entre Nord-Sud et Nord-Est Sud-Ouest.

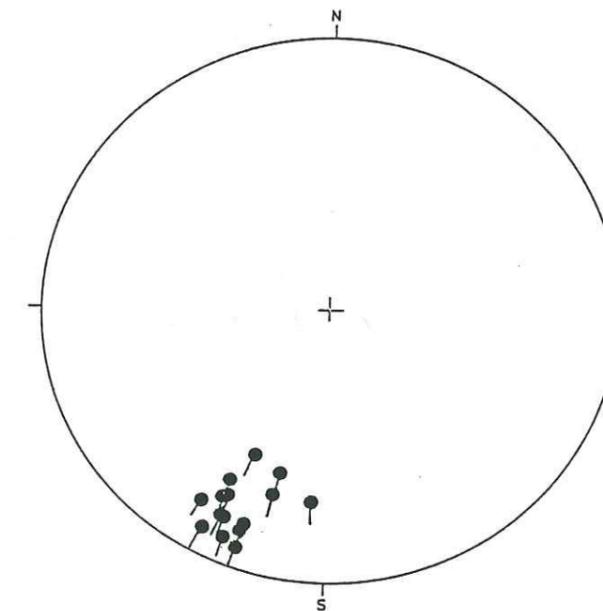


Figure 17a: Stéréogramme des stries mesurées au front de la Sainte-Victoire sur des plans de cisaillements subhorizontaux, (Wulff, hémisphère inférieur).

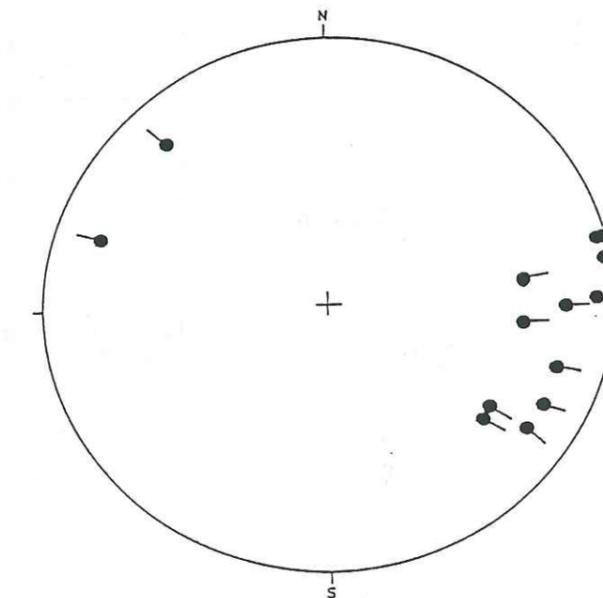


Figure 17b: Stéréogramme des axes des plis d'entraînement mesurés dans le flanc inverse et la terminaison périclinale du pli de la Sainte-Victoire, (Wulff, hémisphère inférieur).

## a- Les microstructures associées aux grandes structures

\* Les stries mesurées au front de la Sainte-Victoire sur des plans de cisaillement subhorizontaux ont une direction moyenne N 25, parallèle à la flexure de la Durance (fig. 17a).

\* La cartographie des plis d'entraînement ne fournit aucun argument irréfutable sur la direction de transport, car leur direction peut être aussi largement imposée par le glissement couche sur couche associé à la formation des grands plis et donc ne traduire que des hétérogénéités locales. Ainsi dans le flanc inverse de l'unité de la Sainte-Victoire et dans la terminaison périclinale du pli (Citadelle, Nord du Pic des Mouches), la direction des axes varie entre N 80 et N 130 avec un faible plongement axial (fig. 17 b).

## b- Le contexte régional

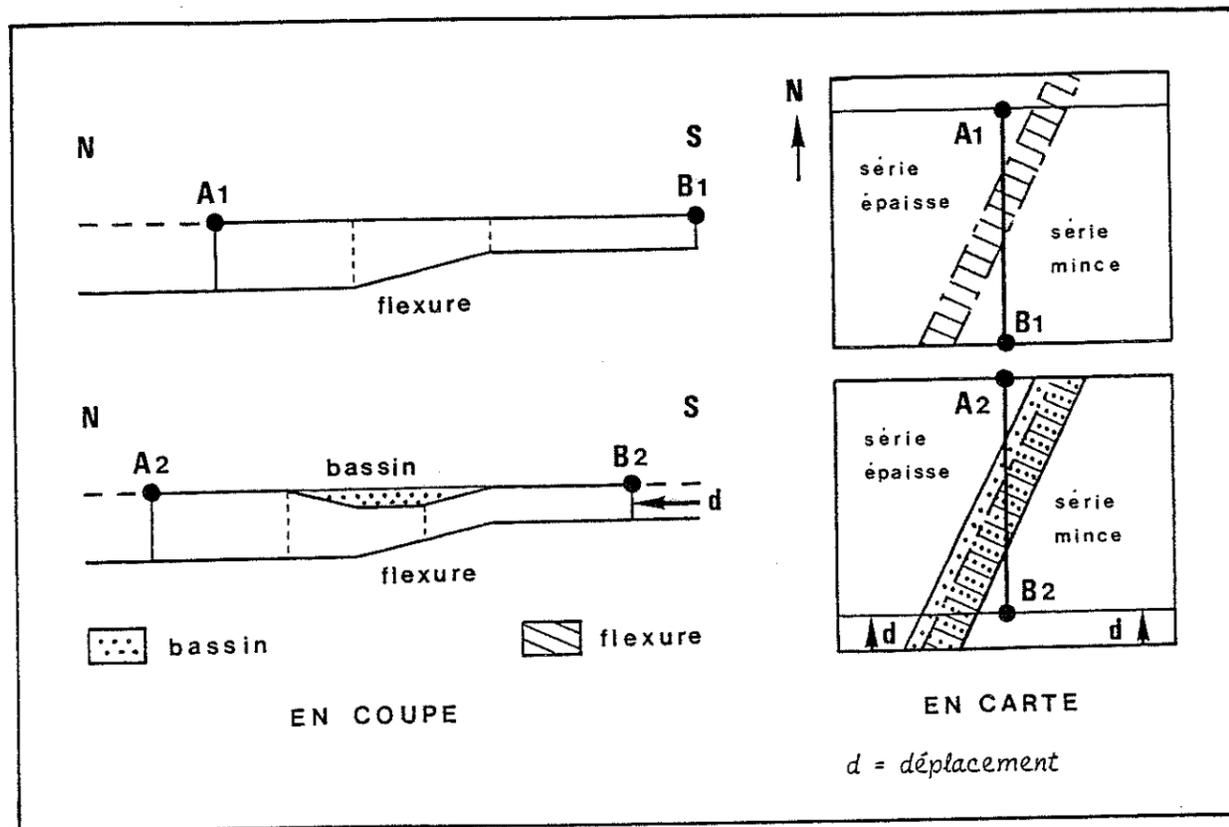


Figure 18 : Le passage, selon une direction Nord-Sud, d'une série mince sur la flexure de la Durance devrait logiquement créer un bassin (non observé) parallèle à cette flexure.

La faille d'Aix-Meyreuil, dans le prolongement de l'accident durancien de direction N 30, représente une zone flexurée et faillée qui coupe en deux le bassin de l'Arc. Cet accident contrôle une importante différence de la profondeur du socle : faible profondeur à l'Est, grande profondeur à l'Ouest (cf. II. données sismiques). L'analyse microtectonique conduite dans la vallée de la Durance montre le caractère décrochant senestre de ce accident majeur (COMBES, 1984).

Dans l'hypothèse d'un déplacement méridien, oblique à cette flexure, le passage de la couverture mince sur cette flexure aurait dû logiquement créer un bassin parallèle à la discontinuité (fig. 18). L'absence de ce bassin nous conduit à penser que la direction de transport est plutôt parallèle à cette flexure c'est-à-dire N 30, comme semblent l'indiquer les marques de déformations précédemment citées.

## II. 2.3.2. La continuité des déformations

Les déformations pourraient être continues, à l'échelle de la Provence, depuis le Crétacé moyen jusqu'à l'Eocène et migrer vers le Nord. Les dépôts syntectoniques sont, en effet, plus jeunes vers le Nord (C. TEMPIER, communication orale, mai 1988).

Les structures anticlinales : pli de Sainte-Victoire, des Ubacs et de la Vautubière, sont érodées au cours de la déformation. Du début à la fin de la déformation, cette érosion a-t-elle pu modifier le comportement de la structure (en particulier à partir de l'érosion de la carapace de Jurassique supérieur) ? Cet effet est difficile à prendre en compte sans données précises sur le rapport entre la vitesse de montée liée aux chevauchements et la vitesse d'érosion.

## II.2.3.3. Le relais des chevauchements à vergence opposée (fig. 12)

Une caractéristique importante des structures de la région est leur rapide amortissement latéral et le relais dans l'espace des chevauchements à vergence opposée. Quand les chevauchements à vergence Sud disparaissent à l'Est, les chevauchements à vergence Nord se développent. Si l'on considère un déplacement imposé aux limites Sud variant peu ou de manière régulière (déplacement rigide du bassin de l'Arc vers le Nord), le développement des structures à vergence différente est tel que l'on est obligé d'envisager - au moins en partie - qu'ils ont fonctionné de façon synchrone. Dans le cas contraire, il faudrait imaginer deux importantes rotations successives et de sens opposé du bassin de l'Arc. Ce qui est très peu probable.

### III. LES DONNEES SISMIQUES

Comme il a été noté dans l'introduction, l'interprétation de la géométrie des structures par la technique des coupes équilibrées n'est plausible et raisonnable que si elle s'appuie sur une bonne connaissance du niveau de décollement. Le Trias, composé pour l'essentiel de sel et d'anhydrite, est un plan de glissement très favorable en Provence. D'où l'importance d'obtenir des informations sur l'interface Trias-socle.

La carte synthétique de la profondeur du socle antétriasique (Ménard, 1980) concerne l'ensemble du Sud-Est. Elle est donc trop imprécise à l'échelle de notre étude. Dans la région de la Sainte-Victoire, la position du socle est mal connue. Les informations qui existent se concentrent pour l'essentiel à l'Ouest de la zone qui nous intéresse et il s'agit d'expériences de sismique pétrolière, relativement anciennes (1967, 1968), difficiles à interpréter.

L'acquisition de données de subsurface s'imposait d'autant plus que des coupes géologiques préliminaires impliquaient des différences notables de profondeur de la surface du socle prétriasique entre le Nord et le Sud de la Sainte-Victoire. Il était donc important de mettre en oeuvre un dispositif de sismique expérimentale capable de préciser sa géométrie.

#### III.1. Méthodologie de la sismologie expérimentale

La sismologie expérimentale enregistre l'onde de choc produite par des explosions provoquées. Elle permet de connaître la position des réflecteurs principaux de la croûte. Dans la région, il peut s'agir des niveaux très compétents du Jurassique supérieur et du toit du socle.

Pour limiter le coût des expériences, notamment le coût des explosifs, on a utilisé les tirs d'exploitation des carrières environnantes.

Successivement vont être abordées les difficultés liées aux enregistrements des tirs de carrière, la méthode d'enregistrement, le dépouillement des résultats et enfin la méthode d'interprétation utilisée.

### III.1.1. Les problèmes liés aux enregistrements des tirs de carrières et aux conditions locales

Les problèmes inhérents aux enregistrements des tirs d'exploitations peuvent être résumés comme suit :

- le dispositif expérimental est imposé dans une certaine mesure. La position des carrières existantes n'est pas nécessairement la meilleure, compte tenu de l'objectif visé.
- les exploitations installées en Provence dans des régions habitées emploient, pour des raisons de sécurité évidente, des charges unitaires souvent faibles. Pour des stations installées jusqu'à 25-30 km du point de tir l'énergie rayonnée a été forte, eu égard à la faiblesse des charges.
- le nombre de géophones disponibles était limité à cinq. Sur chaque profil deux explosions différentes de la même carrière ont été enregistrées. Il aurait été préférable d'utiliser une seule explosion avec un nombre plus élevé de stations pour enregistrer la même onde de choc. Mais l'expérience a montré qu'une corrélation des diverses arrivées restait possible malgré la multiplicité des enregistrements.
- les heures de tir sont établies en fonction des nécessités de l'exploitation, elles n'ont donc pu être fixées pour prendre en compte les difficultés inhérentes à la topographie des lieux, à la mise en place des dispositifs ainsi qu'à une très bonne qualité des réceptions radio. Un certain nombre d'enregistrements ont ainsi été périlleux ou perdus.
- il fallait déjouer l'imprévisible météorologie du Sud-Est de la France et les caprices du mistral. Cela n'a pas toujours été possible (disponibilité du matériel et des personnes). Cinq profils sont relativement bruités par un mistral intempestif.

En toute rigueur, il faut admettre que les données obtenues ne sont pas d'excellente qualité. Mais les résultats se sont avérés suffisants par rapport à l'objectif fixé de reconnaissance de l'interface socle-couverture.

### III.1.2. La méthode d'enregistrement

#### \* Le choix des emplacements des stations

Une reconnaissance préliminaire est préférable pour déterminer les emplacements possibles des stations d'enregistrement. Ces emplacements doivent réunir les meilleures conditions de site et d'accessibilité.

Les conditions d'un site de bonne qualité sont simples. Le rapport signal/bruit doit être élevé : il est préférable d'installer le sismographe sur la roche en place pour limiter les pertes d'énergie, éloigné de toute source de bruit. La réception des signaux horaires doit être parfaite. La position des sites est repérée sur des cartes au 1/25 000. Une précision de 20 à 100 m sur les distances calculées est obtenue.

#### \* Les stations d'enregistrement utilisées

Nous disposons de cinq stations identiques, utilisées le plus fréquemment pour des expériences de sismotectonique (D. Hatzfeld). L'emploi d'appareils semblables nous permet de limiter d'éventuelles difficultés dans le dépouillement des enregistrements. Les documents obtenus sont homogènes.

Le capteur est un géophone à trois composantes (verticale Z, longitudinale L, transversale T). Les signaux obtenus sont transmis par câble à un système d'amplification et sont enregistrés sur bande magnétique analogique.

On doit enregistrer parallèlement l'explosion et le temps. Les signaux de temps (ou signaux horaires) sont transmis pour l'Europe par les émissions permanentes de la station Genève - Prangins HBG sur 75 KHZ. La précision de l'heure de tir est obtenue au centième de seconde près.

La détermination de l'heure de l'explosion a été assurée par une station noir de fumée placée le plus près possible du point de tir. La précision sur l'heure de l'explosion est de l'ordre de quelques centièmes de seconde. D'autre part, nous avons eu avec ce système pour les deux premiers enregistrements des problèmes de précision sur le temps initial (mauvais fonctionnement de l'appareil). Cela nous a amenés ultérieurement à doubler l'enregistrement de ce temps (deux stations).

Les deux dispositifs d'enregistrement possibles sur les terrains sont soit des profils en ligne : stations alignées avec le point de tir, soit des profils en éventail : station à une distance constante du point de tir. Ici, on utilise que le dispositif classique des profils en ligne.

### III.1.3. Le dépouillement des enregistrements et la corrélation des phases

Le traitement des données s'est effectué à l'I.R.I.G.M. grâce aux nombreux logiciels mis au point par F. Thouvenot.

Le dépouillement des enregistrements a deux objectifs : la détermination, avec la plus grande précision possible, de l'heure de la première arrivée d'ondes à chaque station et la détermination du temps d'arrivée des phases qui apparaissent avec le plus de netteté dans l'enregistrement. La qualité des enregistrements peut être améliorée par l'utilisation de filtres.

Pour chaque profil, on a réalisé un graphique des temps de propagation en fonction de la distance des stations au point de l'explosion (assemblage des traces). En ordonnée, au lieu de porter un temps de propagation  $T$ , on a adopté un temps réduit  $tr$  pour faciliter la lecture des graphiques et obtenir une précision plus grande dans l'identification des phases. Le temps réduit  $tr$  est égal à

$$tr = T - \Delta / Vr$$

$tr$  = temps réduit

$T$  = temps de propagation

$\Delta$  = distance horizontale du point de l'explosion à la station

$Vr$  = vitesse de réduction

On peut ainsi suivre plus facilement les phases d'une station à l'autre (corrélation des phases).

Les résultats obtenus sont fonction de la corrélation adoptée et des hypothèses choisies pour les calculs. La corrélation est donc un premier élément de l'interprétation très important. Deux règles de travail très simples ont été adoptées :

- sur chaque enregistrement, on a pointé dans un premier temps toutes les phases plus ou moins bien marquées. Les phases ont toujours été pointées et comparées sur les trois composantes brutes et/ou filtrées du mouvement. En effet, il est possible qu'une arrivée d'énergie soit bien nette sur une seule des trois composantes ou apparaissent mieux grâce à un certain filtrage (fig. 19, fig. 20). Dans un deuxième temps, seules les phases claires ont été conservées (impetus net ou grande amplitude).

- on a corrélé les ondes ainsi retenues qui s'inscrivaient de façon identique (période, amplitude) sur plusieurs stations. On s'est refusé à établir des corrélations incertaines.

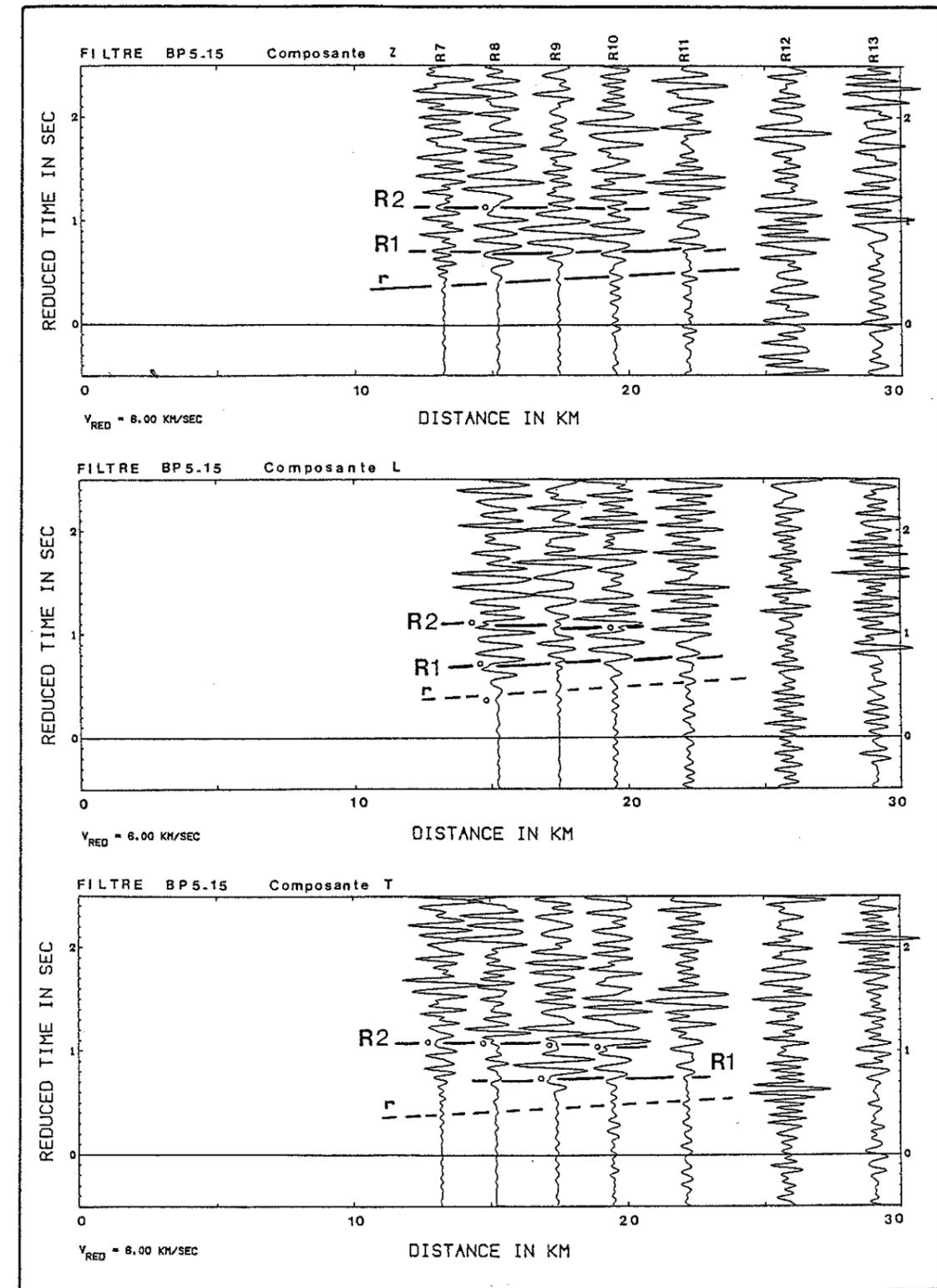


Figure 19 : Pointés et corrélations des différentes arrivées d'énergie sur les 3 composantes filtrées du mouvement. La même phase apparaît plus ou moins nettement sur chaque composante. Un début très net noté par le symbole o.

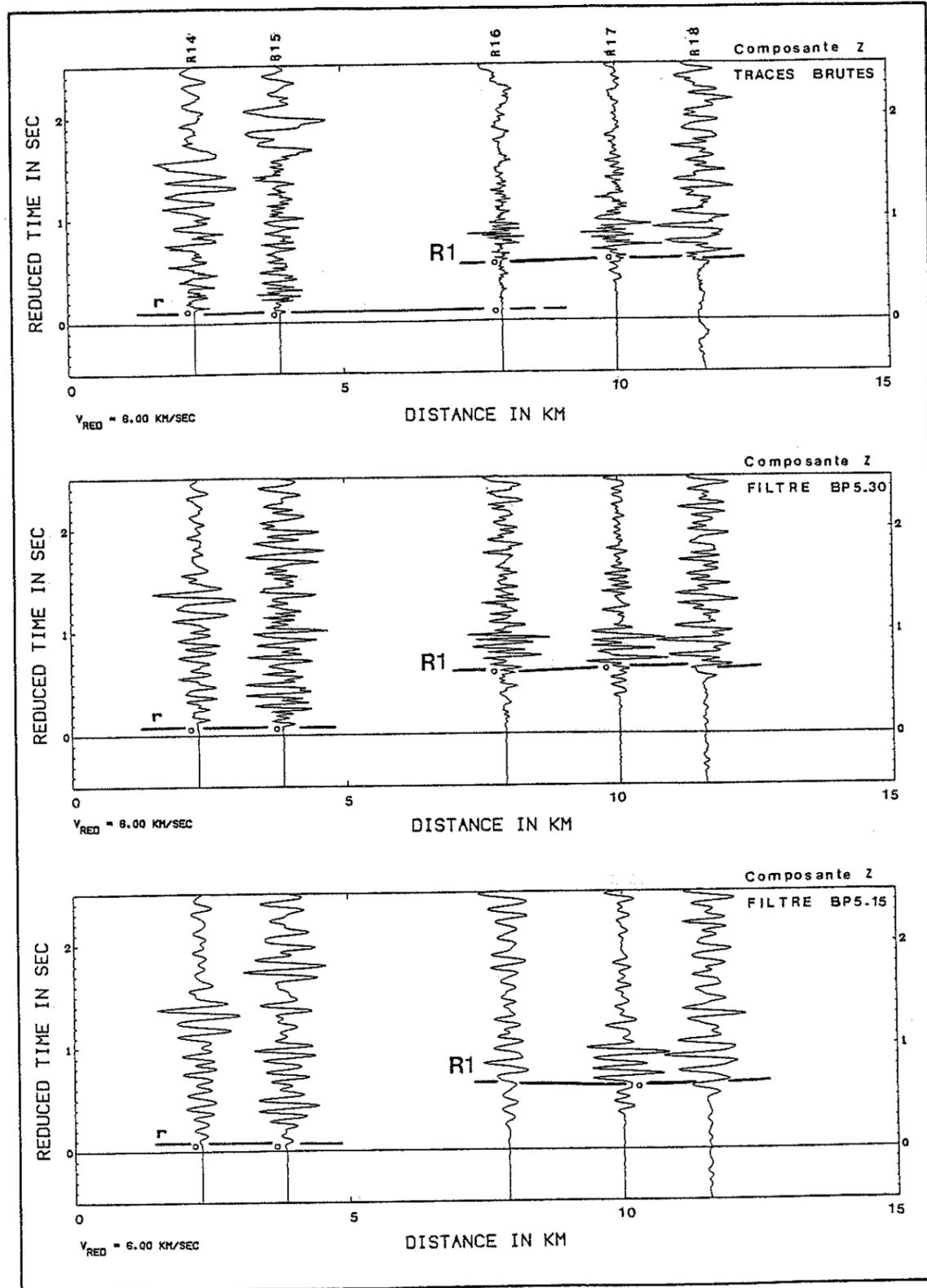


Figure 20 : Pointés et corrélations de différentes arrivées d'énergie sur la même composante du mouvement en utilisant la trace brute et les traces filtrées. Un début très net est noté par le symbole o.

### III.1.4. L'interprétation : calcul de modèles simples

Les possibilités de réfraction et de réflexion sont examinées dans un cas particulier d'application des formules générales empruntées à R. Adachi pour la réfraction et à R.P. Meyer pour la réflexion. On suppose l'existence d'une seule couche à vitesse constante (PERRIER, 1973).

Nous avons utilisé pour les calculs les ondes directes, réfractées et réfléchies des ondes P sur les enregistrements (fig. 21). Les ondes S rarement nettes sur les enregistrements effectués n'ont pas été pointées.

L'onde est supposée se propager dans le plan vertical qui passe par le point d'explosion E et par la station d'enregistrement S.

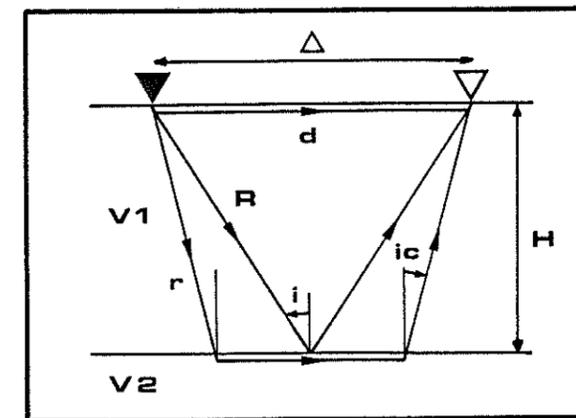


Figure 21 : modèle à une couche

$H$  = épaisseur de la couche  
 $\nabla$  = point d'explosion  
 $\nabla$  = station d'enregistrement  
 $\Delta$  = distance du point de l'explosion à la station  
 $V_1, V_2$  = vitesse de propagation des ondes dans les couches 1 et 2  
 $d$  = trajet de l'onde directe  
 $R$  = trajet de l'onde réfléchie  
 $r$  = trajet de l'onde réfractée  
 $i$  = angle d'incidence

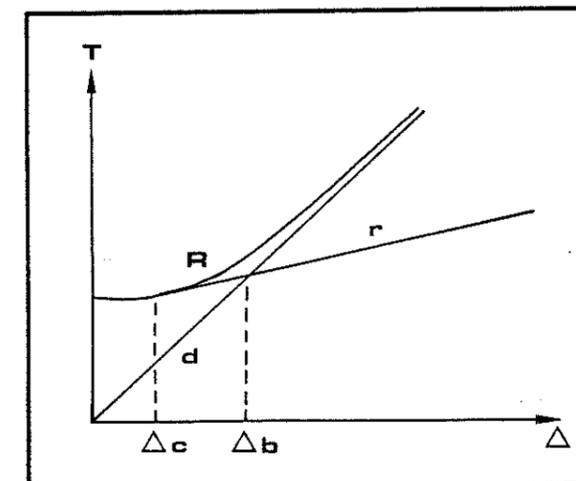


Figure 22 : Courbe temps de propagation en fonction de la distance (hodochrone) du modèle précédent (figure 21).

$T$  = temps de propagation  
 $\Delta c$  = distance critique, apparition de l'onde réfractée  
 $\Delta b$  = distance au point de brisure (onde réfractée en première arrivée)

### III.1.4.1. L'interprétation des premières arrivées : directes et réfractées

\* Les ondes directes nous permettent de calculer la vitesse de propagation des ondes dans les couches de surface par la relation évidente (Fig. 21) :  $T = \Delta/V_1$

\* Les ondes réfractées nous permettent de connaître la vitesse de la couche au toit de laquelle se produit la réfraction.

Dans le cas d'une seule couche horizontale en réfraction (Fig. 21), on a la relation suivante :

$$T = \frac{2H \cos ic}{V_1} + \frac{\Delta}{V_2} \quad \text{avec } \sin ic = \frac{V_1}{V_2}$$

Il faut remarquer que la vitesse obtenue n'est qu'une vitesse apparente qui est égale à la vitesse vraie dans le cas d'une couche horizontale.

Si la couche est pentée, la vitesse vraie s'obtient par la technique du profil inverse. Une explosion et un enregistrement nous donne une vitesse apparente  $V_a$  égale à (fig. 23) :

$$V_a = V_1 / \sin(ic - \theta) > V_2 \quad \text{avec } \sin ic = V_1 / V_2$$

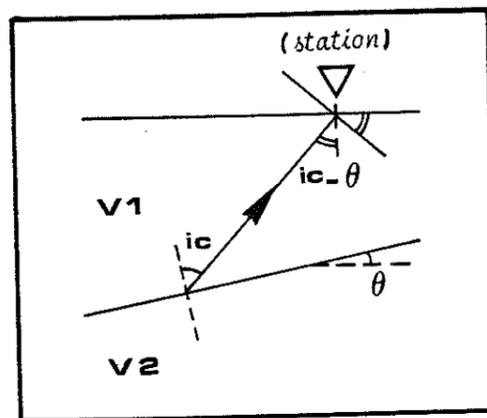


Figure 23 : Cas d'une couche pentée, d'après Perrier (1973).

$ic$  = angle d'incidence critique

$\theta$  = pendage du réfracteur

Une explosion et un enregistrement dans la direction opposée nous fournit une nouvelle vitesse  $V_a'$ , qui est :

$$V_a' = V_1 / \sin(ic + \sigma) < V_2$$

La vitesse vraie  $V_2$  est alors donnée (dans le cas de faibles pendages) par la formule approchée :

$$V_2 = \frac{2 V_a V_a'}{V_a + V_a'}$$

### III.1.4.2. L'interprétation des arrivées tardives : les réfléchies

L'interprétation utilise les temps d'arrivées tardives qui apparaissent assez nettement dans l'enregistrement. Il s'agit en général d'ondes réfléchies sur une discontinuité.

\* La méthode des  $T^2, \Delta^2$ .

On envisage comme précédemment le cas le plus simple d'une seule couche horizontale à vitesse constante (fig. 21). Les formules de réflexion nous donnent (fig. 24) :

$$T^2 = \frac{\Delta^2 + 4H^2}{V_1^2}$$

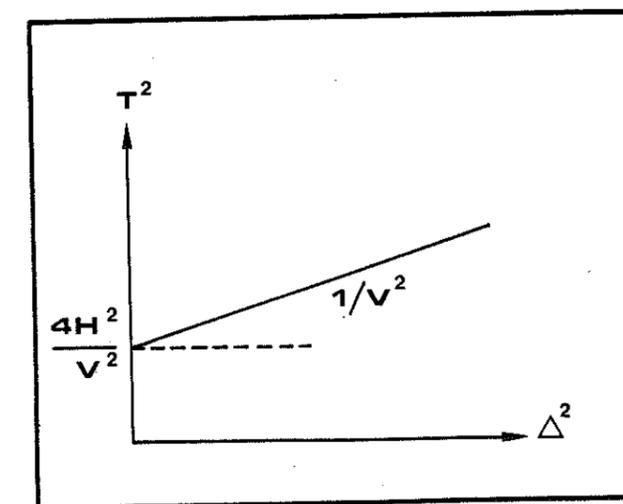


Figure 24 : La méthode des  $T^2, \Delta^2$ .  
Report des données dans les axes  $(T^2, \Delta^2)$ .

La pente de la droite  $(1/V_1^2)$  permet le calcul de la vitesse  $V_1$  du milieu traversé. Il faut noter que la vitesse obtenue est une vitesse moyenne dans le cas de couches multiples. Cette méthode est imprécise à grandes distances.

Si le calcul nous conduit à des variations de profondeur trop importantes de la surface réfléchissante, cela signifie que cette surface n'est pas horizontale. On recourt dès lors à la méthode des ellipses.

\* La méthode des ellipses

Cette méthode permet de prendre en compte l'existence d'un réflecteur penté (fig. 25). On suppose connue la vitesse  $V$ , pour une donnée de propagation  $T$ , on a :

$$EI + IS = VT = \text{constante}$$

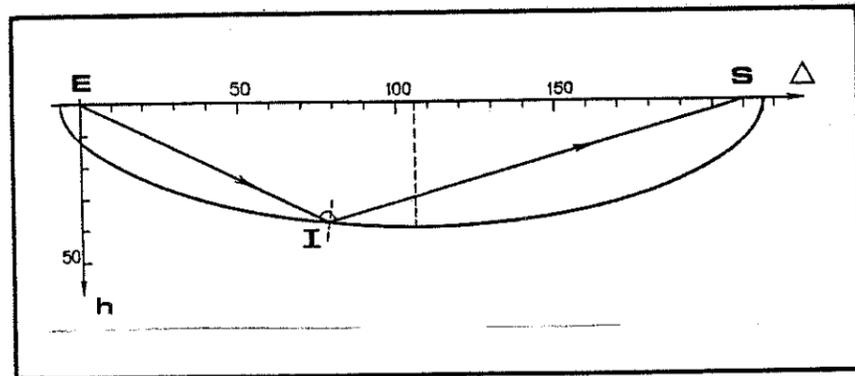


Figure 25 : Variation de  $h$  en fonction de  $\Delta$ .

$h$  = profondeur

$\Delta$  = distance horizontale

La surface de discontinuité est l'enveloppe des ellipses tracées pour tous les couples  $(\Delta, T)$  du profil.

### III.1.4.3. Corrections d'altitude et de surface

Dans le cadre de cette étude, aucune correction d'altitude n'a été entreprise. Les dénivellées existant d'une part entre le point de tir et l'altitude moyenne des stations, d'autre part entre chaque station sont peu importantes (rarement supérieures à 350 m).

Les vitesses de surface sont trop mal connues pour procéder à des corrections rigoureuses. On peut s'attendre à des "anomalies" possibles dans les temps d'arrivée de l'ordre de quelques centièmes de seconde. Cela correspond à la limite extrême de notre précision sur les temps d'arrivée.

### III.1.4.4. Conclusions

Les calculs des modèles ont été limités aux seuls cas où les corrélations paraissaient suffisamment nettes pour tenter une explication.

On aurait pu envisager le cas de couches multiples ou l'existence de gradient de vitesse. Mais les modèles simples évoqués plus haut se sont avérés satisfaisants pour l'étude présente. Ils nous ont donné des résultats cohérents.

## III.2. Synthèse des données existantes : la sismique pétrolière

### III.2.1. Les études de sismique réflexion en Provence

Des campagnes de sismique réflexion ont été réalisées sur les permis de Pertuis (Pertuis - Manosque) et Durance (Eguilles - Lambesc) en 1967 et 1968 (document Elf - ERAP : R. REYNAUD, A.F. BAUDRIMONT).

On s'est intéressé au seul "marqueur socle" qui a pu être suivi avec plus ou moins de difficultés sur les différents profils. Au point de vue quantitatif, il faut se contenter d'un ordre de grandeur. Au point de vue qualitatif, une image structurale profonde a pu être dégagée de cette étude qui conduit à définir deux zones homogènes séparées par une discontinuité majeure. Cette discontinuité correspond à un passage très pauvre en réflexion. Il s'agit de la zone faillée (flexure) de la Durance, d'une direction NE-SW au niveau de Mirabeau qui passerait à une direction NS au niveau de Meyrargues (fig. 26). A l'Ouest de cette limite, une carte en isochrones donnant l'enveloppe de l'horizon socle a pu être établie. Elle montre que le socle s'approfondit très rapidement pour atteindre des profondeurs estimées supérieures à 10 kms dans la région d'Eguilles. A l'Est de la zone

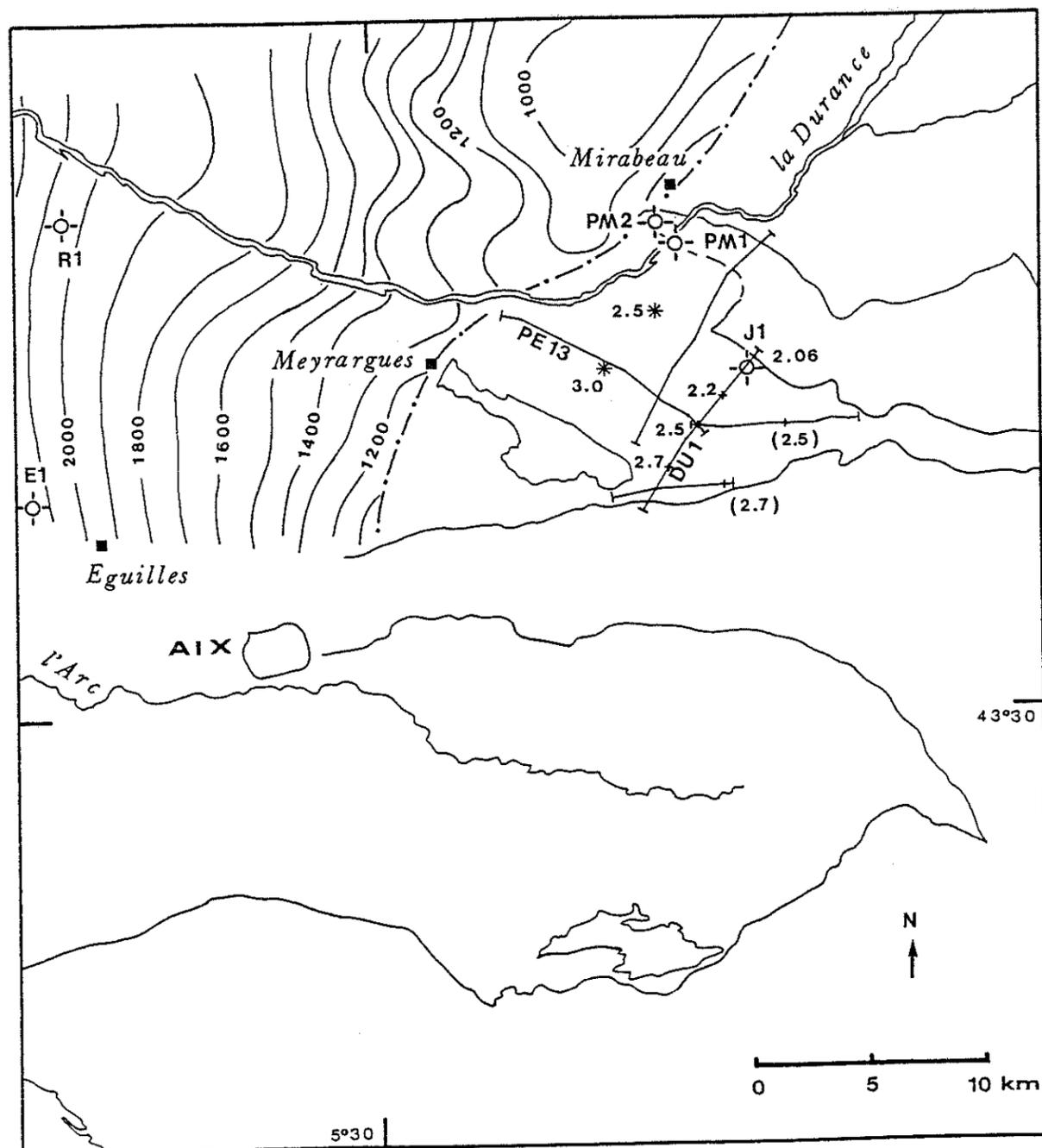


Figure 26 : Carte d'isochrones - Enveloppe de l'horizon socle, d'après un document Elf-ERAP (R. REYNAUD, 1967, 1968).

- / isochrone en temps simples (millisecondes).
- .-.- Limite du marqueur très profond correspondant à la zone de flexure d'Aix.
- ∩ profil sismique réflexion.
- \* réfraction.
- 2.5 profondeur en km.
- (2.7) profondeur en km estimée grâce au profil DU 1.
- sondage.
- ville.

faillée de la Durance, la profondeur moyenne du socle serait nettement moins grande. Deux points obtenus par sismique réfraction nous donnent des profondeurs de 2.5 km et 3.0 km (Fig. 26).

### III.2.2. Le sondage et le sismosondage de Jouques

Le sondage de Jouques réalisé en 1970 nous permet de savoir que la série stratigraphique traversée est normale et continue jusqu'au socle atteint à une cote de 2.46 km (Document Elf - ERAP - ESSO - REP, 1970) (fig. 27). Il nous renseigne sur les termes inférieurs de la série, rarement connus à l'affleurement : le Trias composé des terrains salifères très épais (500 m environ), le socle représenté par des séricito-schistes et des quartzites. Il est important de noter que le passage grès triasique-socle correspond non pas à une discontinuité des propriétés mécaniques, mais à leur changement progressif.

Le sismosondage (document Elf - ERAP : L. Prion, 1970) nous fournit des informations fondamentales pour le reste de l'étude : des vitesses par étage et une vitesse moyenne calculée pour chaque limite stratigraphique (Fig. 27). Il faut remarquer la vitesse élevée du Jurassique supérieur (Portlandien) : 6.2 km/s, vitesse qui caractérise classiquement la croûte moyenne. Un autre chiffre à retenir : 5.2 km/s, vitesse moyenne de l'ensemble de la série sédimentaire.

Le passage très progressif des grès du Trias au socle métamorphique et la vitesse très élevée du Jurassique supérieur peut poser des difficultés pour l'identification des réflexions sur le socle. Néanmoins, l'existence de couches lentes dans le Trias permet d'envisager la possibilité de réflexions au sein du Trias, voisine du toit du socle.

Grâce à ces nouvelles données, le profil sismique de direction NE-SW passant par Jouques (DU 1) a pu être réinterprété (Fig. 28, document Elf - ERAP : Galy, 1970). On observe ainsi que le socle présente une légère pente vers le SW : 2.06 km de profondeur dans le sondage, 2.5 km de profondeur à 4 km. Un profil sismique (PE13, fig. 26), qui a un point commun avec le profil réinterprété, montre un ensemble de miroirs susceptibles de correspondre au socle. Ces réflecteurs s'approfondissent fortement vers le NW.

GEOLOGIE		Z Sous sol	V moy.	V étage		
CRETACE	SUP	ROGNACIEN	0	(2000)		
			16	(2890)		
	INF	Début sonic		35	(4630)	
				295	(4800)	
	NEOCOMIEN	BERRIASIEN		418	(4805)	
				455		
	LIRIEN	SUP		455	6220	
				846		
		M	SEOUANIEN		968	5950
			RAURACIEN		1136	5960 5665
ARGOVIEN				1243	5000	
L		OXFORDIEN		1243	3860	
				1316	4380 4210	
M		CALLOVIEN		1487	5120	
				1541,5	4430	
A		DOGGER		1695,5	5880	
			1708	5680 5710		
S	SUPERIEUR ET MOYEN		1708	5720		
			1755,5			
L	HETTANGIEN		1876	6410		
			1887	5240		
I	RHE TIEN		1887	5240		
			1985,5	5500		
A	ARRÊT SONIC		1985,5	4750 (5010)		
			2333	5860		
S	SOCLE		2404,5	5185		
			2446	5190 (4500)		
			2455	(5185)		
			2468,5	(5000) DERG/cc		

**BASSIN DU SUD-EST**  
 SOCIETE : ERAP  
 SONDAGE : JOUQUES 1

**COORDONNEES**  
 X : 870 910  
 Y : 153 750  
 Z<sub>tr</sub> : 400,15 m Z<sub>sol</sub> : 395 m  
 Origine des temps : SOL

SS	CVL	SONIC	LAC
x		x	

calé

Figure 27 : Sismosondage de Jouques mesures de vitesses.

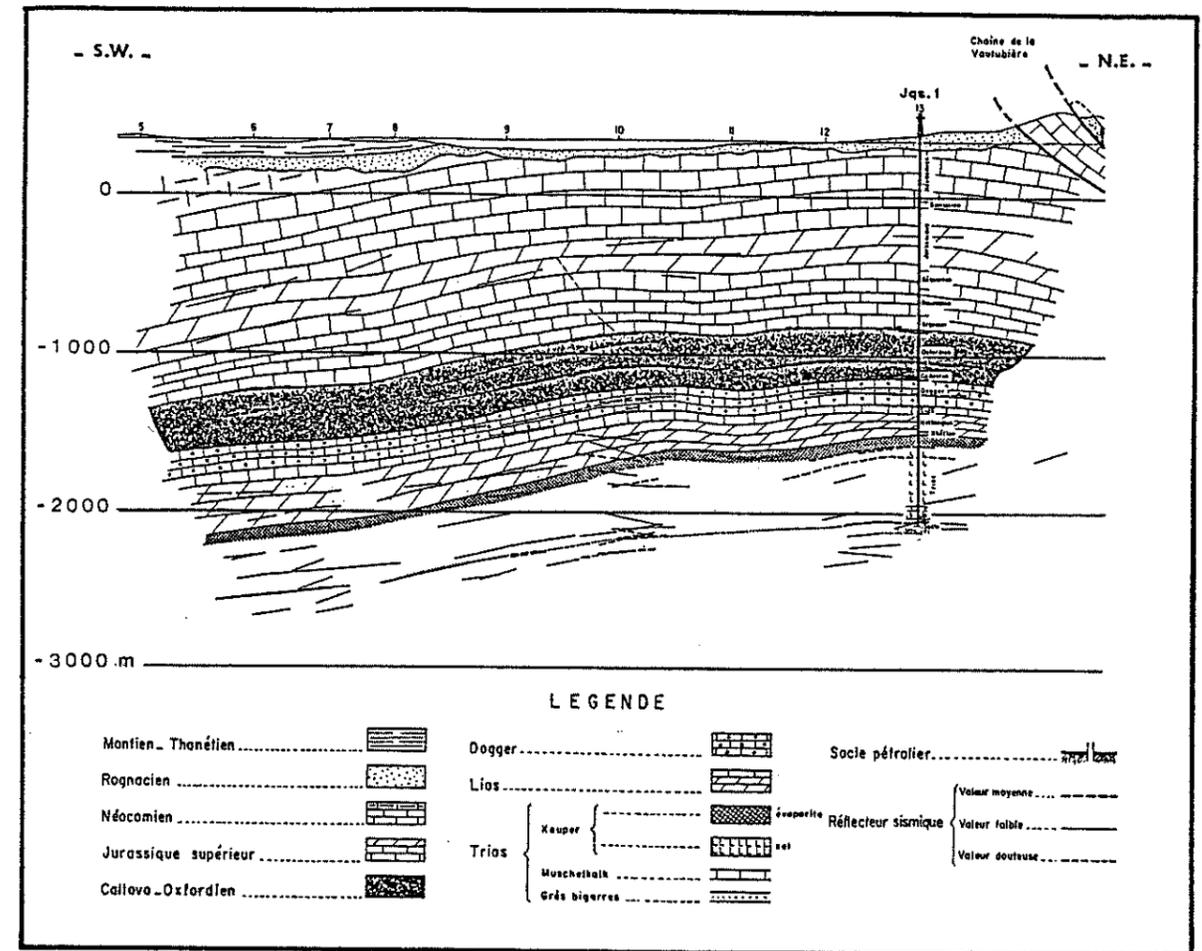


Figure 28 : Coupe suivant le profil sismique DU 1 (situé sur la figure 26), d'après GALY (document Elf-ERAP, 1970).

**III.3. Etude de la position de la surface du socle dans la région du bassin de l'Arc-montagne-Vautubière par des profils sismiques longitudinaux**

Le champ d'application de la sismologie expérimentale et les limites de la méthode par enregistrements des tirs de carrière sont donnés plus haut. Ils étaient destinés à déterminer la loi de vitesse entre la surface et le socle et à connaître sa profondeur.

### III.3.1. Expérience de terrain

Neuf profils longitudinaux (Fig. 29) ont été enregistrés avec trois points de tir : deux au Sud de la Sainte-Victoire proprement dite, un au Nord.

La carrière septentrionale est la carrière de Réclavier, située au Sud de Meyrargues. Elle exploite des séries calcaréo-marneuses du Berriasien-Valanginien. Les charges unitaires adoptées ne sont jamais supérieures à 100 kg. Mais l'énergie rayonnée par le point de tir a été forte. Elle a permis l'établissement de quatre profils (L1 à L4). Le profil L1 (30 km), de direction EW, passe par le sondage de Jouques. Il nous servira de profil de référence. Il traverse dans sa première partie les terrains crétacés du bassin de Concors. Les stations du profil L2 (30 km) de direction NW - SE, étaient toutes installées sur le Jurassique supérieur qui s'étend de la Sainte Victoire à Saint-Maximin. Les profils en ligne L3 et L4 sont courts : 15 km. Ils sont orientés N-S perpendiculairement à la structure anticlinale principale. Ils recoupent la totalité de la série du Lias au Néocomien.

Les exploitations méridionales sont la carrière de la Malespine et la carrière de Bouc-Bel-Air. La Malespine est au SE d'Aix-en-Provence sur des calcaires et des argiles bégudiennes. Les profils L5 et L6, de petite longueur (14 km au maximum), respectivement N-S et NNE-SSW traversent les terrain marneux de la partie septentrionale du bassin de l'Arc et se terminent sur des calcaires jurassiques massifs au Nord. Le profil L5 est l'inverse du profil précédent L4. Il avait pour objectif de déterminer une vitesse vraie. Les tirs effectués sont faibles (100 à 120 kg). La position du point de l'explosion est intéressante par sa proximité avec la zone d'étude. Nous aurions souhaité compléter les enregistrements existants et ajouter un profil. Cela n'a pas été possible : pour des raisons techniques, indépendantes de notre volonté, plusieurs tirs prévus ont dû être annulés.

La carrière de Bouc-Bel-Air est située à 14 km d'Aix-en-Provence. Des charges unitaires de 200 à 280 kg nous laissaient espérer de bons résultats malgré son éloignement. Les profils sont longs : 40 à 45 km, les stations sont placées dans les 20 derniers kilomètres. Les premières stations du profil L7, orienté NE-SW sont sur les formations calcaréo-marneuses du Crétacé inférieur, les plus lointaines sur des terrains calcaires Jurassique et Crétacé. Les profils NNE-SSW (L8, L9) traversent le massif de la Sainte-Victoire à l'Est. Les stations sont situées pour la grande majorité sur des calcaires massifs.

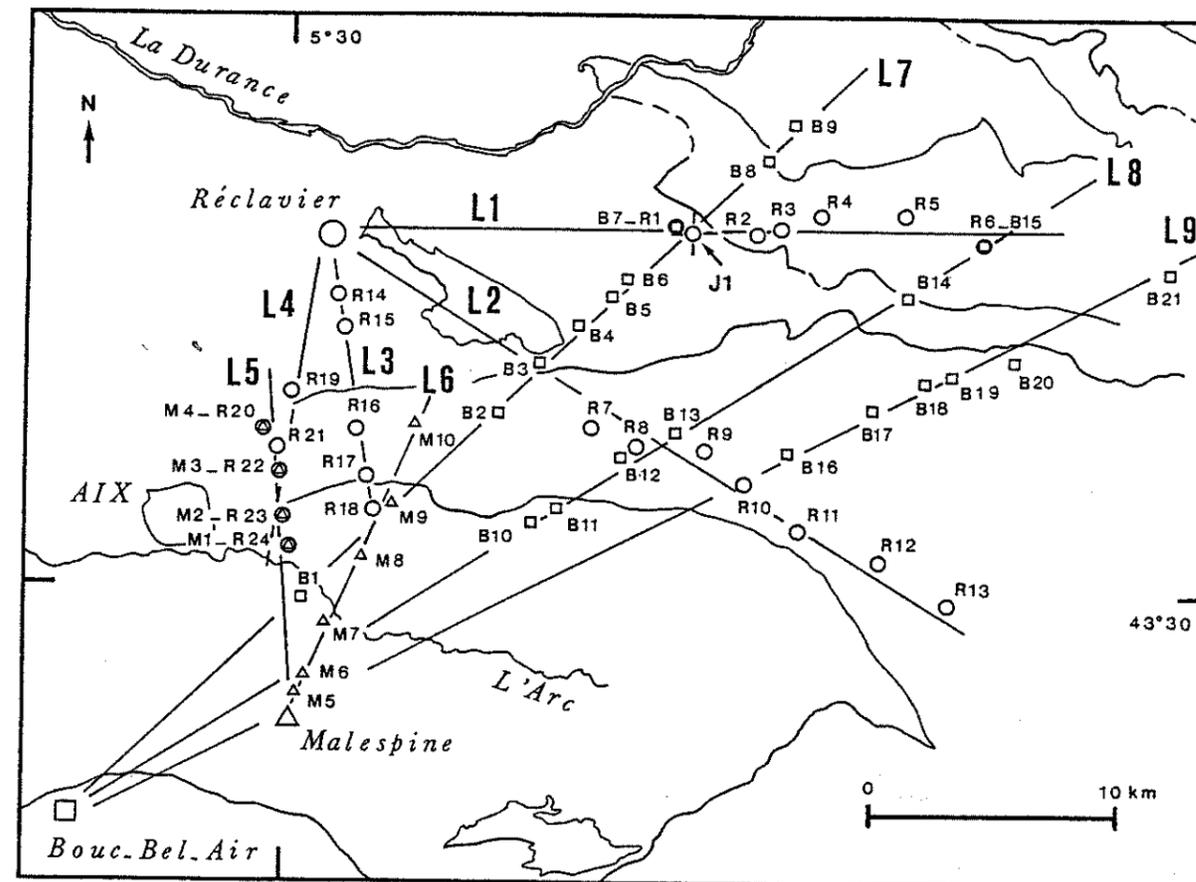


Figure 29 : Carte de situation des profils sismiques dans la région bassin de l'Arc - montagne Vautubière.

○ = sondage de Jouques 1, forage pétrolier ayant atteint le socle.

Localisation des stations sismiques et point de tir associé (les stations sont numérotées de 1 à n par point de tir, la lettre indique le nom du point de tir) :

○ ○ = stations des profils L1 à L4 ayant enregistré les tirs de Réclavier.

△ △ = stations des profils L5 et L6 ayant enregistré les tirs de la Malespine.

□ □ = stations des profils L7 à L9 et point de tir Bouc-Bel-Air.

Les données relatives au point de tir et aux stations d'enregistrement (coordonnées, emplacement géologique) sont résumées dans le tableau ci-après:

N° Station	Lat. N	Lon. E	Alt (m)	Dist. (km)	N° Station	Lat. N	Lon. E	Alt (m)	Dist. (km)
Pt. tir Réclavier	43.6291	5.5192	275		pt. tir Bouc-Bel-Air	43.4134	5.3952	260	
Profil L1					Profil L7				
R1	43.6333	5.6922	360	13.98	B1	43.4964	5.5086	200	13.02
R2	43.6315	5.7297	432	17.00	B2	43.5535	5.5864	355	21.95
R3	43.6339	5.7448	388	18.22	B3	43.5656	5.6046	555	23.94
R4	43.6387	5.7626	320	19.66	B4	43.5822	5.6234	570	26.33
R5	43.6362	5.8048	350	23.07	B5	43.5975	5.6452	385	29.26
R6	43.6290	5.8471	345	26.48	B6	43.6074	5.6603	355	30.41
Profil L2					B7	43.6333	5.6922	260	34.27
R7	43.5594	5.6524	548	13.26	B8	43.6545	5.7383	35	38.58
R8	43.5510	5.6741	600	15.23	B9	43.6704	5.7516	385	40.58
R9	43.5518	5.7071	498	17.44	Profil L8				
R10	43.5395	5.7266	475	19.49	B10	43.5245	5.6185	540	21.89
R11	43.5259	5.7541	463	22.18	B11	43.5311	5.6330	500	23.27
R12	43.5103	5.7938	405	25.83	B12	43.5476	5.6662	690	26.53
R13	43.4956	5.8287	350	29.09	B13	43.5576	5.6895	545	28.71
Profil L3					B14	43.6086	5.8103	405	39.98
R14	43.6087	5.5237	290	02.30	B15	43.6290	5.8471	345	43.71
R15	43.5948	5.5251	320	03.84	Profil L9				
R16	43.5587	5.5325	455	07.90	B16	43.5496	5.7422	462	31.91
R17	43.5400	5.5360	350	09.99	B17	43.5652	5.7918	475	36.26
R18	43.5267	5.5445	290	11.56	B18	43.5755	5.8165	500	38.56
Profil L4					B19	43.5795	5.8302	538	39.75
R19	43.5713	5.5026	375	06.56	B20	43.5858	5.8599	478	42.20
R20	43.5591	5.4886	350	08.16	B21	43.6132	5.9376	355	49.18
R21	43.5498	5.4952	415	09.02					
R22	43.5422	5.4953	310	09.85					
R23	43.5269	5.4978	250	11.49					
R24	43.5156	5.5015	170	12.70					
pt. tir Malespine	43.4535	5.4991	315						
Profil L5									
M1	43.5156	5.5015	170	06.91					
M2	43.5269	5.4978	250	08.16					
M3	43.5422	5.4953	310	09.96					
M4	43.5591	5.4886	350	11.77					
Profil L6									
M5	43.4626	5.5043	285	01.10					
M6	43.4664	5.5071	260	01.57					
M7	43.4869	5.5167	220	03.98					
M8	43.5108	5.5362	210	07.04					
M9	43.5317	5.5482	280	09.56					
M10	43.5610	5.5910	380	14.07					

Tableau 1 : Données concernant le point de tir et les stations des profils sismiques. La localisation des stations est indiquée sur la figure 11. Les stations sont numérotées de 1 à n par point de tir, la lettre fait référence au point de tir.

### III.3.2. Résultats et interprétations

Nous avons noté précédemment l'importance du pointé et de la corrélation des phases qui apparaissent plus ou moins nettement sur les trois composantes du mouvement.

Les profils groupés au Nord et au Sud sont étudiés successivement de L1 à L9. Ils sont accompagnés de coupes géologiques correspondantes préalablement dressées sur lesquelles apparaissent deux informations différentes : les éléments de cartographie incontestables (en trait plein sur le dessin de la coupe) et les éléments qui résultent d'une interprétation géologique (en tireté sur le dessin). Pour chacun sont présentés les assemblages utilisés avec, si cela s'avère nécessaire, un agrandissement des traces et les ellipses, ensemble des points de réflexion possibles pour chaque station.

La vitesse de réduction ( $V_r$ ) utilisée pour les ondes P dans les assemblages de ces enregistrements est de 6.0 km/s. Ils sont réalisés à amplitude constante avec un filtrage BP5-30 Hz ou BP 5-15 Hz. Les ondes directes sont notées d, les ondes réfractées r, les phases réfléchies R1 ou R2 selon qu'il s'agit de la première ou de la deuxième réflexion.

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux où sont indiqués pour chaque station, la distance horizontale  $\Delta$  au point de tir, les durées de propagation des phases relevées : t pour le temps réduit, T pour le temps réel ; t et T sont indicés par d, r, R selon qu'ils correspondent au temps des ondes directes, réfractées ou réfléchies. Pour les ondes directes seuls sont relevés les pointés nets. Le calcul de la pente est réalisé directement sur l'assemblage.

Après la présentation des résultats pour un ensemble de profils, nous discuterons de leurs interprétations.

\* La légende des figures 30 à 45 est la suivante :

- $\ominus$  = sondage de Jouques
- $\blacktriangledown$  = point d'explosion
- $\nabla$  = station d'enregistrement
- $\circ$  = point très net
- d = onde directe
- r = onde réfractée
- R1 = réflexion sur le niveau 1
- R2 = réflexion sur le niveau 2

Attention (!), le zéro des ellipses correspond à l'altitude moyenne point de tir / stations.

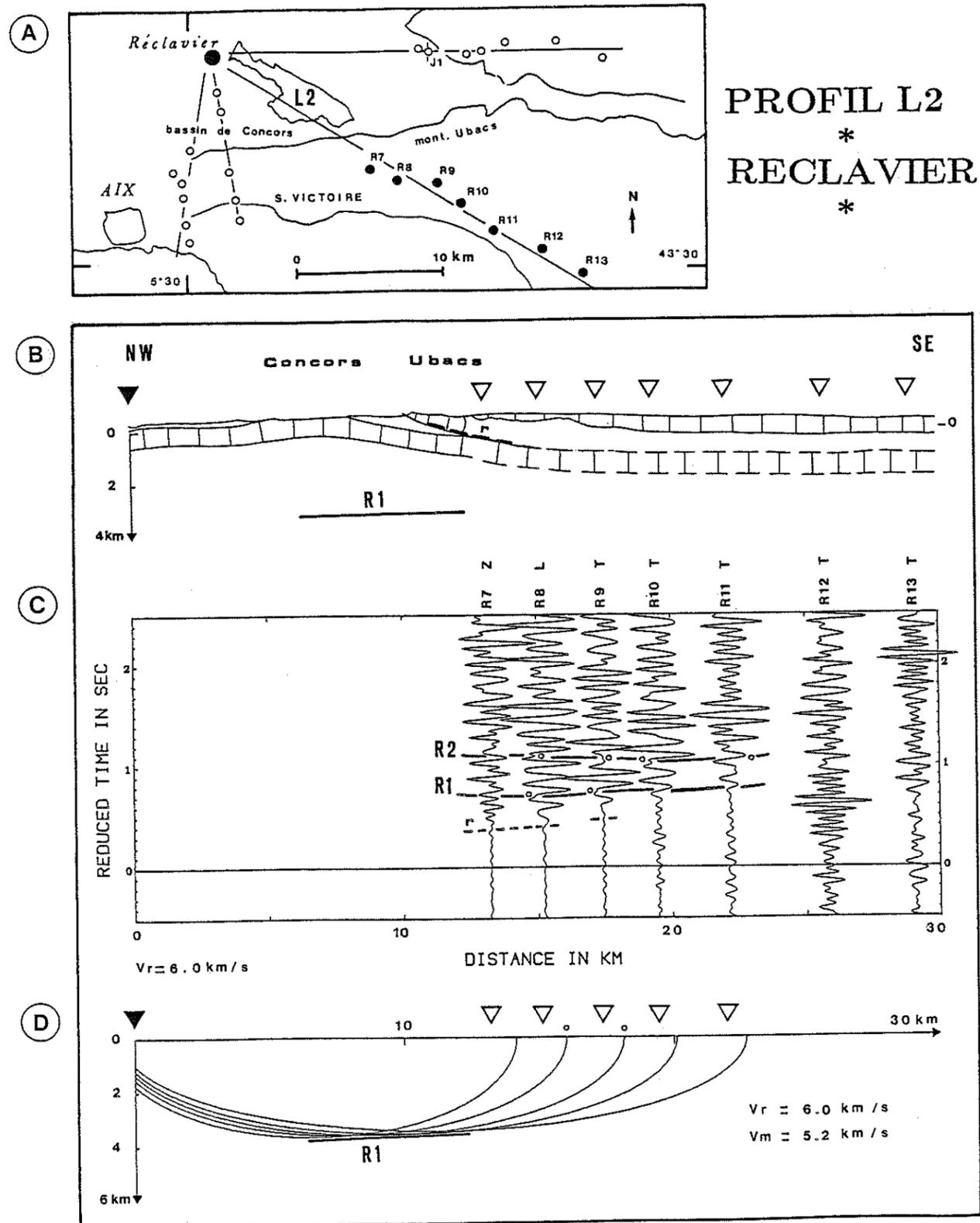


Figure 30 : Profil longitudinal L2.

Fig. 30a : localisation des stations ; Fig. 30b : Coupe géologique le long du profil ;

Fig. 30c : Assemblage des traces ; Fig. 30d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

### III.3.2.1. Les profils au Nord de la Sainte-Victoire (Point de tir : Carrière de Réclavier)

a- Présentation des résultats :

\* Profil L2 :

Il est impossible de pointer avec précision les premières arrivées réfractées (fig. 19, fig. 30, fig. 31). Un problème se pose pour les dernières traces : on n'observe pas de réfraction, mais seulement une réflexion. Ce fait est pour le moins anormal. Mais les profils qui suivent nous montrent que la réfraction est de très faible amplitude, il est donc probable qu'ici elle se perde dans le bruit de fond.

On observe bien deux réflexions : l'une R1 à 0.70 s en temps réduit, l'autre R2 aux alentours de 1.1 s. Les arrivées d'énergie sont corrélées sur 5 traces.

station	$\Delta$	$t_{R1}$	$T_{R1}$	$t_{R2}$	$T_{R2}$
R7	13.26	0.70	2.91	1.10	3.31
R8	15.23	0.70	3.24	1.10	3.64
R9	17.44	0.72	3.63	1.10	4.01
R10	19.49	0.74	3.99	1.05	4.30
R11	22.18	0.77	4.45	1.08	4.78
R12	25.83	-	-	-	-
R13	29.09	-	-	-	-

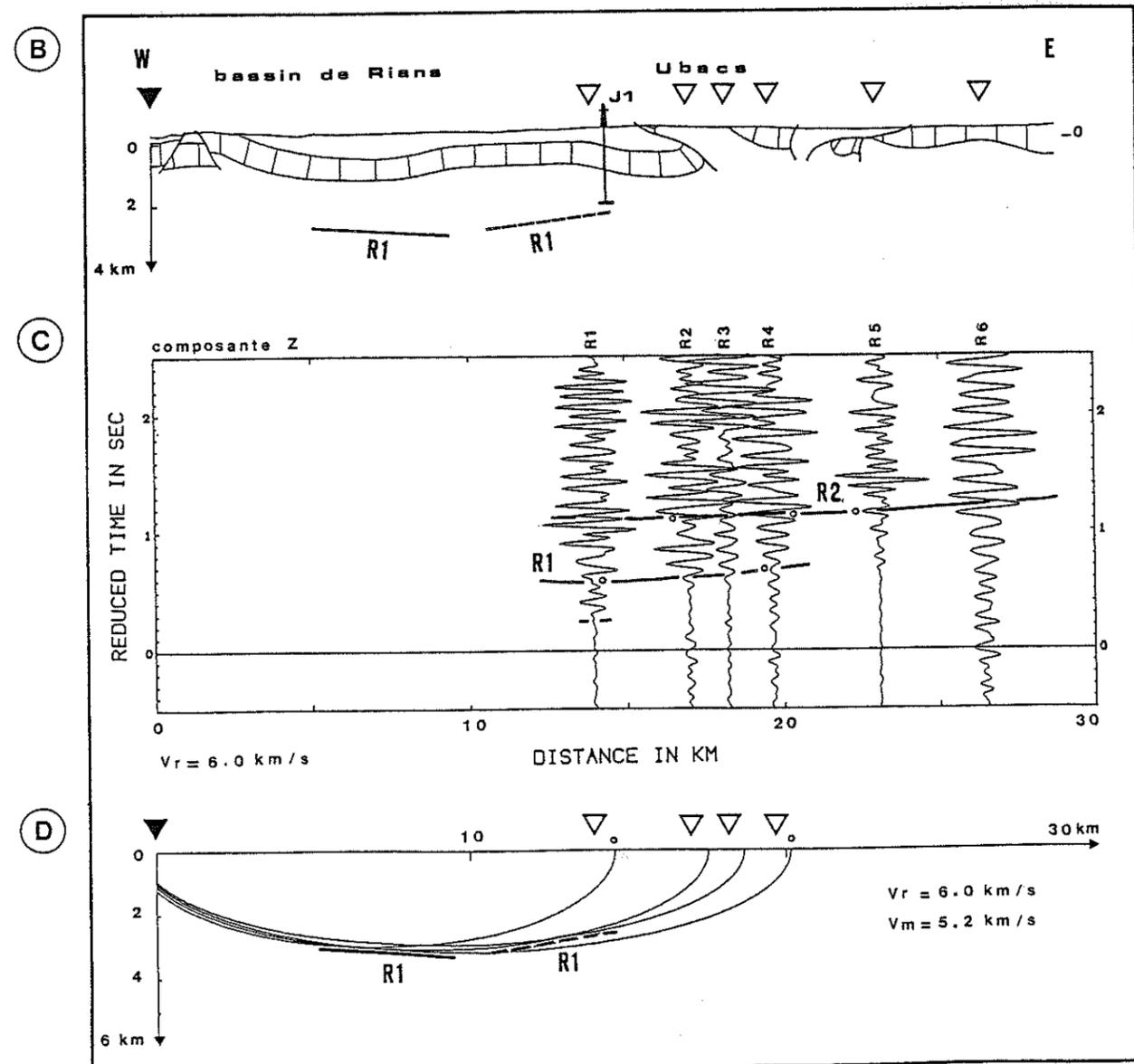
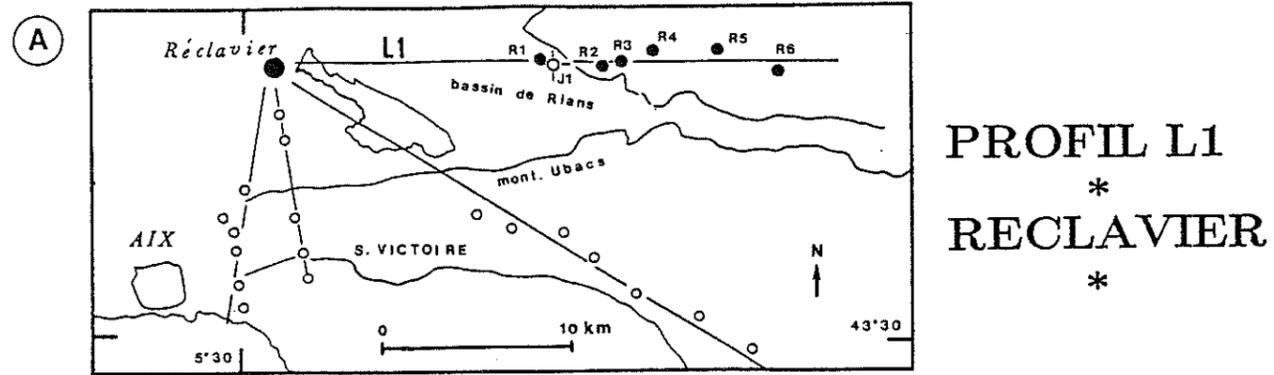


Figure 32 : Profil longitudinal L1.

Fig. 32a : localisation des stations ; Fig. 32b : Coupe géologique le long du profil ;

Fig. 32c : Assemblage des traces ; Fig. 32d : Méthodes des ellipses, réflecteur R1.

\* Profil L1 :

On pointe une phase réfléchie R1 sur la composante Z du mouvement (fig. 32, fig. 33) à 0.65 s en temps réduit et une phase réfléchie R2 entre 1.1 s et 1.2 s .

station	$\Delta$	$t_{R1}$	$T_{R1}$	$t_{R2}$	$T_{R2}$
R1	13.98	0.60	2.93	1.10	3.43
R2	17.00	0.65	3.48	1.12	3.95
R3	18.22	0.65	3.68	1.14	4.18
R4	19.66	0.70	3.97	1.16	4.44
R5	23.07	-	-	1.16	5.00
R6	26.48	-	-	1.21	5.62

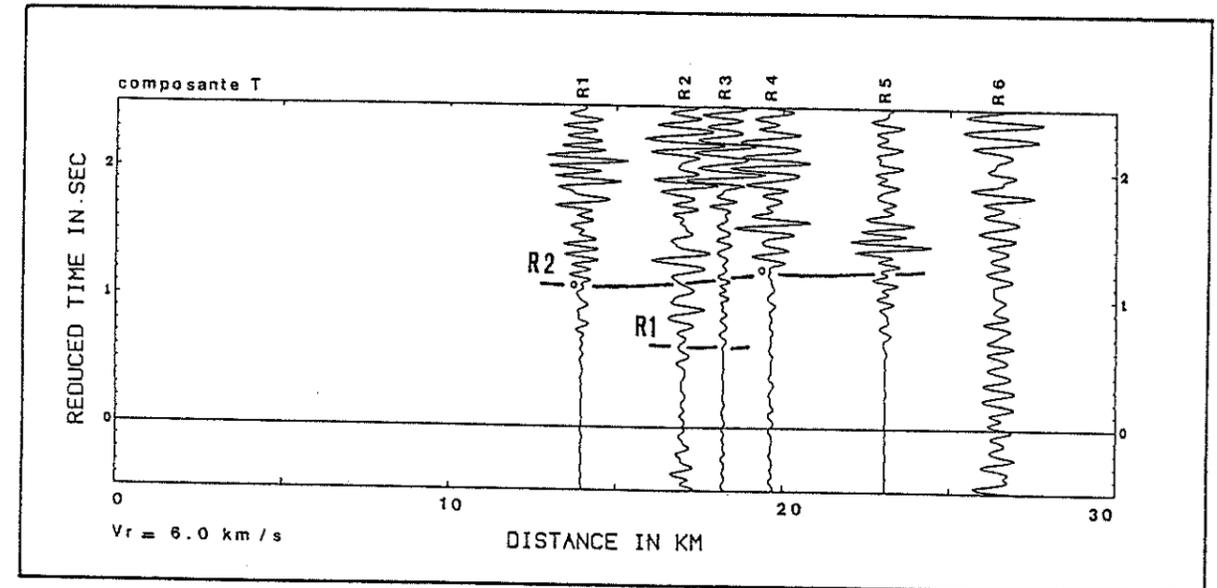


Figure 33 : Assemblage des traces, composante T.

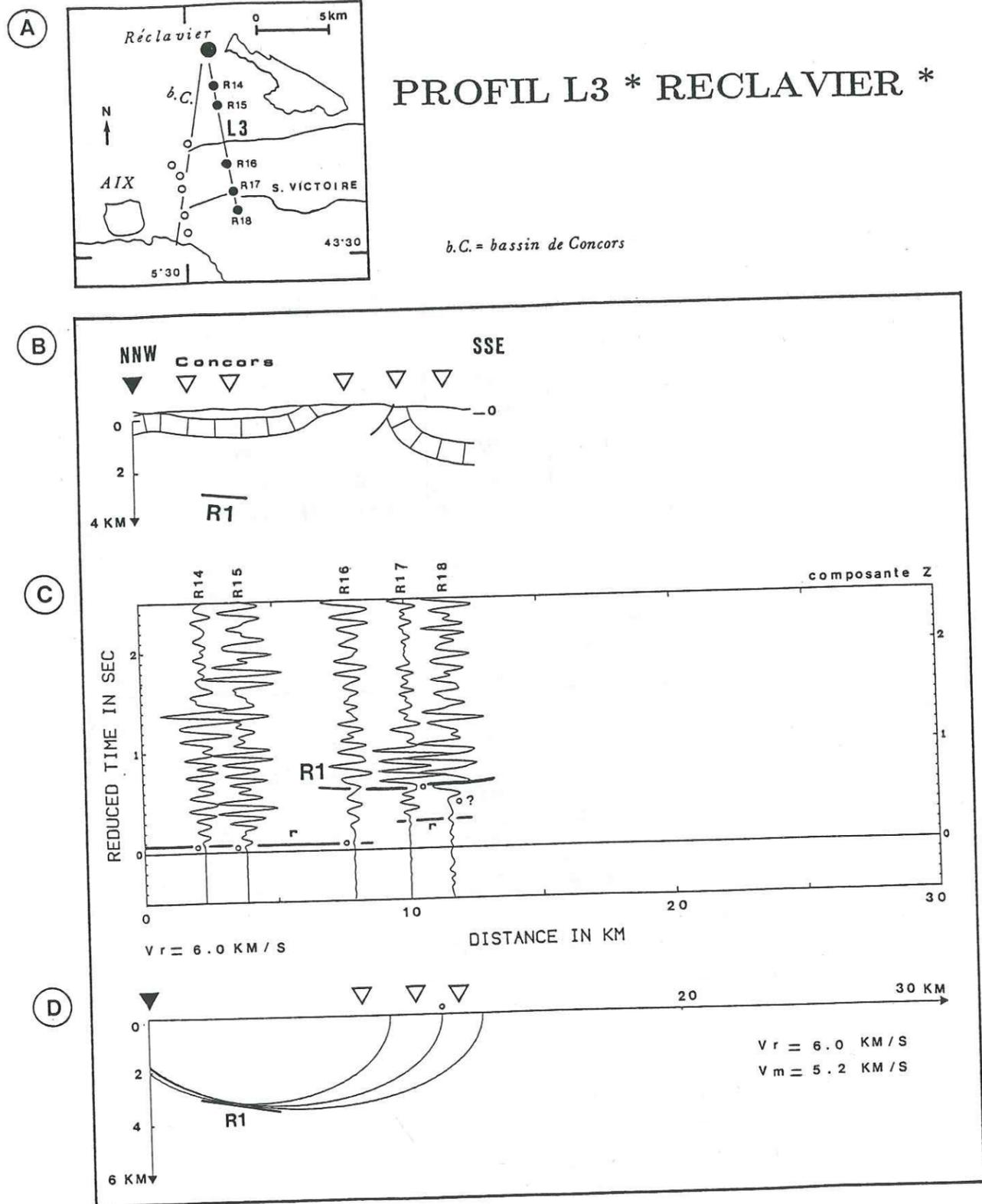


Figure 34 : Profil longitudinal L3.

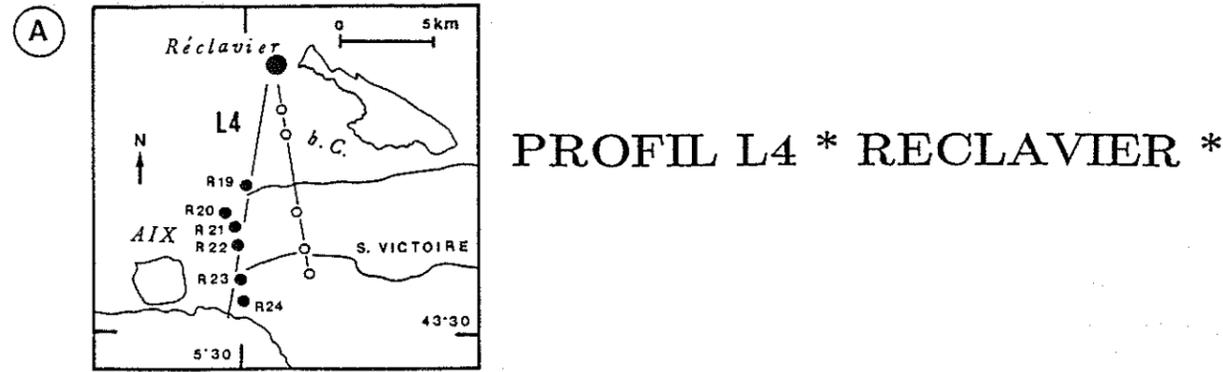
Fig. 34a : localisation des stations ; Fig. 34b : Coupe géologique le long du profil ;

Fig. 34c : Assemblage des traces ; Fig. 34d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

## \* Profil L3 :

Les premières arrivées Z sont très nettes sur les stations les plus proches du point de tir (fig. 20 ; fig. 34). L'intercept à l'origine est quasiment nulle. On distingue une seule phase réfléchie : R1 à 0.65 s environ en temps réduit corrélable uniquement sur deux traces. Les grandes amplitudes en début de signal de la dernière station du profil posent problème. S'agit-il d'une onde directe ou d'une onde réfléchie ?

station	$\Delta$	$t_r$	$T_r$	$t_{R1}$	$T_{R1}$
R14	2.30	0.05	0.43	-	-
R15	3.84	0.04	0.68	-	-
R16	7.90	0.06	1.37	0.64	1.95
R17	9.99	-	-	0.64	2.30
R18	11.56	-	-	0.66	2.58



PROFIL L4 \* RECLAVIER \*

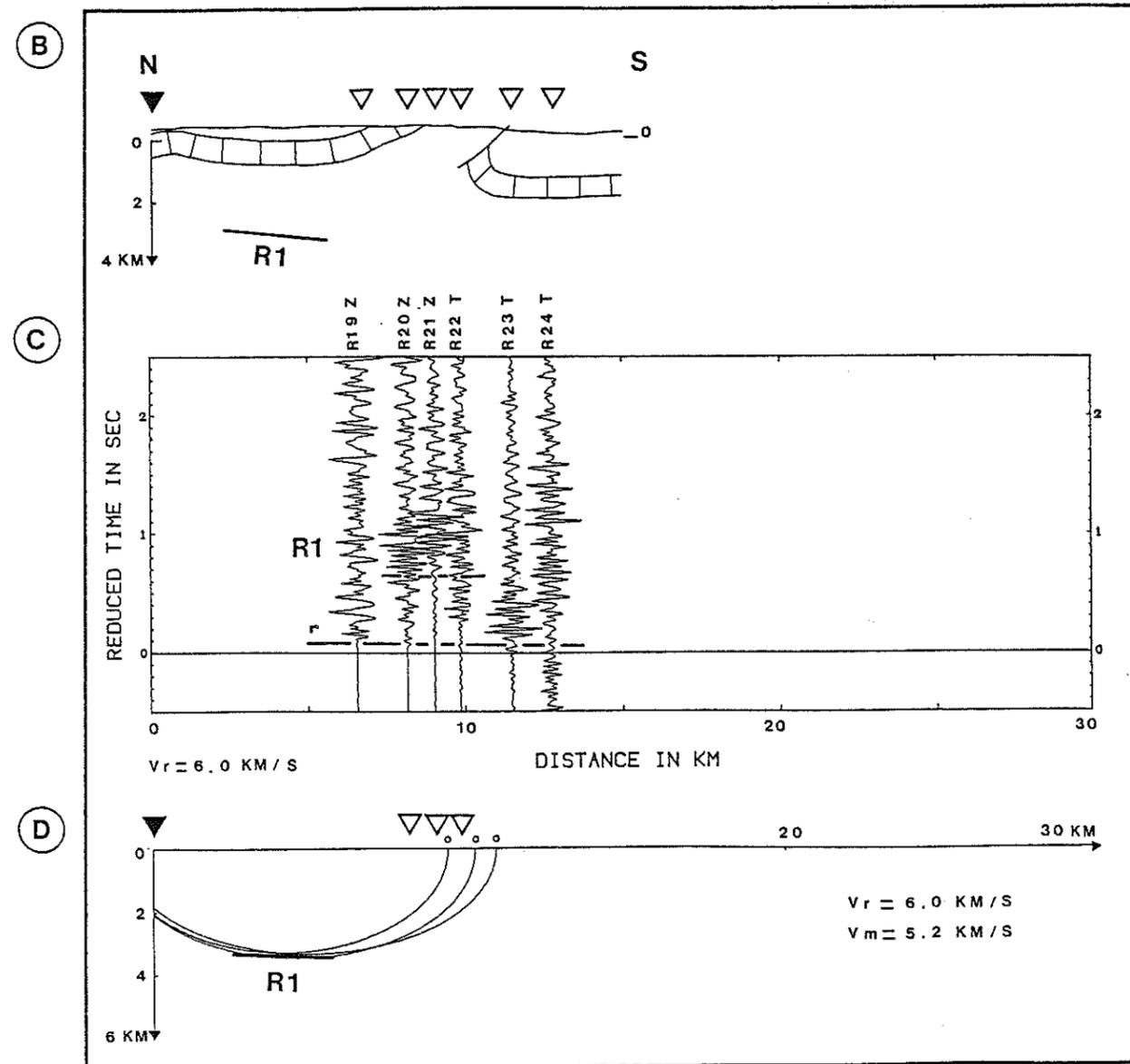


Figure 35 : Profil longitudinal L4.  
 Fig. 35a : localisation des stations ; Fig.35b : Coupe géologique le long du profil ;  
 Fig. 35c : Assemblage des traces ; Fig. 35d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

\* Profil L4 :

Sur l'assemblage (fig. 35, fig. 36) on pointe facilement une phase réfractée r. L'intercept à l'origine est très faible. On peut d'ores et déjà noter que la vitesse apparente est supérieure à 6.0 km/s. On observe également une phase réfléchie bien nette R1 à 0.65 s en temps réduit.

station	$\Delta$	$t_r$	$T_r$	$t_{R1}$	$T_{R1}$
R19	6.56	0.07	1.16	-	-
R20	8.16	0.05	1.41	0.65	2.01
R21	9.02	0.08	1.58	0.68	2.14
R22	9.85	-	-	0.64	2.28
R23	11.49	-	-	-	-
R24	12.70	-	-	-	-

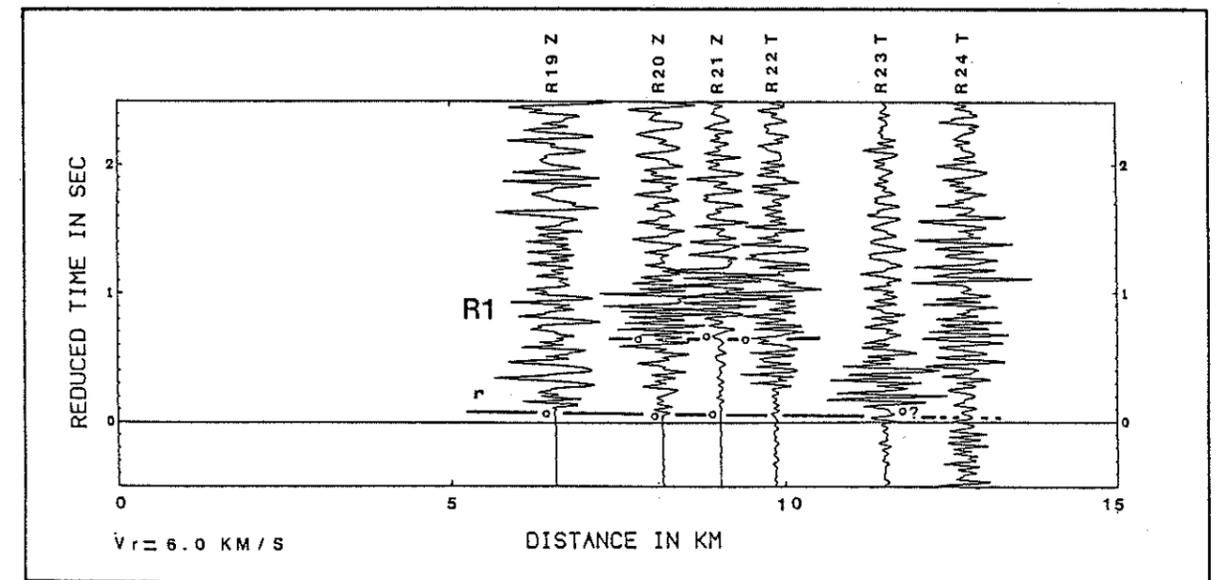


Figure 36 : Détail de l'assemblage des traces.

b- Interprétation des profils du Nord :

- Les ondes réfractées

L'équation de leurs hodochrones est :

\* pour le profil L3 (fig. 34) :

$$T = 0,07s + \Delta / 6,1 \text{ km/s}$$

\* pour le profil L4 (fig. 35, fig. 36) :

$$T = 0,15 + \Delta / 6,2 \text{ km/s}$$

La valeur très petite de l'ordonnée à l'origine indique que cette équation correspond à une onde réfractée qui se propage à très faible profondeur au toit des calcaires du Jurassique supérieur. Les vitesses calculées peuvent sembler anormalement élevées pour des calcaires mais elles sont confirmées par les vitesses mesurées pour le Jurassique supérieur dans le sismosondage de Jouques (6.220km/s). Le retard qui s'observe sur les stations les plus lointaines de ces deux profils (L3 et L4) s'explique par la traversée - dans la dernière partie du trajet de l'onde - de terrains plus lents (marnes et calcaires argileux) qui constituent la charnière anticlinale du pli de Sainte-Victoire.

Nous avons vu que les profils L1 et L2 (fig. 30, fig 31, fig. 32) ne nous permettent pas de pointer les premières arrivées de manière très nette. Il n'est donc pas possible de chiffrer les résultats pourtant cohérents quantitativement.

C'est ainsi que pour le profil L1 (fig. 31), l'ordonnée à l'origine - voisine de 0.3 s pour les stations proches du point de tir - est imputable soit à l'épaisseur de sédiments créacés du bassin de Rians sous la station, soit à la traversée des terrains du Jurassique moyen et inférieur du coeur du pli anticlinal sous la station R2.

Nous n'avons volontairement pas accordé plus de poids à l'interprétation des réfractées des profils L1, L3 et L4 car elles ne font que confirmer des données géologiques souvent plus précises. En effet, on peut estimer correctement les profondeurs du Jurassique supérieur par la bonne connaissance des épaisseurs des séries stratigraphiques dans le bassin de Concors et le bassin de Rians.

En ce qui concerne le profil L2 (fig. 30, fig. 31), les valeurs de l'ordonnée à l'origine - entre 0.3 s et 0.4 s pour les traces R7 et R8 - ne peuvent pas être attribuées à l'existence en surface de couches sédimentaires à vitesses faibles. Le Jurassique est affleurant, ou subaffleurant, sur la longueur totale du profil. On peut interpréter cette phase comme une réfractée au toit du Jurassique chevauché qui prolonge au Sud le bassin de Concors et s'enfonce sous la montagne des Ubacs. L'information est importante .

- Les ondes réfléchies

Dans les paragraphes qui suivent les profondeurs sont données par rapport au niveau de la mer (on a soustrait l'altitude moyenne du point de tir et des stations).

Deux phases réfléchies ont pu être mises en évidence. Elles se corrélaient très bien d'un profil à l'autre (fig. 37).

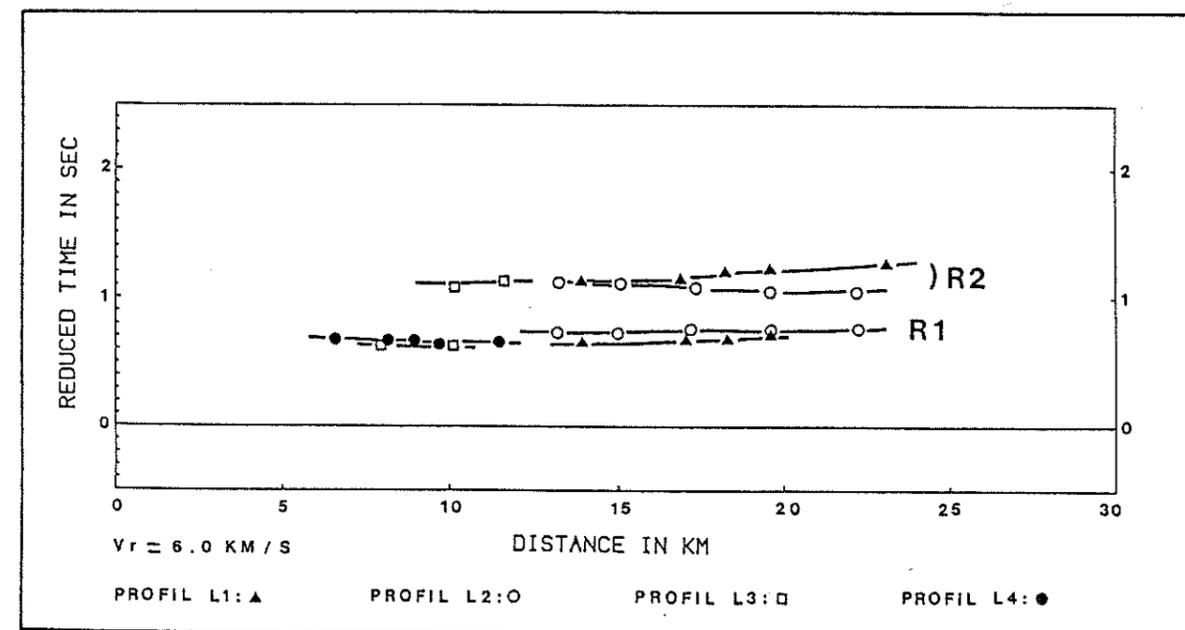


Figure 37 : Pointés des réfléchies pour les profils L1 à L4.

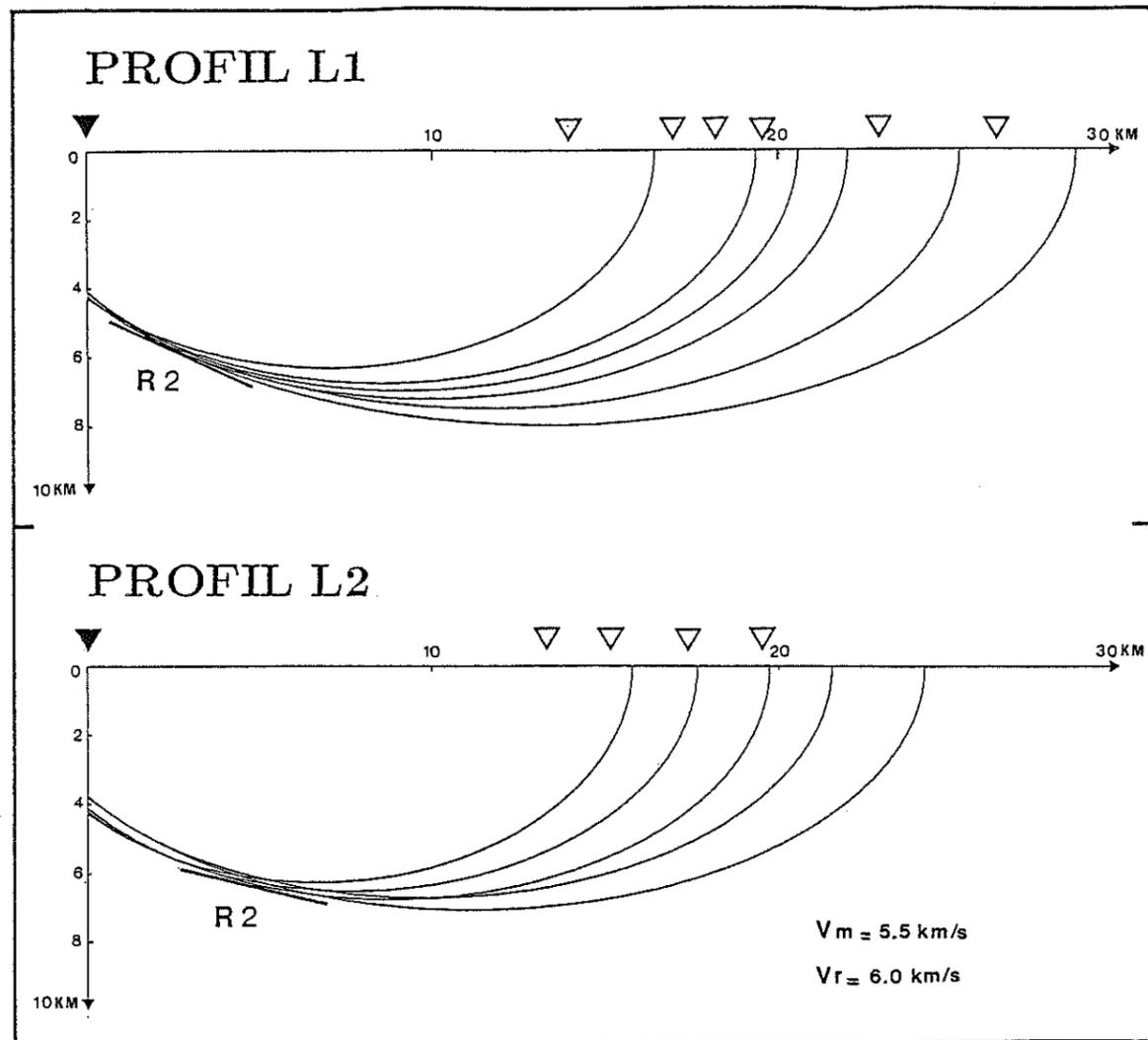


Figure 38 : Méthode des ellipses appliquée au réflecteur R2.

La première phase réfléchie notée R1 est interprétée comme une réflexion voisine de la base du Trias. Elle est nette et se retrouve sur les quatre profils.

Le traitement des données a été réalisé par la méthode des ellipses. Pour le réflecteur R1, elles sont tracées pour une vitesse moyenne de 5.2 km/s et une vitesse de réduction de 6.0 km/s. La vitesse moyenne n'a pas été calculée. Elle nous est donnée grâce aux mesures de vitesse du sismosondage. On peut penser qu'une faible ambiguïté subsiste sur sa valeur.

Le profil L1 (fig. 32) de direction Est-Ouest qui passe par le sondage de Jouques nous permet un contrôle et confirme l'interprétation proposée. Sur une coupe Est-Ouest, le réflecteur est légèrement ondulé. Il est rencontré à une profondeur de 2.8 km et pourrait remonter vers le sondage de Jouques jusqu'à 2.2 km. Les valeurs de profondeurs obtenues par calcul sont en bon accord avec les données du sondage (socle rencontré à une profondeur de 2.06 km) et dans les limites de l'incertitude normale sur de telles expériences. Les autres profils nous fournissent également un réflecteur socle affecté de faibles pendages. Le socle est rencontré sur le profil L2 (fig. 30, fig. 31) à une profondeur moyenne de 3.0 km. Il montre un léger pendage ascendant vers le Sud-Est. Les profils L3 (fig. 34) et L4 (fig. 35, fig. 36) font apparaître un réflecteur à 3.0 km de profondeur moyenne, penté faiblement vers le Sud.

La deuxième phase notée R2 est une réflexion au sein du socle particulièrement nette sur le profil L2 (fig. 30, fig. 31), moins visible sur le profil L1 (fig. 32). On peut penser qu'il s'agit de la base d'un bassin permien ou permo-carbonifère.

La vitesse moyenne utilisée pour le tracé des ellipses est 5.5 km/s (fig. 38). Il s'agit d'une estimation légitimée par le fait que l'on traverse sous le Trias un socle à une vitesse élevée. L'incertitude sur la vitesse est grande. Le réflecteur obtenu est fortement penté vers le Sud-Est (fig. 38, profil L2) et vers l'Est (fig. 38, profil L1) où il atteint à 6 km du point de tir la profondeur maximale de 6.6 km.

### III.3.2.2. Les profils au Sud de la Sainte-Victoire

(Points de tir : carrière de la Malespine et de Bouc-Bel-Air)

a- Présentation des résultats.

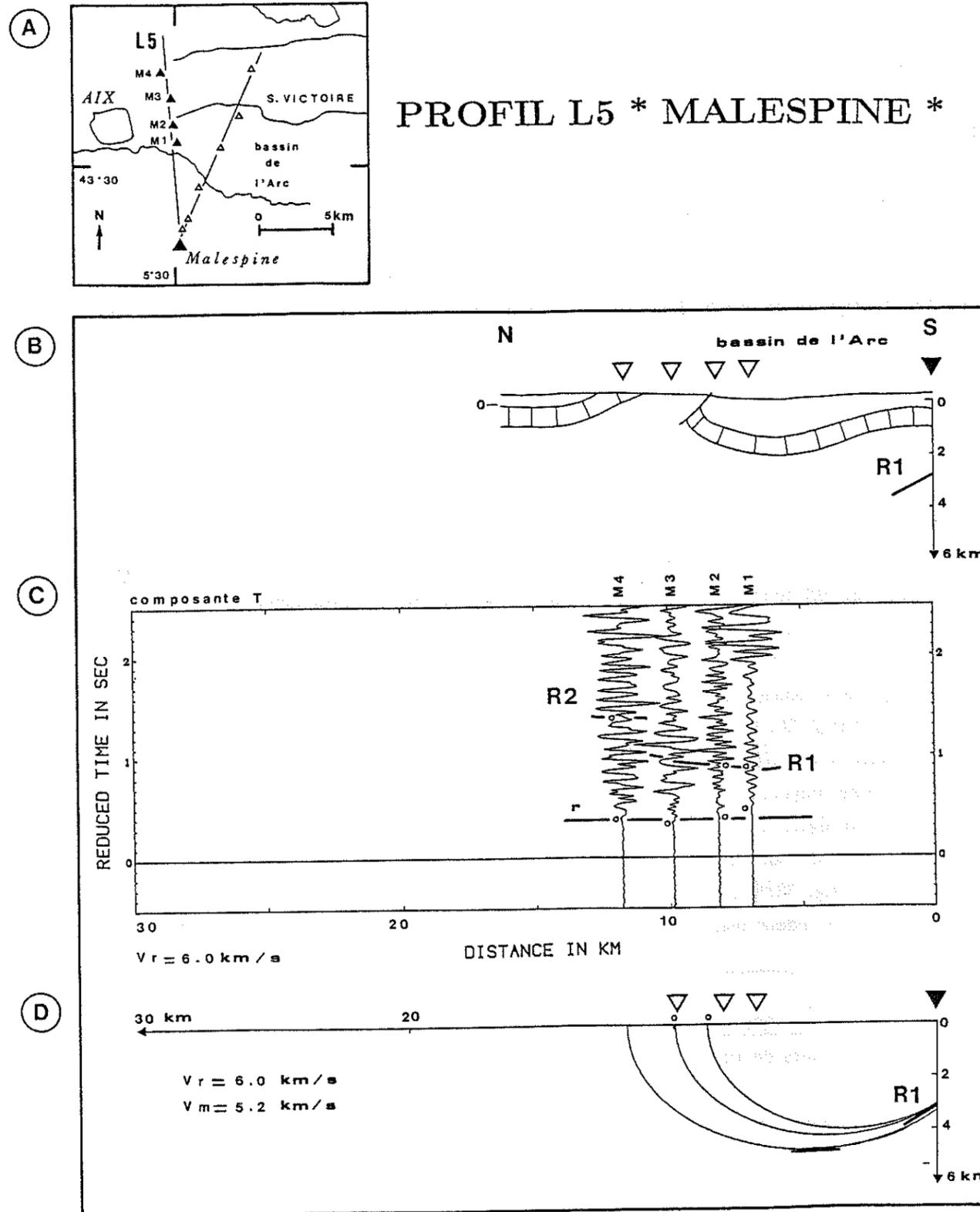


Figure 39 : Profil longitudinal L5.  
 Fig. 39a : Localisation des stations ; Fig. 39b : Coupe géologique le long du profil ;  
 Fig. 39c : Assemblages des traces ; Fig. 39d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

\* Profil L5 :

Les premières arrivées sont très nettes (fig. 39, fig. 40). L'intercept à l'origine est de 0.35 s, il s'agit d'une phase réfractée r. Deux réflexions sont bien distinctes, corrélables sur 3 stations du profil.

Les profils L4 et L5 n'ont pas été exploités comme des profils direct et inverses. Ils ont été utilisés comme des profils indépendants.

station	$\Delta$	$t_r$	$T_r$	$t_{R1}$	$T_{R1}$	$t_{R2}$	$T_{R2}$
M1	6.91	0.38	1.53	0.88	2.03	-	-
M2	8.16	0.34	1.7	0.90	2.26	1.33	2.69
M3	9.86	0.40	2.04	0.99	2.63	1.37	3.01
M4	11.77	0.48	2.44	-	-	1.39	3.35

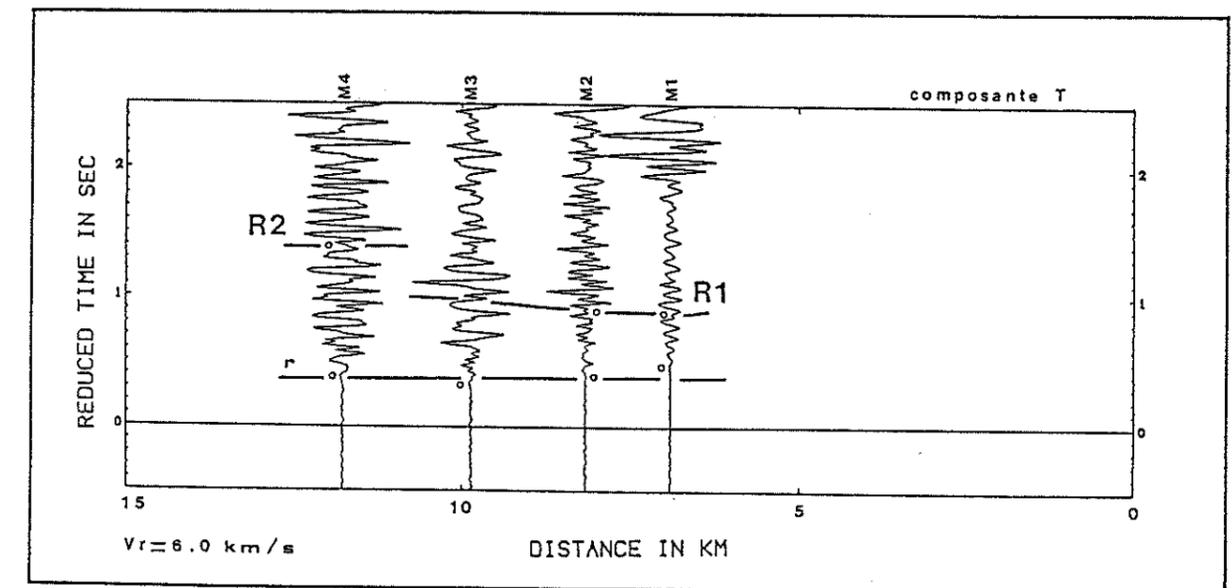


Figure 40 : Détail de l'assemblage des traces.

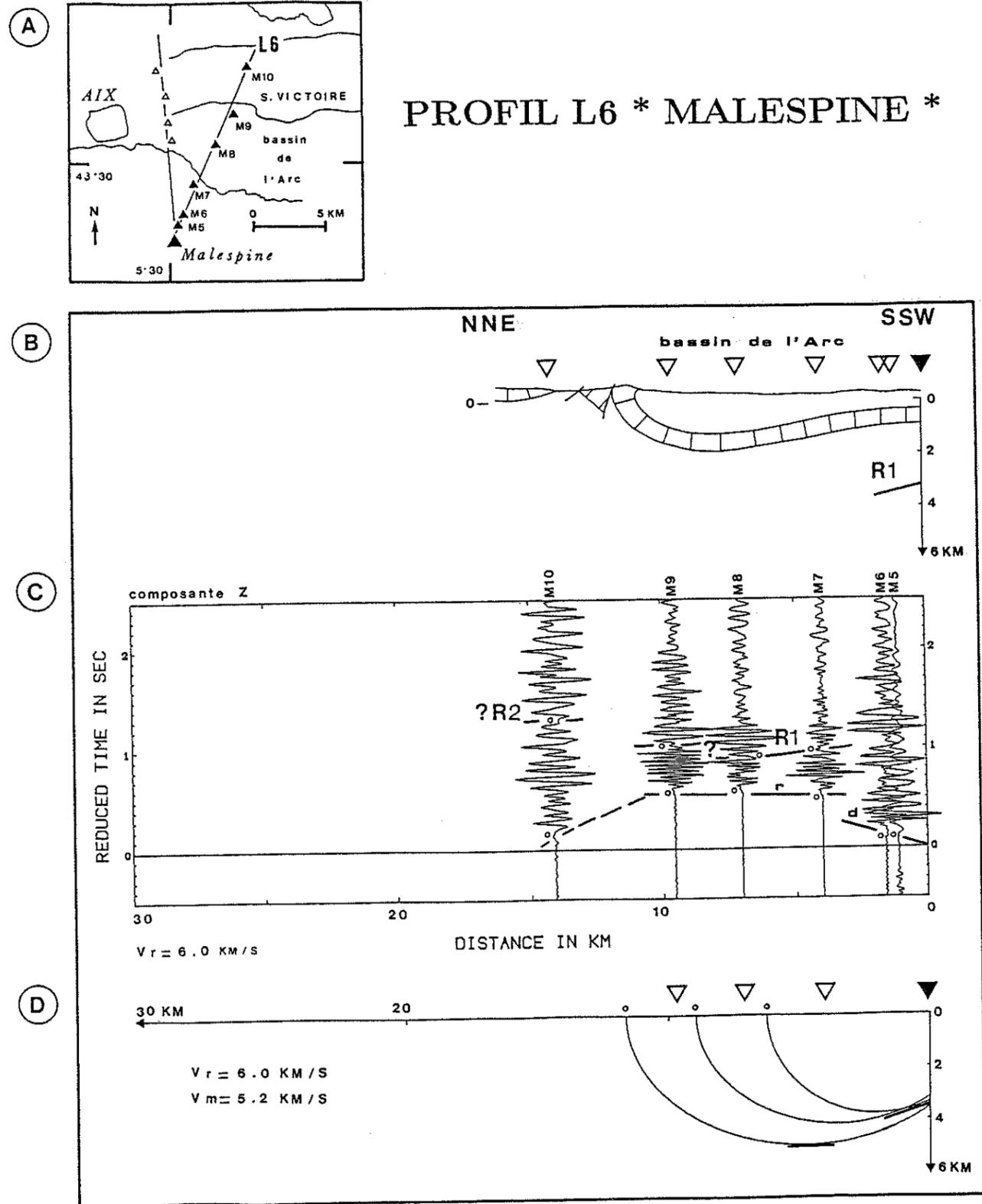


Figure 41 : Profil longitudinal L6.  
 Fig. 41a : Localisation des stations ; Fig. 41b : Coupe géologique le long du profil.  
 Fig. 41c : Assemblage des traces ; Fig. 41d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

\* Profil L6 :

Les premières arrivées sont nettes (fig. 41, fig. 42) ; il s'agit de directes pour les stations les plus proches du point de tir et de réfractées à partir de 4 km de distance.

Une seule phase réfléchie est visible. La corrélation de R1 entre les stations M8 et M9 n'est pas évidente.

station	$\Delta$	$t_r$	$T_r$	$t_{R1}$	$T_{R1}$
M5	1.10	0.10	0.28	-	-
M6	1.57	0.10	0.36	-	-
M7	3.98	0.50	1.16	0.98	1.64
M8	7.04	0.58	1.75	0.92	2.09
M9	9.56	0.59	2.18	1.05	2.64
M10	14.07	0.17	2.51	-	-

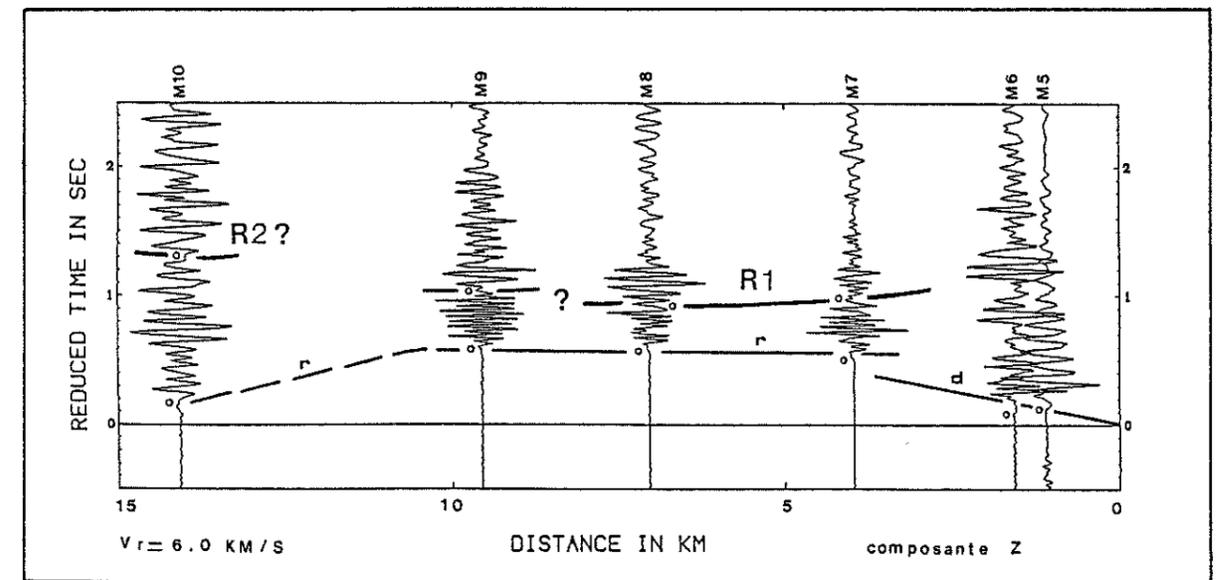


Figure 42 : Détail de l'assemblage des traces.

PROFIL L7 \* BOUC-BEL-AIR \*

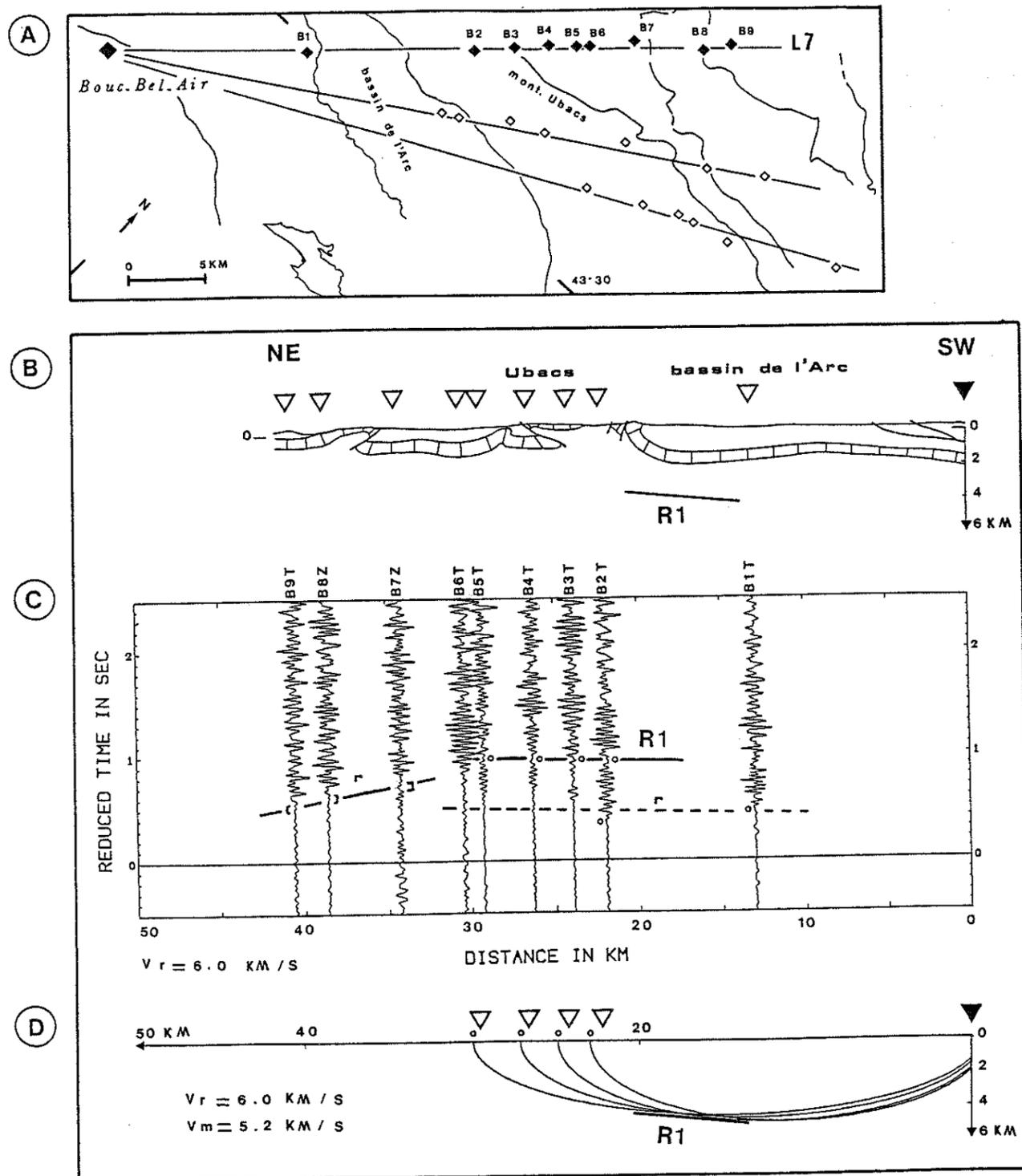


Figure 43 : Profil longitudinal L7.  
 Fig. 43a : localisation des stations ; Figure 43b : Coupe géologique le long du profil ;  
 Fig. 43c : Assemblage des traces ; Fig. 43d : Méthodes des ellipses, réflecteur R1.

\* Profil L7 :

Nous avons pointé des premières arrivées (fig. 43, fig. 44) qui correspondent à des arrivées supposées "maximales", leurs débuts réels sont probablement un peu plus en avance (jusqu'à -0.05 s avant ?).

Ces pointés sont annotés d'une étoile dans le tableau des résultats. Une arrivée tardive réfléchie R1 est bien marquée, elle se rencontre entre 0.92 s et 1.0 s en temps réduit.

station	$\Delta$	$t_r$	$T_r$	$t_{R1}$	$T_{R1}$
B1	13.02	0.48	2.65	-	-
B2	21.95	0.37	4.03	0.95	4.60
B3	23.94	-	-	0.97	4.96
B4	26.33	-	-	0.97	5.36
B5	29.26	-	-	1.00	5.87
B6	30.41	-	-	-	-
B7	34.27	0.71*	6.42	-	-
B8	38.58	0.60*	7.03	-	-
B9	40.58	0.60*	7.36	-	-

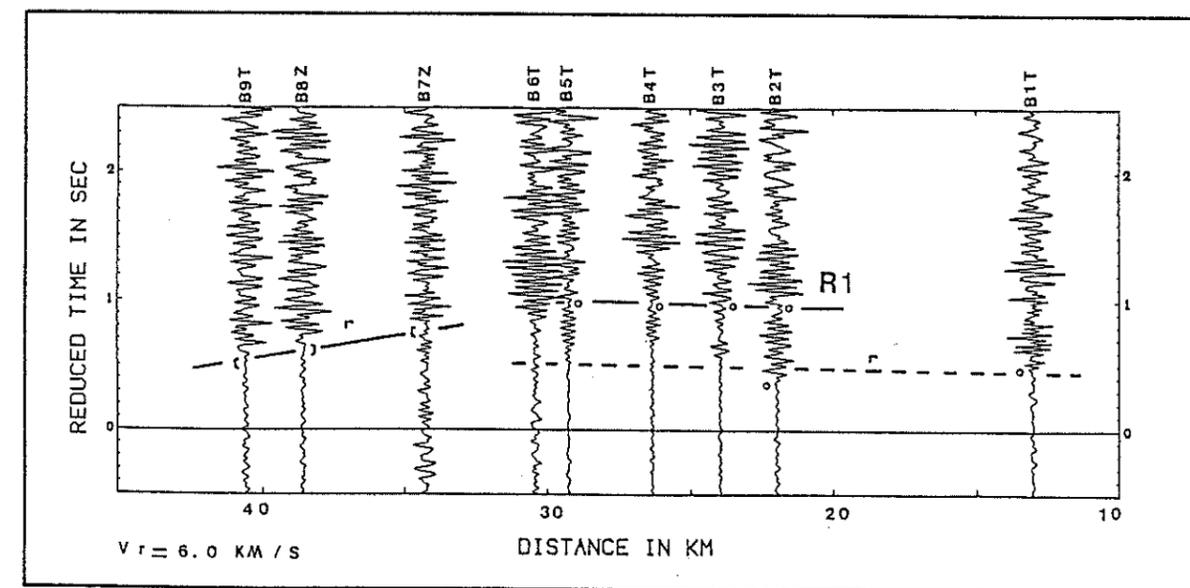


Figure 44 : Détail de l'assemblage des traces.

# PROFILS L8 & L9 \* BOUC-BEL-AIR \*

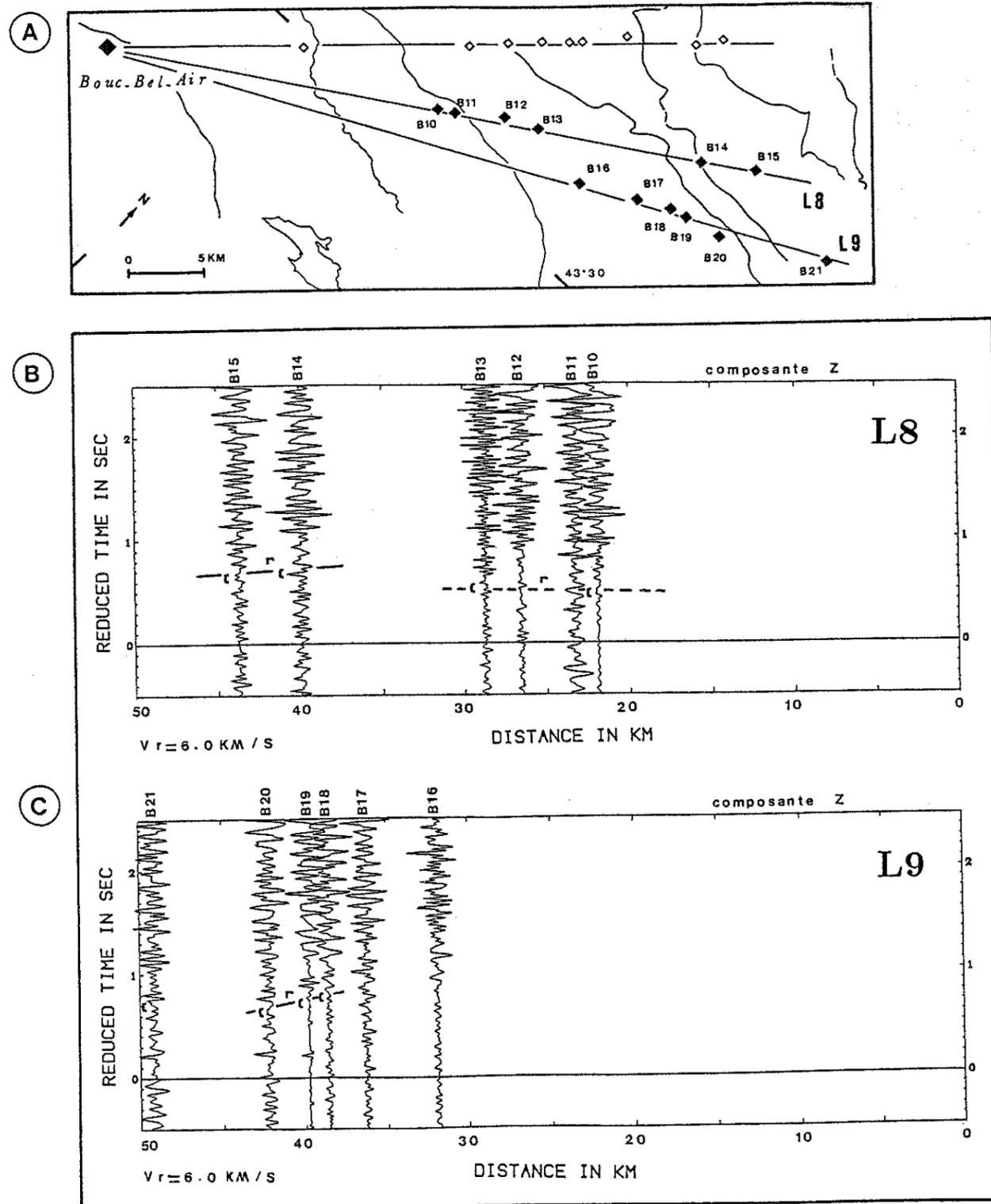


Figure 45a : Carte de localisation des stations des profils L8 et L9.

Figure 45b : Profil longitudinal L8.

Figure 45c : Profil longitudinal L9.

\* Profil L8, profil L9 :

Par analogie avec l'assemblage précédent nous avons pointé les premières arrivées (fig. 45). L'incertitude sur la détermination du temps de propagation est assez grande (de l'ordre de 0.1 s). Nous utiliserons ultérieurement ces données avec précaution.

Profil L8 :

station	$\Delta$	$t_r$	$T_r$
B10	21.89	-	-
B11	23.27	-	-
B12	26.53	-	-
B13	28.71	-	-
B14	39.98	0.76*	7.42
B15	43.71	0.72*	8.00

Profil L9 :

station	$\Delta$	$t_r$	$T_r$
B16	31.91	-	-
B17	36.26	-	-
B18	38.56	0.76*	7.19
B19	39.75	0.74*	7.36
B20	42.20	0.70*	7.73
B21	49.18	0.72*	8.91

## b- Interprétation des profils du Sud :

## - Les premières arrivées

A très courtes distances (jusqu'à 2 km) la première arrivée du profil L6 (fig. 41, fig. 42) peut être interprétée comme une directe se propageant dans les calcaires marneux rognaciens. Elle nous donne une vitesse égale à 3.66 km/s, la seconde phase est une onde réfractée qui est observable en première arrivée entre 4 km et 14 km d'équation :

$$T = 0.54 \text{ s} + \Delta / 6.09 \text{ km/s}$$

On peut l'interpréter comme une onde réfractée au toit du Jurassique supérieur. Si l'on se donne un modèle simplifié à deux couches avec une vitesse de 3.0 km/s dans la couche 1 (vitesse estimée d'après le calcul précédent) et une vitesse de 6.2 km/s dans la couche 2 (vitesse donnée par le sismosondage, du même ordre de grandeur que la vitesse calculée), la discontinuité du sommet du Jurassique pour la station M9 est rencontrée à une profondeur de 1.1 km. Le résultat est proche des épaisseurs de sédiments créacé du bassin de l'Arc données par la bibliographie. L'avance relative de la première arrivée pour la dernière station du profil (station M10) est imputable à sa position géologique (pas de sédiments créacés sous la station installée sur des calcaires massifs). Ce calcul de profondeur (1.1 km) a pour objectif de contrôler la validité de l'interprétation proposée. Mais nous avons estimé inutile de préciser pour chaque station la profondeur du Jurassique, mieux connu par sondages.

La phase réfractée au toit du Jurassique est visible sur les assemblages L5 (fig. 39, fig. 40) et L7 (fig. 43, fig. 44) entre 7 km et 31 km de distance. L'équation de l'hodochrone du profil L5 (fig. 39, fig. 40) est :

$$T = 0.40 \text{ s} + \Delta / 6.12 \text{ km/s}$$

Les valeurs de la vitesse et des ordonnées à l'origine sont comparables à celles du profil précédent L6.

A grandes distances (à partir de 34 km du point de tir) sur le profil L7, la première arrivée est interprétée comme une réfractée voisine du toit du socle. Considérant un modèle simplifié à deux couches : la première à une vitesse moyenne de 5.2 km/s (vitesse donnée par le sismosondage de Jouques), la deuxième à une vitesse de 6.0 km/s (vitesse communément admise pour le socle), nous avons pu calculer les profondeurs de la discontinuité pour chaque station :

Station B7	H = 2.7 km
Station B8	H = 2.7 km
Station B9	H = 2.2 km

Il faut remarquer que les profondeurs calculées sont en bon accord avec les profondeurs données par la sismique pétrolière. Le profil réinterprété Du 1 (III.2.2 : sondage et sismosondage de Jouques) nous donne sous le bassin de Rians un réflecteur penté Sud-Ouest et un point à 2.7 km. Or, à un kilomètre au Sud-Ouest, la profondeur calculée par réfraction est de 3.2 km (fig. 48). Cela dit, dans la mesure où le réflecteur est penté la différence de profondeur est moins forte qu'il n'y paraît (environ 300 m). On ne dépasse pas la marge d'erreur inhérente à de telles expériences.

On constatera également la cohérence, toujours dans la zone du bassin de Rians, des valeurs de profondeurs données par réfraction et de celles fournies par la réflexion. C'est ainsi qu'à environ 2 km de distance, on obtient par réfraction 3.2 km (station B7, profil L7) et une valeur de 3.0 km pour la réflexion (station R10, profil L2, fig. 48).

Pour les profils L8 et L9 (fig. 45), les mêmes calculs de profondeur ont été réalisés. Le socle est rencontré à une profondeur moyenne de 3.3 km.

Le détail des calculs de profondeur pour chaque station est donné sur la carte synthétique figure 48.

La détermination du toit du socle par ces calculs est délicate considérant d'une part l'imprécision sur la détermination des temps de propagation (profils bruités), mais surtout les éventuels effets de pendage impossible à prendre en compte correctement.

## - Les ondes réfléchies

Deux phases réfléchies distinctes sont reconnues (fig. 46). On peut logiquement penser qu'il s'agit des deux réflecteurs mis en évidence au Nord de la Sainte-Victoire. La vitesse moyenne nous est donnée par le sismosondage de Jouques (5.2 km). La variation de la vitesse moyenne due à la plus grande épaisseur au Sud des sédiments créacés est très faible (0.015 s). Elle peut donc être négligée.

On retrouve R1, interprétée comme une réflexion au toit du socle. Les profils L5 et L6 situent le réflecteur à une profondeur moyenne de 3.4 km et 3.2 km respectivement avec une pente descendante vers le Nord assez forte (13° et 27°). On peut noter la similitude des

réflecteurs obtenus par les deux profils. Les résultats sont tout à fait compatibles avec les données géologiques (Dôme du Regagnas).

Le profil L6 nous fixe le toit du socle à une profondeur de 4.0 km avec un légère pente vers le Sud-Ouest.

La seconde phase réfléchie R2 moins nette, n'est visible que sur deux traces. Elle correspond à une discontinuité au sein du socle située à une profondeur moyenne de 6.8 km. Il pourrait s'agir, comme au Nord, de la limite d'un bassin permo-carbonifère.

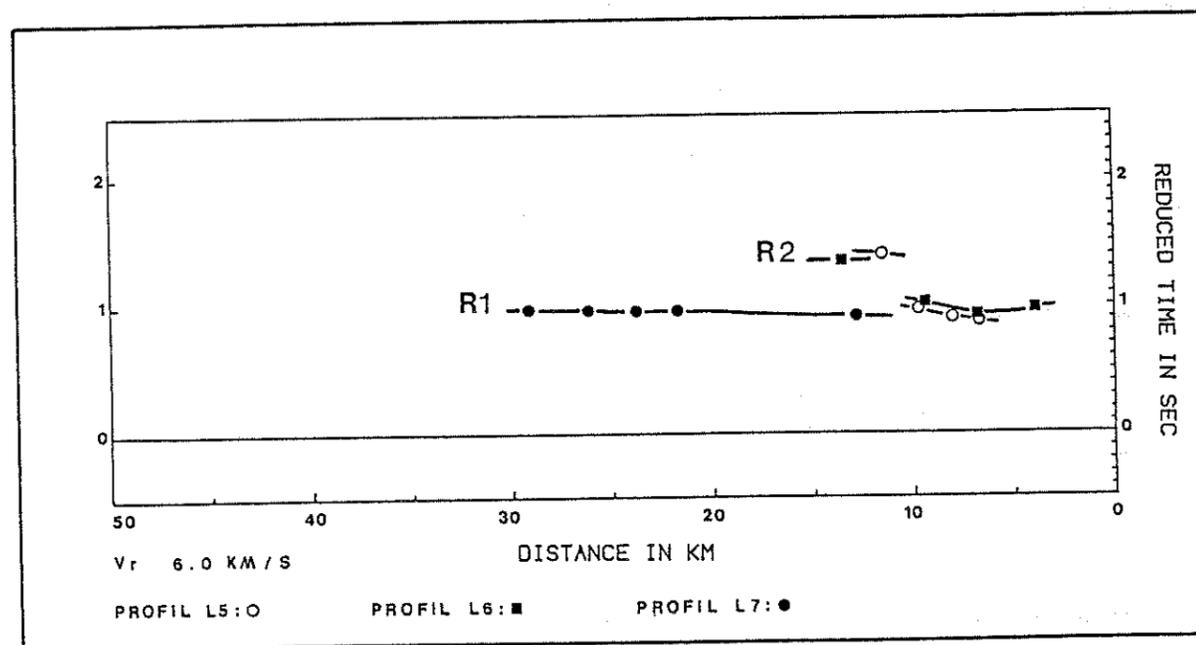


Figure 46 : Pointé des réfléchies pour les profils L5 à L9.

### III.4. Synthèse des données

#### III.4.1. Le réflecteur R1, voisin du toit du socle

Une carte synthétique de la profondeur du réflecteur R1, voisin du toit du socle est présentée figure 48. Pour les valeurs obtenues par réflexion, on a reporté à la distance  $d$  du

point de tir la profondeur  $H$  du réflecteur pour chaque station (Fig. 47). Pour les valeurs obtenues par réfraction, les profondeurs sont calculées pour chaque station et reportées en tenant compte de l'angle d'incidence.

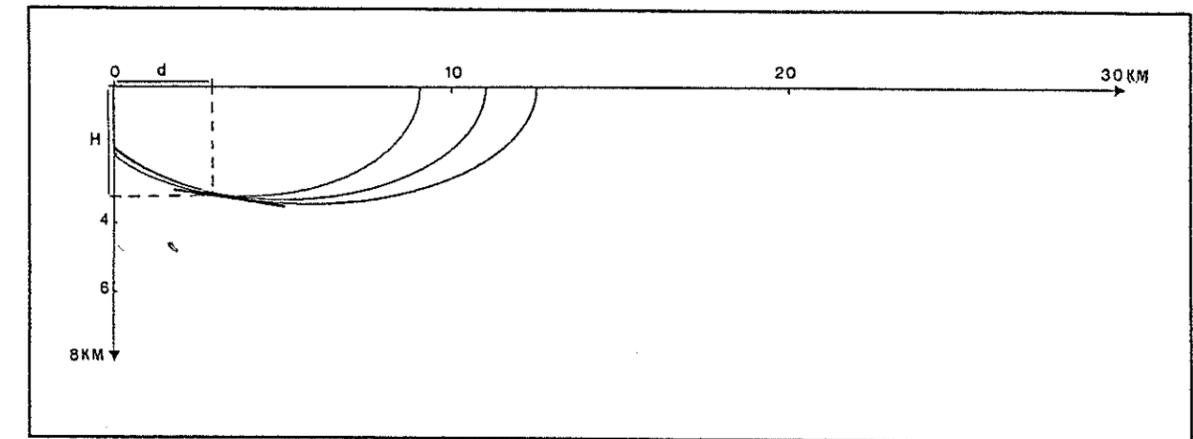


Figure 47 : Méthode des ellipses

Attention (!), le zéro correspond à l'altitude moyenne stations / point de tir. Pour la réfléchie à la station R7, on lit à la distance  $d_1$ , la profondeur  $H$ .

Les résultats de ces expériences de sismologie expérimentale sont confirmées par les données de sismique pétrolières disponibles.

En résumé, au Nord de la Sainte-Victoire le socle a pu être localisé à une profondeur moyenne de 3 km avec une zone haute aux environs du sondage de Jonques (2.06 km). Au sud de la Sainte-Victoire, par contre, le socle a une profondeur plus grande (4 km en moyenne), avec une remontée vers le dôme du Regagnas jusqu'à 2.9 km.

Cependant, compte tenu de la position des carrières utilisables comme point de tir, il n'a pas été possible de déterminer avec certitude comment évolue la profondeur du socle du Nord au Sud sous la Sainte-Victoire. Deux cas de figure sont envisageables : un passage brutal, sous la forme d'une marche abrupte (faille) ou un passage progressif (flexure).

Quelle que soit sa modalité, le décalage vertical s'atténue vers l'Est du massif pour disparaître selon toute probabilité. En effet, dans la partie orientale, le massif socle y est rencontré à une profondeur régulière du Nord au Sud, voisine de 3.3 km.

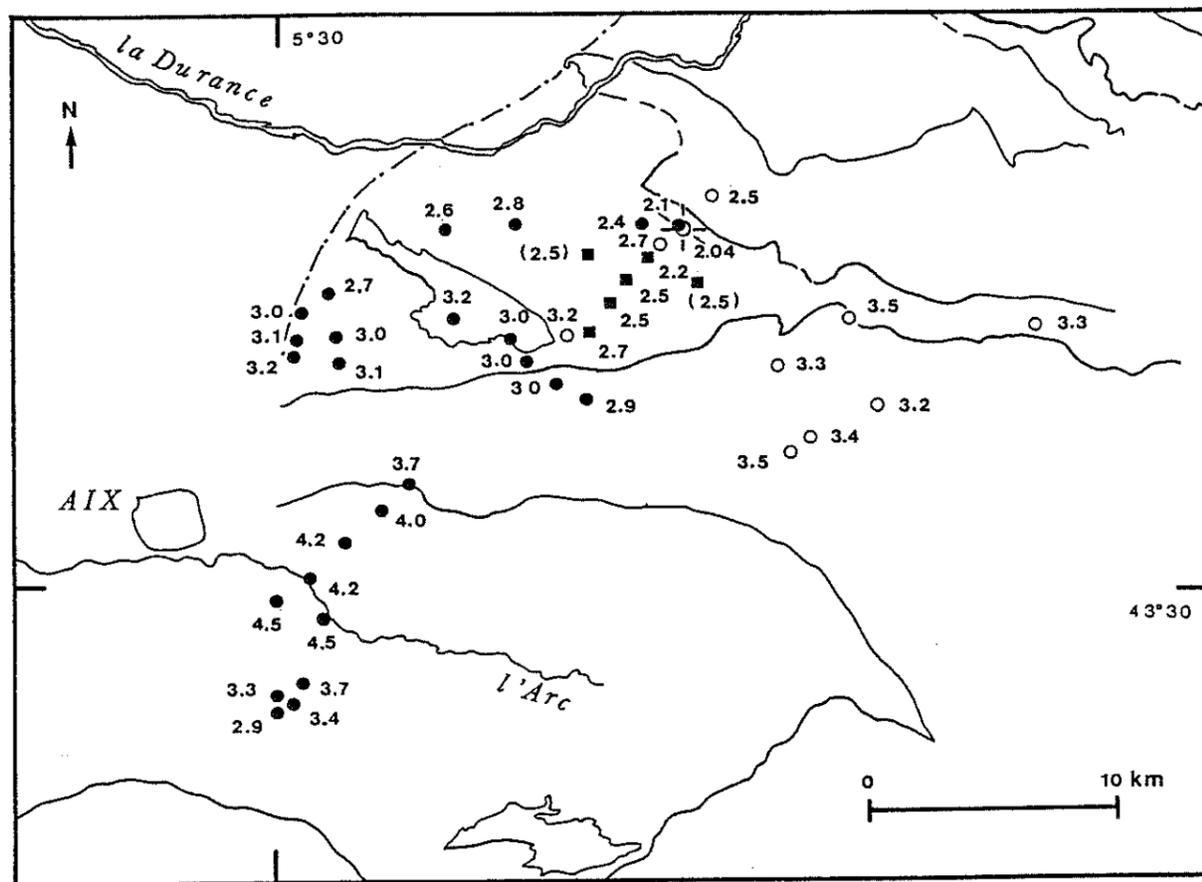


Figure 48 : Situation des données brutes concernant le réflecteur R1, voisin du toit du socle.

- = limite du marqueur profond qui correspond à la flexure de la Durance.
- = sondage de Jouques.
- 3.0 = profondeur en km obtenue par réflexion pour les stations des profils L1 à L7.
- 3.0 = profondeur en km obtenue par réfraction pour les stations des profils L7 à L9.
- 3.0 = profondeur en km, données pétrolières.
- (2.7) = profondeur en km, données pétrolières (réinterprétées par GALY en 1970).

### III.4.2. Le réflecteur R2, limite du permien ?

Les résultats obtenus sont moins nombreux (fig. 49). Il s'agit d'un réflecteur au sein du socle qui pourrait correspondre à la limite du Permien. Le réflecteur est profond (6.0 km de profondeur en moyenne) fortement penté au Sud-Est et à l'Est.

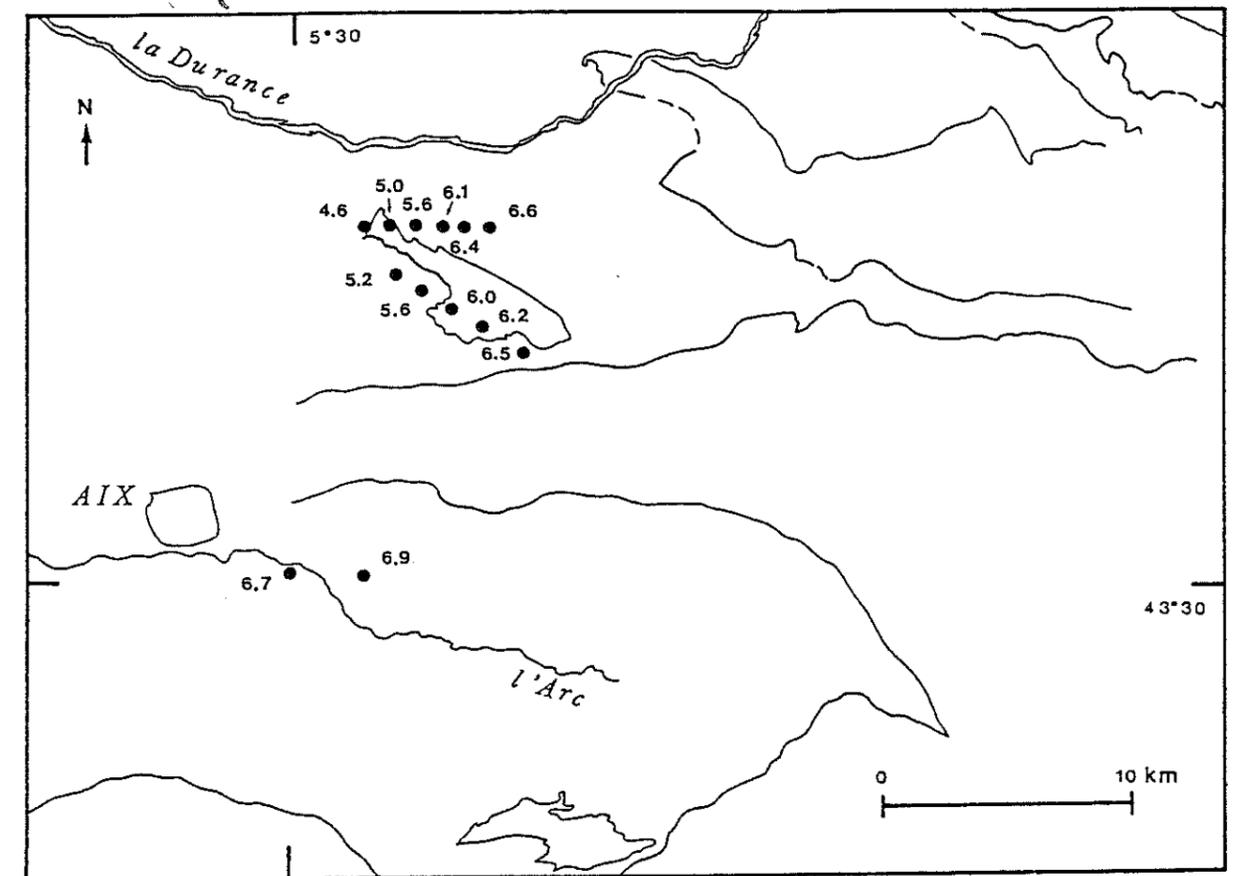


Figure 49 : Situation des données brutes concernant le réflecteur R2, limite du permien ?

- = profondeur en km obtenue par réflexion

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.  
MAISON DES GEOSCIENCES  
DOCUMENTATION  
B.P. 53  
F. 38041 GRENOBLE CEDEX  
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58  
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

*DEUXIEME PARTIE*

**INTERPRETATIONS GEOMETRIQUE  
ET CINEMATIQUE DES STRUCTURES**

**COUPES EQUILIBREES DANS LA REGION  
BASSIN DE L'ARC - MONTAGNE VAUTUBIERE**



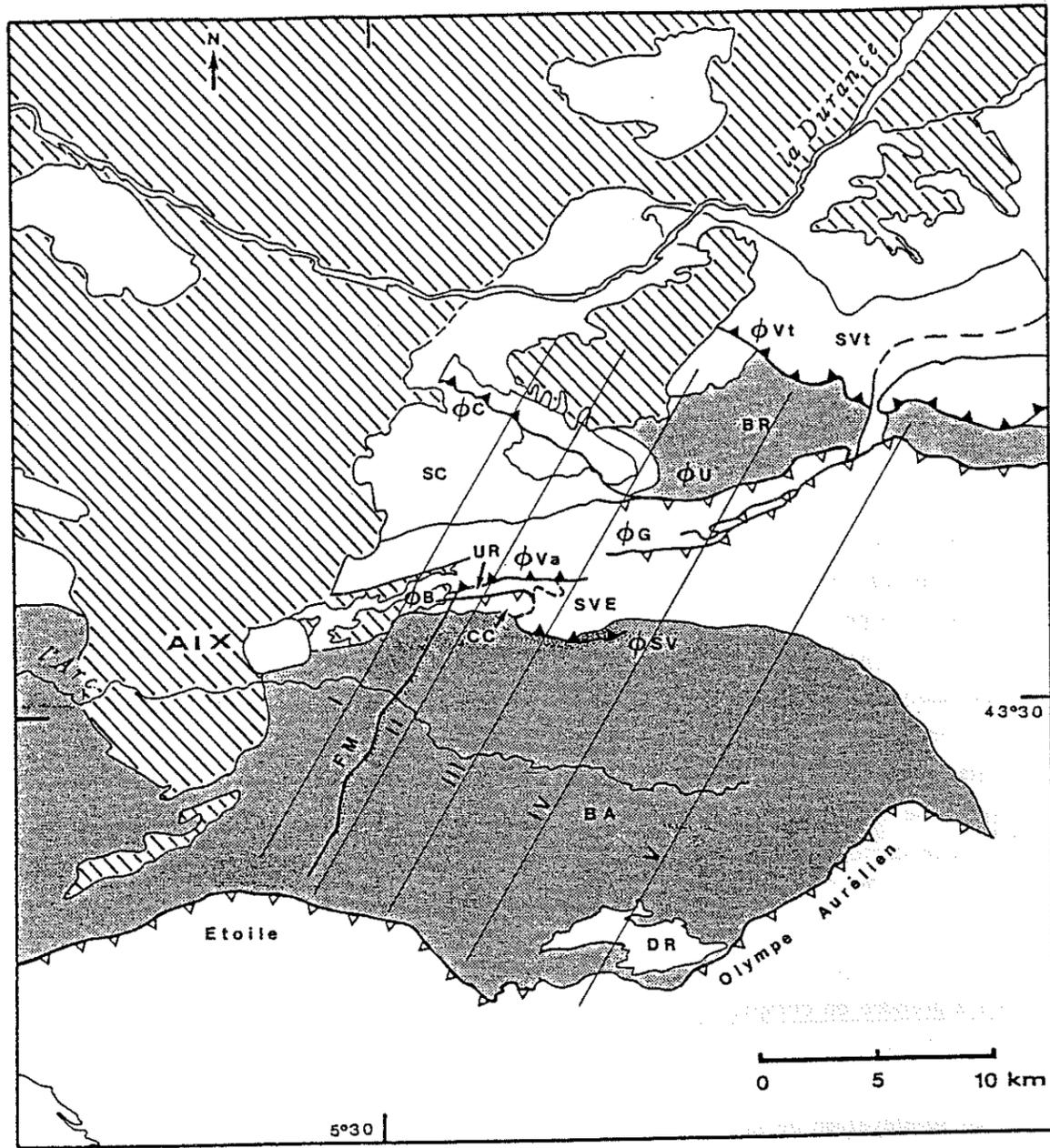


Figure 50 : Schéma structural simplifié

Dénomination des structures :

D.R. = dôme du Regagnas, B.A. = bassin de l'Arc, S.V.E. = structure Sainte-Victoire Est, C.C. = Costes Chaudes, U.R. = unité des Reynauds, S.U. = structure des Ubacs, B.R. = bassin de Rians, S.C. = structure du bois de Concors.

Dénomination des chevauchements et des failles :

φSV = chevauchement Sainte-Victoire, φB = chevauchement Bimont, φVa = chevauchement Vauvenargues, φG = chevauchement Gardiole, φU = chevauchement Ubacs, φVt = chevauchement Vautubière, φC = chevauchement de Concors, FM = faille de Meyreuil.

-  Terrains discordants
-  Eocène et Crétacé supérieur
-  Crétacé inférieur et Jurassique

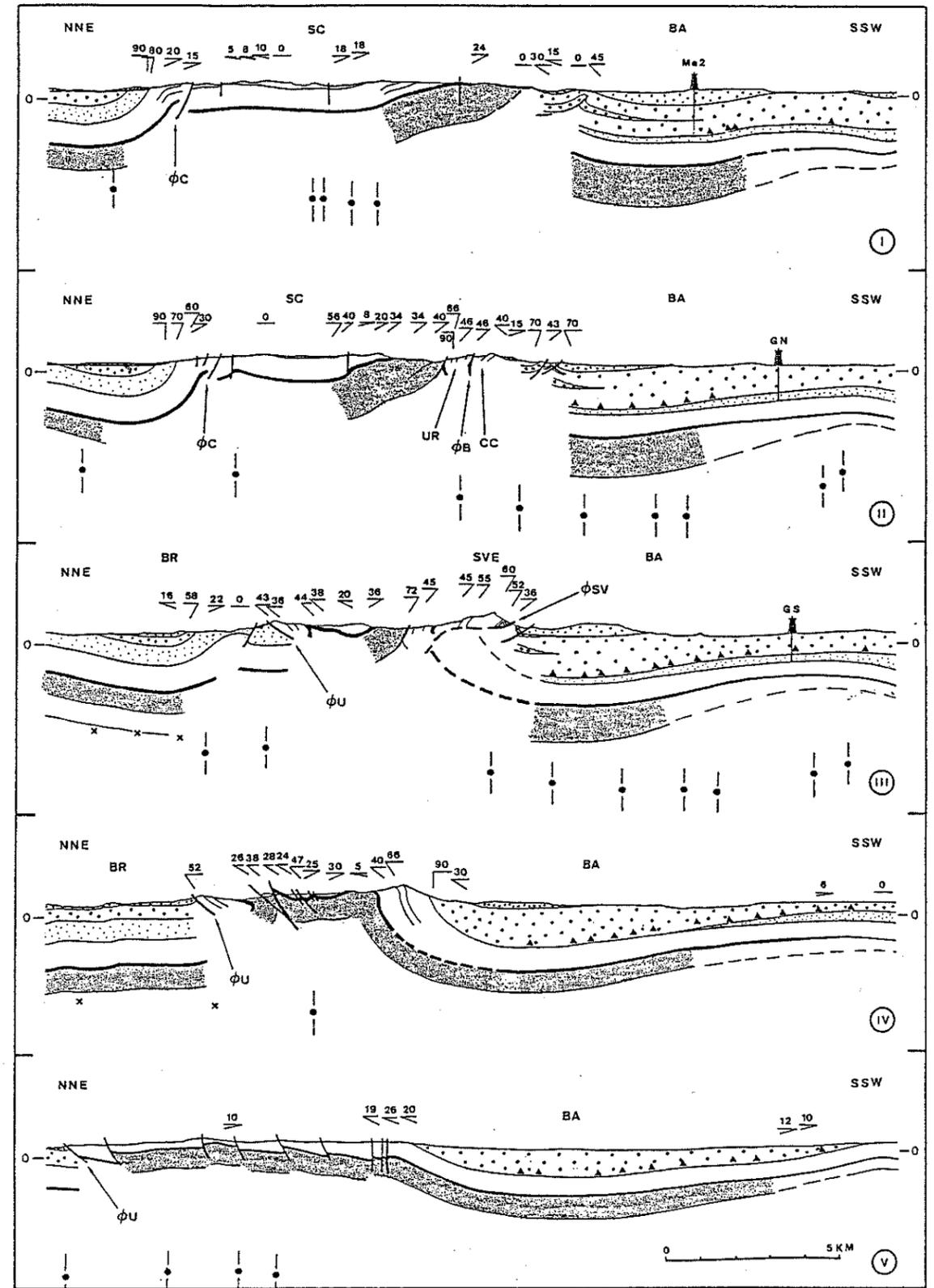


Figure 51 : Coupes sériées qui synthétisent les données géologiques et sismiques.

x profondeur du socle, données pétrolières.

⊥ profondeur du socle, sismologie expérimentale.

En tout état de cause, il faut expliquer les différentes altitudes de ce niveau.

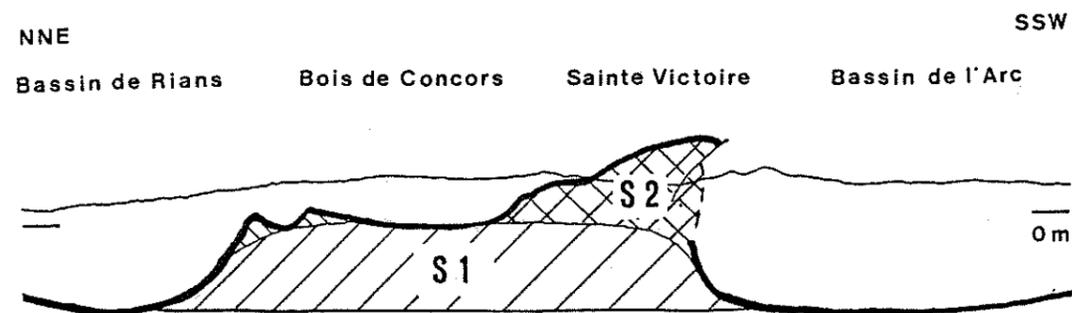


Figure 52 : Evolution latérale de l'altitude de l'Argovien sur une coupe.

- Argovien.
- $S_1$  Surface en excès 1, déformation du premier ordre (Bois de Concors).
- $S_2$  Surface en excès 2, déformation du deuxième ordre (Sainte-Victoire).

### I.2. Les vergences opposées

A l'échelle de la région étudiée, il faut également prendre en compte et rendre compatible les vergences inverses qui se relaient dans l'espace : les chevauchements à vergence Sud [chevauchement du Tholonet ( $\phi_T$ ), de la Sainte-Victoire ( $\phi_{SV}$ ), et de Vauvenargues ( $\phi_{va}$ )] qui dominent à l'Ouest et les chevauchements à vergence Nord [chevauchement de la Gardiole ( $\phi_G$ ) et des Ubacs ( $\phi_U$ )] qui dominent à l'Est. Quelles sont leurs relations lorsqu'ils coexistent sur la même coupe (fig. 55, Coupe 3) ?

### I.3. La signification de certains accidents

A l'échelle des structures de second ordre se posent deux problèmes : la signification de la faille du vallon de Bimont ( $\phi_B$ ) et l'interprétation du chevauchement de la Sainte-Victoire ( $\phi_{SV}$ ).

Rappelons que nous avons fait deux hypothèses pour la faille du vallon de Bimont. Dans l'une, cette faille est initialement un chevauchement à vergence Nord, ensuite basculé pour devenir, comme actuellement, penté Nord. Dans l'autre, cette faille est initialement un chevauchement à vergence Sud plissé qui correspond à l'équivalent vers l'Ouest du chevauchement de la Sainte-Victoire.

## II. Éléments d'interprétation communs aux différentes hypothèses structurales

### II.1. La direction et le sens du déplacement

Les déplacements se font selon une direction N30 du Sud vers le Nord. Le sens de déplacement est celui des mouvements pyrénéo-provençaux. La valeur du déplacement augmente du Nord vers le Sud.

### II.2. Le niveau de décollement

Le plan de glissement principal des différents modèles structuraux est le sommet du Trias gypseux.

### II.3. L'état initial

Quelque soit le schéma envisagé, la série est structurée avant la déformation pyrénéo-provençale. Des variations latérales de faciès et d'épaisseur peuvent être associées à des flexures, dans le socle (failles normales ?), et dans le contexte périalpin, probablement à des failles synsédimentaires dans la série liasique.

## III Interprétation des structures

De part et d'autre d'une coupe centrale, sur laquelle coexistent des chevauchements à vergence opposée, les structures sont fondamentalement différentes : l'une ou l'autre des vergences domine.

Deux hypothèses structurales sont proposées à l'Ouest. L'interprétation structurale de la coupe centrale et des coupes orientales reste identique.

III.1. Interprétation des coupes centrale et orientales

a) Interprétation

Au centre, la structure est interprétée comme un simple pli coffré plus ou moins symétrique, faillé en ses flancs (fig. 53). Dans la mesure où les deux chevauchements à vergence opposée se sont atténués et que seuls les plis associés subsistent. Les chevauchements à vergence Nord et Sud coexistent ( $\phi_U, \phi_{Va}, \phi_{SV}, \phi_T$ ), ils ont une flèche faible. Ils affectent jusqu'à l'Eocène.

A l'Est, une série complète effectue un simple passage en direction du Nord sur une rampe (pro-chevauchement, fig. 53). La rampe correspond en surface à la flexure entre le Jurassique des plateaux de Pourrières et le Crétacé du bassin de l'Arc (fig. 54). Vers l'Ouest, ces chevauchements à vergence Nord : chevauchement de la Gardiole ( $\phi_G$ ), chevauchement des Ubacs ( $\phi_U$ ) diminuent progressivement de flèche. Cette diminution de flèche est compensée par l'apparition du développement croissant de chevauchements à vergence Sud : structure de Bois de Concors (SC) et de la structure de la Sainte-Victoire.

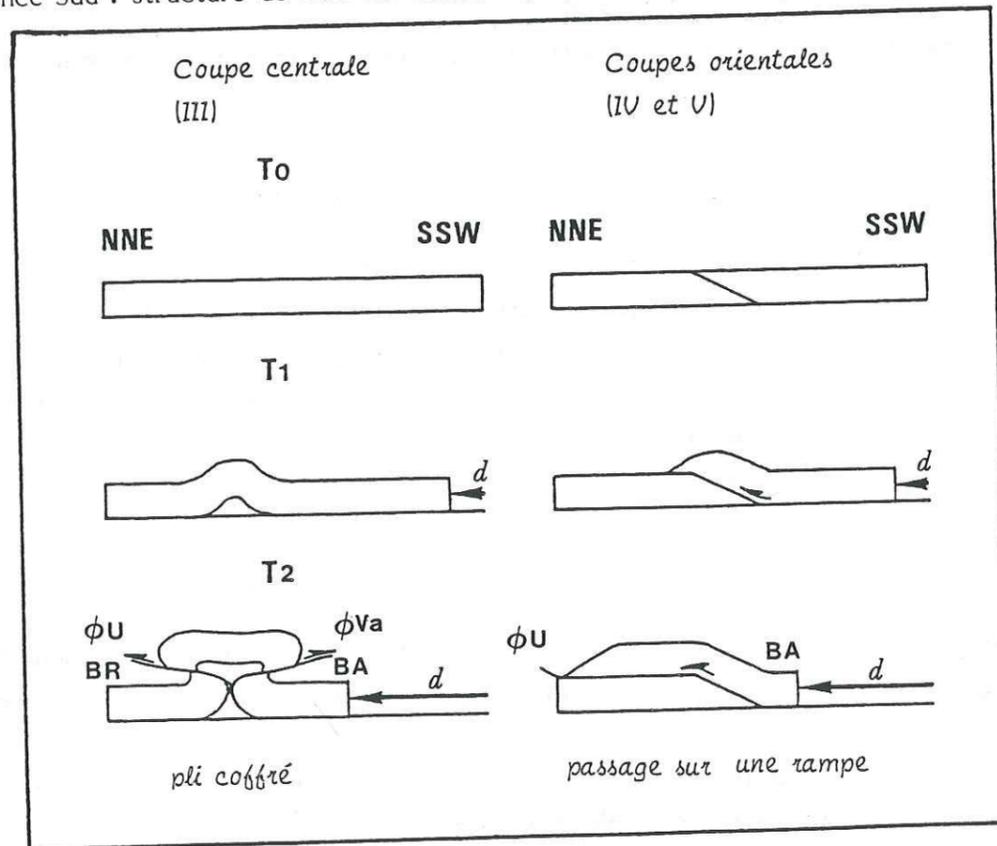


Figure 53 : Interprétation schématique des coupes

$T_0$  = temps initial.  
 $T_1, T_2$  = temps 1 et 2.

$d$  = déplacement

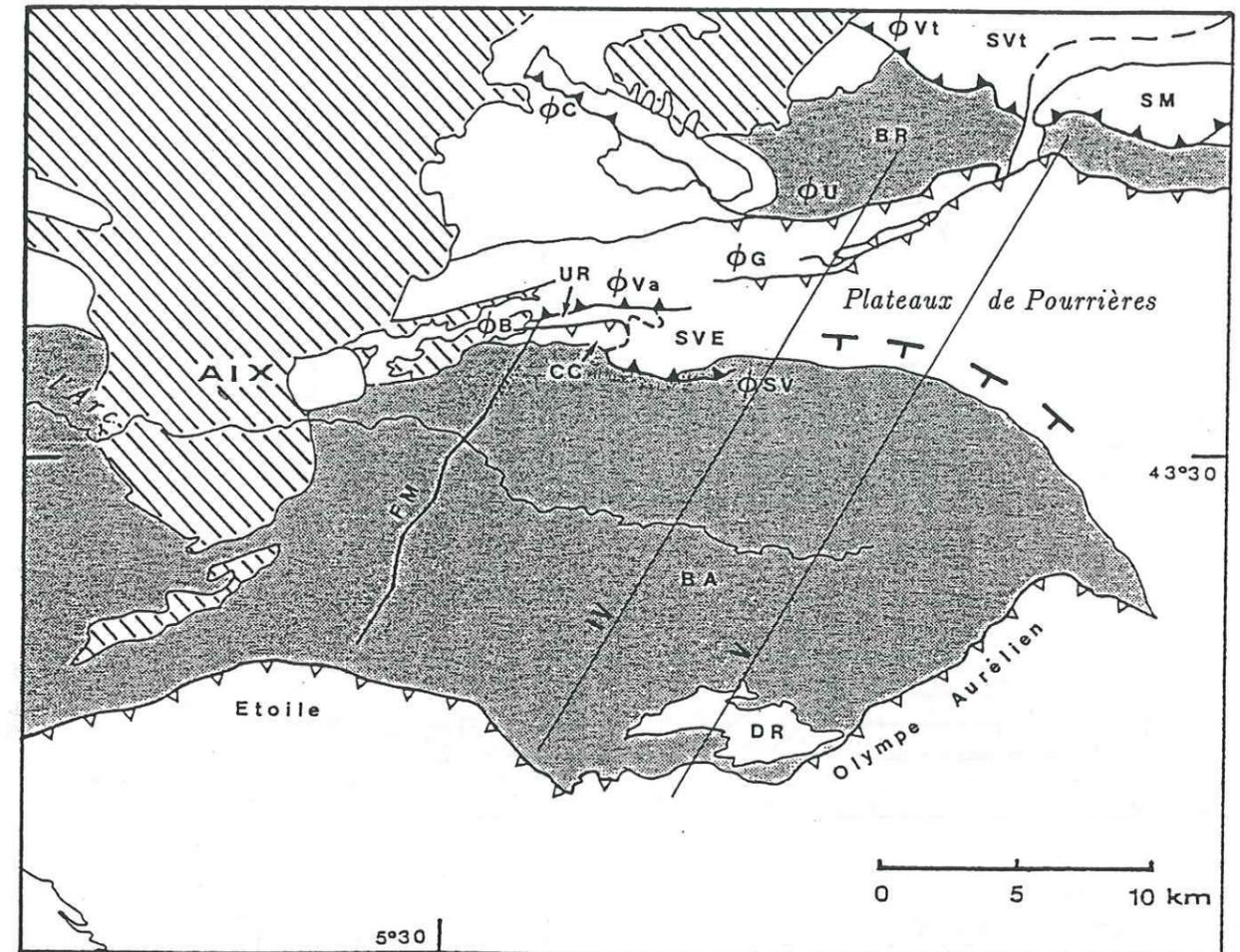


Figure 54 : La rampe des coupes IV et V correspond en surface à la flexure entre le Jurassique des Plateaux de Pourrières et le Crétacé du bassin de l'Arc.

Dénomination des structures :

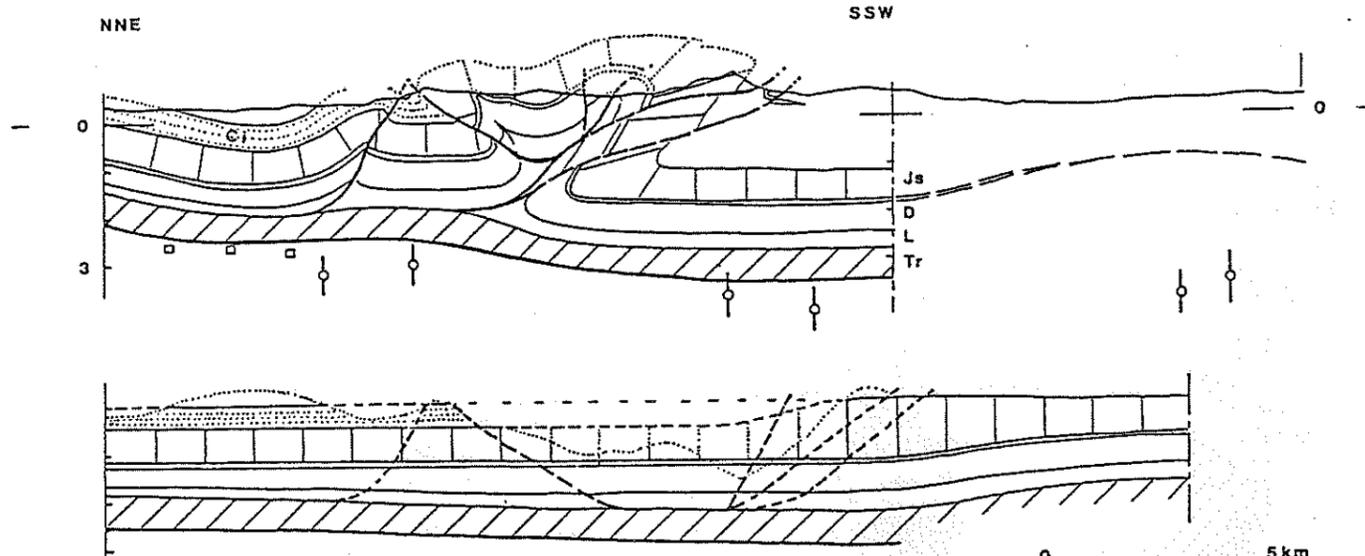
D.R. = dôme du Regagnas, B.A. = bassin de l'Arc, S.V.E. = structure Sainte-Victoire Est, C.C. = Costes Chaudes, U.R. = unité des Reynauds, S.U. = structure des Ubacs, B.R. = bassin de Rians, S.C. = structure du bois de Concors.

Dénomination des chevauchements et des failles :

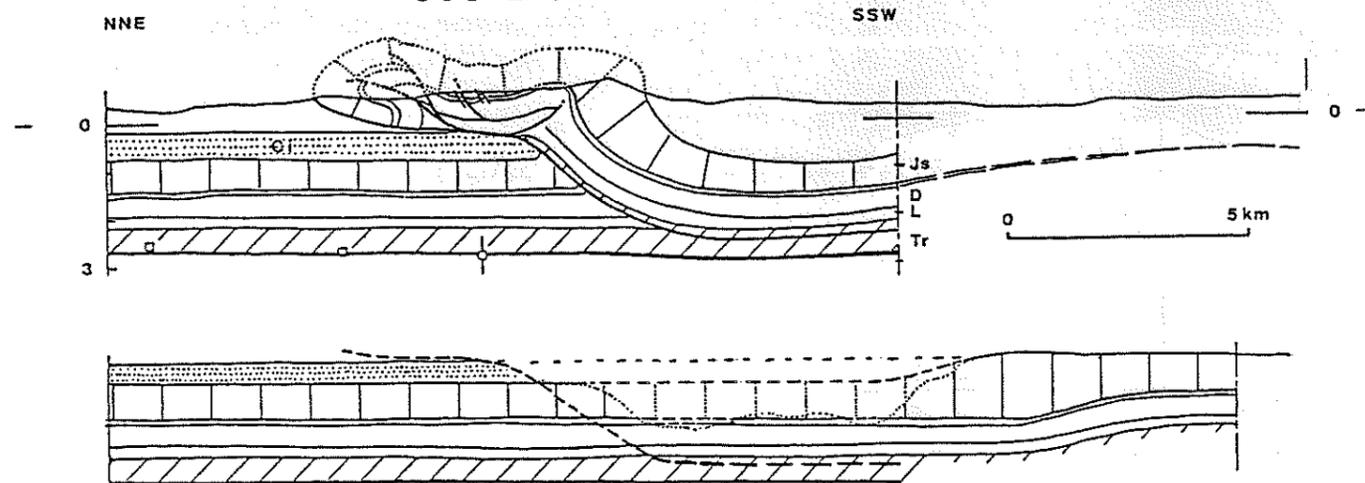
$\phi_{SV}$  = chevauchement Sainte-Victoire,  $\phi_B$  = chevauchement Bimont,  $\phi_{Va}$  = chevauchement Vauvenargues,  $\phi_G$  = chevauchement Gardiole,  $\phi_U$  = chevauchement Ubacs,  $\phi_{Vt}$  = chevauchement Vautubière,  $\phi_C$  = chevauchement de Concors, FM = faille de Meyreuil.

- Terrains discordants
- Eocène et Crétacé supérieur
- Crétacé inférieur et Jurassique

## COUPE III



## COUPE IV



## COUPE V

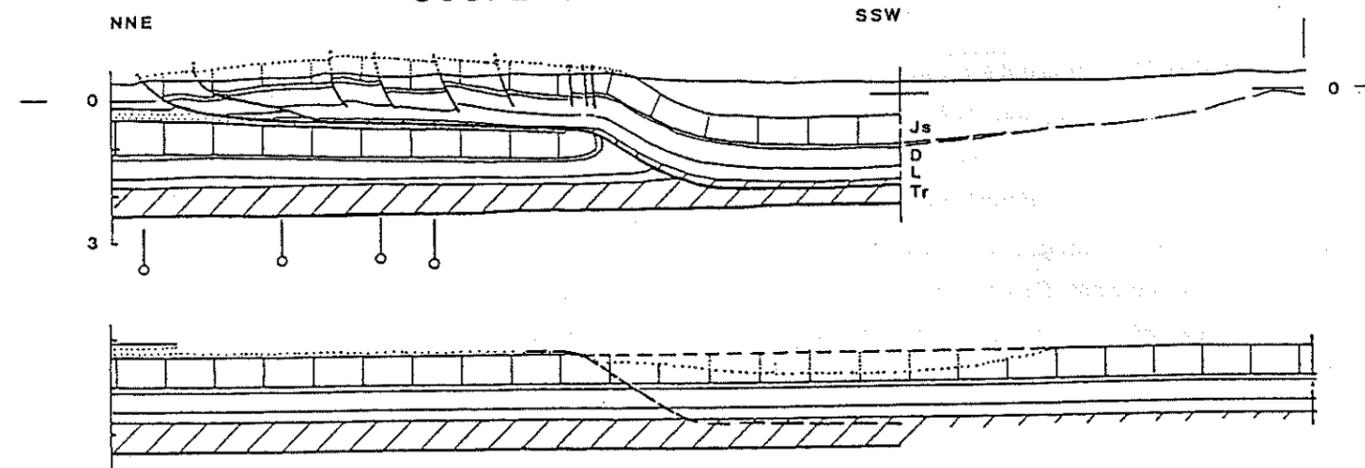


Figure 55 : Coupes équilibrées III, IV et V, un pli coiffé et un simple passage sur une rampe, voir compléments de légende fig. 58.  
Pour chaque coupe : Etat actuel (en haut), état initial au Crétacé moyen (en bas).

## b) Les coupes

Sur la base de cette interprétation, nous avons équilibré les coupes 3, 4, 5 (fig. 55).

III.2. Interprétations des coupes occidentales

Plusieurs hypothèses structurales ont été testées, s'étant révélées non équilibrables, elles n'ont pas été retenues. Il s'agit, par exemple, de redoublements dans le Trias ou du redoublement, sous le Bois de Concors, d'une partie de la série.

1.3.2.1. Hypothèse 1 : Le déplacement d'une série très épaisse sur une flexure de socle

## a) Interprétation

\* Interprétation de structures de premier ordre : bassin de l'Arc (BA), bassin de Rians (BR), structure du bois de Concors (SC)

On postule l'existence d'une flexure de socle à pendage Sud, d'orientation Est-Ouest ou Nord-Ouest - Sud-Est qui aurait provoqué des variations d'épaisseur de l'ordre de 1.4 km. Cela nous amène à supposer des variations d'épaisseur très importantes au cours de la sédimentation liasique, qui devraient être encore sensibles au Dogger et au Callovo-Oxfordien, pour devenir négligeables au Jurassique supérieur (fig. 56). Les évolutions latérales d'épaisseur des niveaux Portlandien et Kimméridgien dans la structure de la Sainte-Victoire Est (SVE) ont une cause différente : l'édification récifale.

Le déplacement de l'ensemble des terrains s'effectue du Sud vers le Nord : la série très épaisse initialement au Sud de l'accident de socle est transportée sous le bois de Concors et explique la surélévation du Jurassique supérieur dans cette zone. Le bassin de Rians (BR) correspond à la série mince située au Nord de la flexure. La subsidence du bassin de l'Arc (BA) est liée au déplacement de la couverture sur un socle penté vers le Nord.

Vers l'Est, la marche de socle s'atténuerait et disparaîtrait. L'évolution latérale des structures et la différence de comportement entre l'Est et l'Ouest serait donc liées à la présence à l'Ouest d'une flexure et d'une série Sud épaisse.

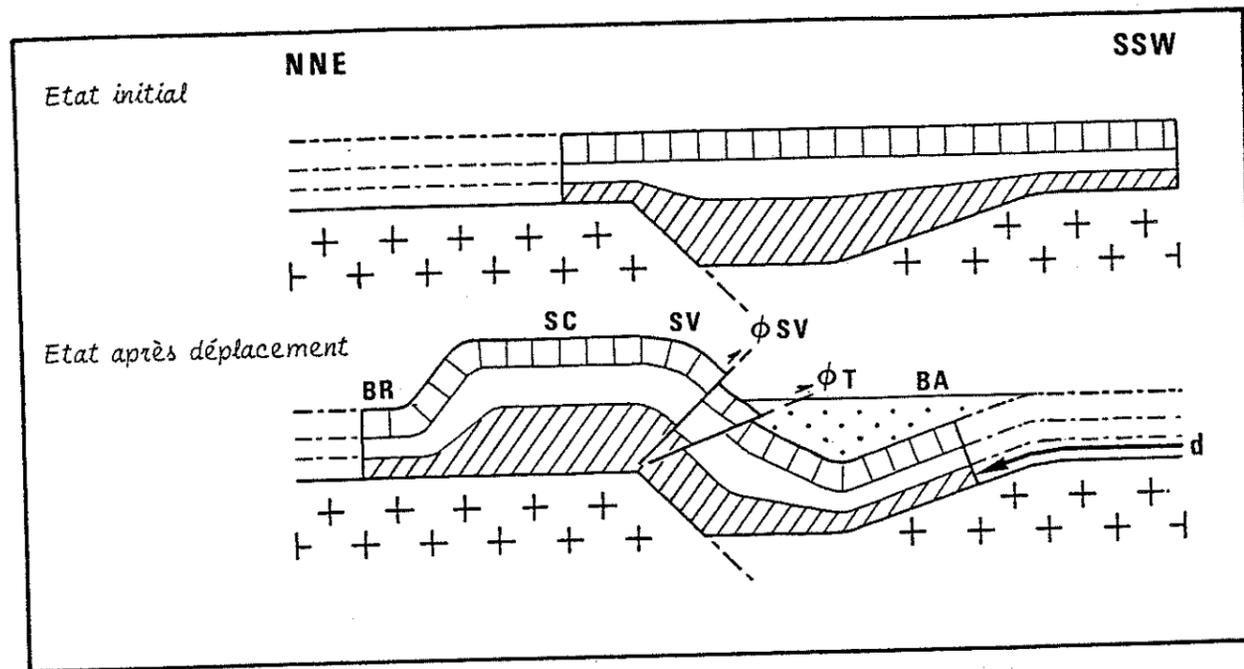


Figure 56 : Le déplacement d'une série très épaisse sur une faille normale de socle.  
d = déplacement

-  Eocène et Crétacé supérieur
-  Jurassique supérieur
-  Jurassique moyen
-  Jurassique inférieur

\* Interprétation des structures de second ordre : chevauchement de Vauguenargues ( $\phi_{Va}$ ), chevauchement de la Sainte-Victoire proprement dite ( $\phi_{SV}$ ), chevauchement du vallon de Bimont ( $\phi_B$ ).

La faille du vallon de Bimont est ici interprétée comme un chevauchement à vergence Sud, plissé qui se raccorde au Nord, au chevauchement de Vauguenargues (fig. 58). Rappelons que cette interprétation correspond au cas où la faille est plus pentée que la stratification.

Dans cette hypothèse structurale, les chevauchements à vergence Sud pourraient être interprétés comme des accidents qui permettent d'accommoder le passage sur la rampe. De telles structures sont décrites dans les modèles de J.F. BALLARD et J.P. BRUN (1987, fig. 57).

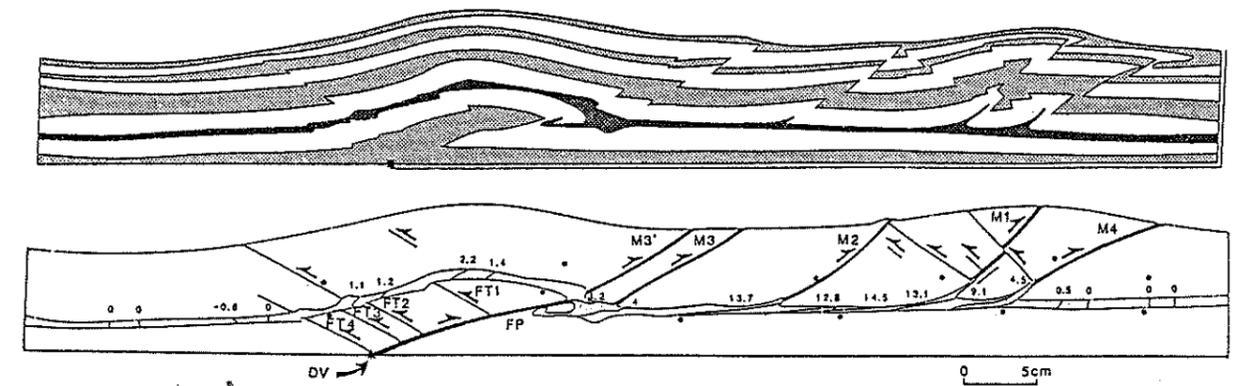


Figure 57 : Modèle analogique d'après J.F. Ballard (1987). Des failles accommodent le passage sur la rampe.

L'analogie n'est, au moins dans la cinématique, pas forcément parfaite. En effet, dans les modèles de J.F. Ballard, ces failles naissent au bas de la rampe et sont basculées lors de leurs montées sur la rampe. Comparativement à la valeur du pro-déplacement global sur la rampe, chacune de ces failles implique de très faibles valeurs de rétro-déplacements. Dans le cas de la Sainte-Victoire, le rétro-déplacement est relativement important.

#### b) Les coupes

Sur la base de cette interprétation, nous avons équilibré la coupe 2 (fig. 58).

#### c) Discussion

\* Ce schéma structural a l'avantage d'être simple tout en proposant une interprétation de l'ensemble des structures observées. De surcroît, il est compatible avec les données sismiques recueillies. Rappelons que celles-ci ont permis de mettre en évidence :

- au Nord de la Sainte-Victoire, un socle haut à 3 km de profondeur,
- au Sud, un socle plus profond vers 4 km de profondeur.

L'existence d'une marche de socle d'orientation Est-Ouest ou Nord-Ouest - Sud-Est est envisageable.

Vers l'Est, les études de sismique ont montré que le marqueur voisin du toit du socle était rencontré à une profondeur moyenne de 3.3 km. L'atténuation, voire la disparition de cette marche de socle vers l'Est est donc plausible.

\* Cette interprétation soulève deux problèmes :

En Provence, de telles variations d'épaisseur de la série Jurassique inférieur et Jurassique moyen semblent considérables (1.4 km) et n'ont jamais été décrites. Cela n'exclut pas pour autant leur existence ; des variations similaires du Lias sont connues dans d'autres régions comme le bassin de Bourg d'Oisans plus au Nord. En outre, l'image communément admise de la sédimentation liasique dans cette région est incomplète et mal documentée.

La détermination de la direction de la faille de socle pose une deuxième question. La limite entre la série mince et la série épaisse transportées qui contrôle la structure de Concors est orientée Nord-Ouest Sud-Est. Or on ne retrouve pas trace, plus au Sud, du passage sur la faille de socle qui devrait s'exprimer par une flexure d'orientation identique (dans l'hypothèse d'une translation de la série vers le Nord-Est). La seule zone pouvant traduire le passage sur la faille de socle étant la zone de failles Est-Ouest de la Sainte-Victoire, il faut alors envisager que le déplacement vers le Nord-Est s'est accompagné d'une rotation horaire très importante (35°, fig. 59).

Aucun de ces arguments ne permet cependant d'exclure définitivement l'hypothèse structurale avancée.

### III.2.2 Hypothèse 2 : une écaille intracutanée compliquée par un duplex

#### a) Interprétation des structures.

Dans cette hypothèse, la structure du bois de Concors (SC) s'explique par le redoublement d'une série complète réduite. Une écaille intracutanée glisse sur les niveaux incompetents du Trias et s'enfonce sous la structure de Concors qui se soulève passivement (fig. 60a, fig. 61, coupe 1 et 2). C'est le chevauchement à vergence Sud de Vauvenargues

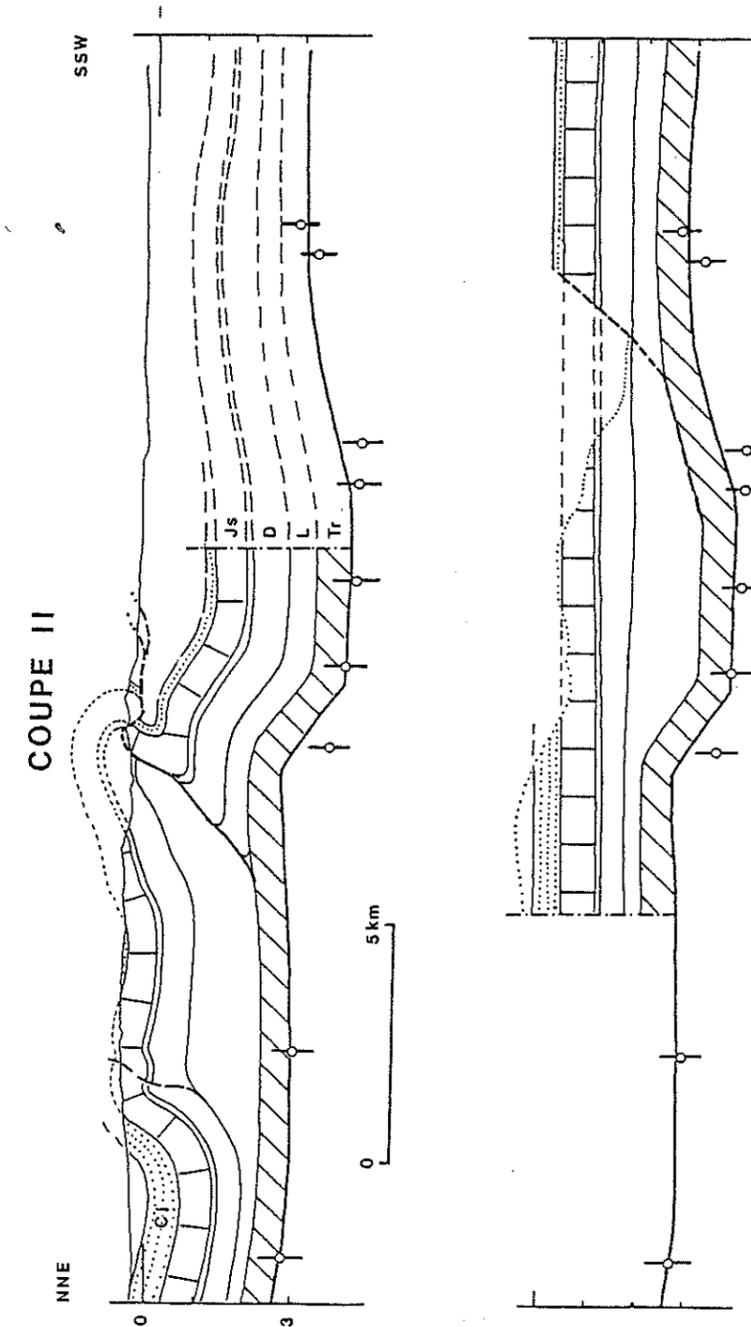


Figure 58 : Coupe équilibrée II, le déplacement d'une série très épaisse sur une flexure de socle. CI = Crétacé inférieur, JS = Jurassique supérieur, D = Dogger, L = Lias, TR = Trias ; □ = profondeur du socle, données pétrolières, ○ = profondeur du socle, données de sismologie expérimentale (réflexion), ○ = profondeur du socle, données de sismologie expérimentale (réfraction).  
Pour chaque coupe : Etat actuel (en haut), état initial au Crétacé moyen (en bas).

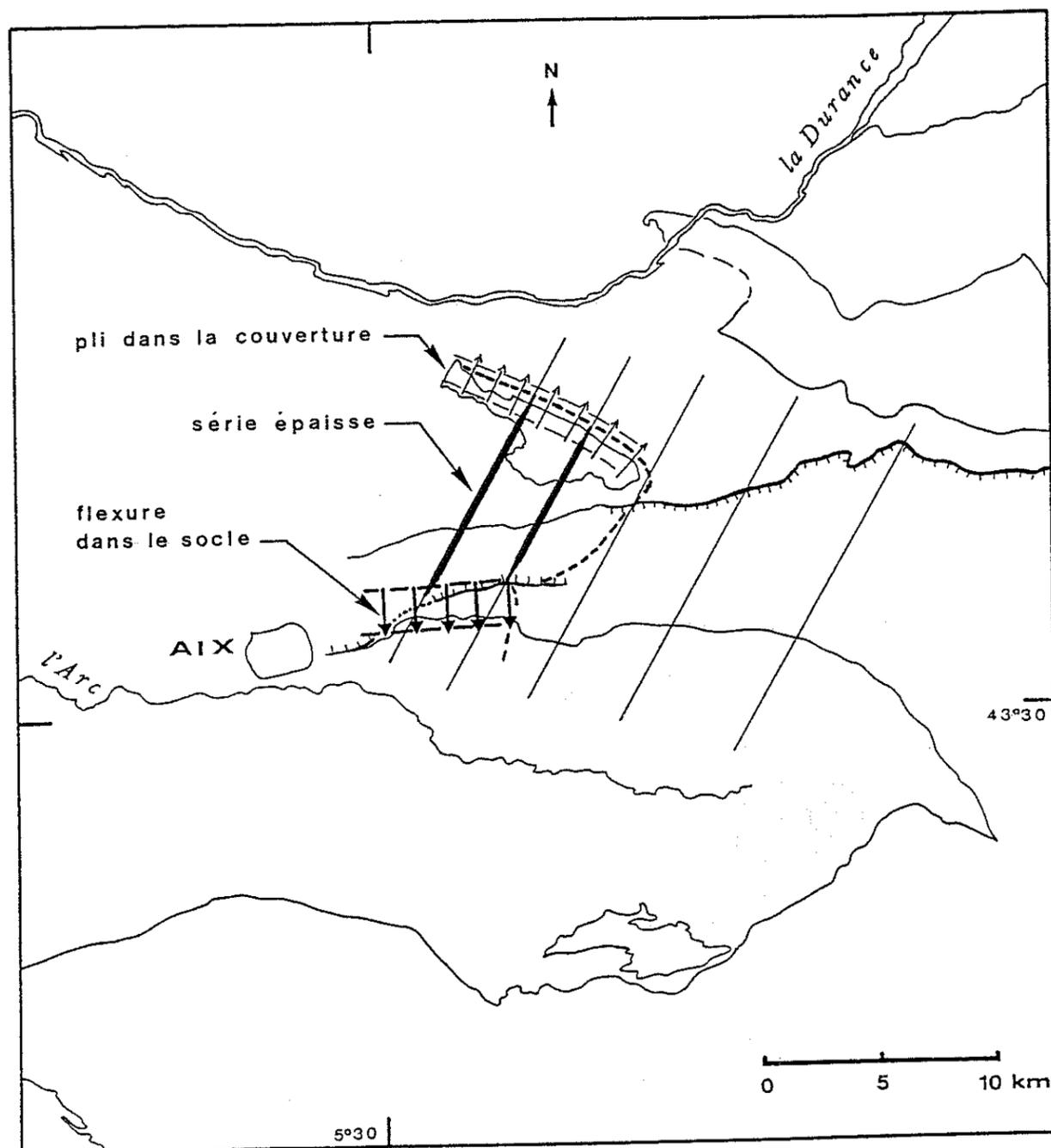


Figure 59 : Schéma du dispositif avec une flexure de socle de direction Est - Ouest. La série épaisse initialement au Sud de la flexure a été transportée. Il faut envisager une rotation horaire importante.

( $\phi_{Va}$ ) qui limite l'ensemble de la série soulevée. La largeur de l'écaïlle correspond grossièrement en carte à la largeur de la structure de Concors (fig. 50). Elle diminue très rapidement vers le Sud-Est, pour disparaître complètement au niveau de la terminaison périclinale du pli Concors. Le bassin de Rians se moule sur la limite Nord de l'écaïlle sous-jacente. Les bassins (bassin de Rians : BR et bassin de l'Arc : BA) sont considérés comme les bassins syntectoniques d'avant-pays. Au dispositif classique de flexion, contrôlant la subsidence de ce type de bassin, se superpose le développement de structures anticlinales (Sainte-Victoire, bois de Concors)(fig. 60) qui interrompent la continuité des dépôts.

La faille de Bimont ( $\phi_B$ , structure de deuxième ordre) est interprétée comme un chevauchement à vergence Nord (fig. 60a, fig. 61, coupe 1 et 2) et recoupée par des chevauchements à vergence Sud ( $\phi_{Va}$ ,  $\phi_T$ ). Rappelons que cette interprétation correspond au cas où la faille est moins pentée que la stratification.

A l'Est, seules les structures à vergence Nord se développent (fig. 60c, fig 61, coupe 4 et 5). Cela implique que les chevauchements à vergences inverses fonctionnent de façon synchrone. Au temps T2, à l'Ouest, l'essentiel du raccourcissement est absorbé par le chevauchement à vergence Sud et le pro-chevauchement a une flèche faible. A l'Est, la totalité de la déformation est enregistrée par le chevauchement à vergence Nord (fig. 60c).

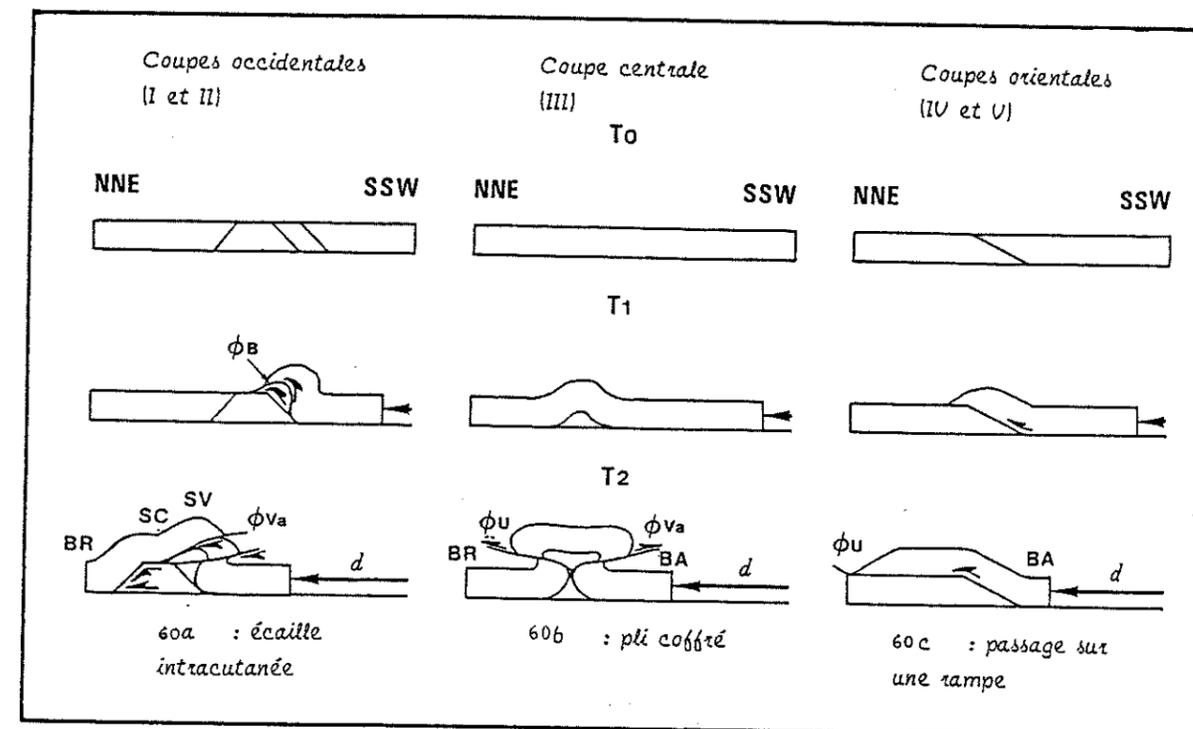


Figure 60 : Interprétation des coupes.

Les chevauchements à vergence inverse ont fonctionné de façon synchrone.

$T_0$  = temps initial

$T_1, T_2$  = temps 1 et 2.

$d$  = déplacement

b) Les coupes

Sur la base de cette interprétation, nous avons équilibré les coupes 1 et 2 (fig. 61).

c) Discussion

Cette hypothèse implique - comme dans l'hypothèse précédente - des rotations importantes pour passer d'une direction Est-Ouest (direction du chevauchement de Vauvargues) à une direction Nord-Ouest Sud-Est (direction de la structure de Concors). Ces rotations affectent le compartiment "enfoncé en coin" sous le bois de Concors (fig. 62).

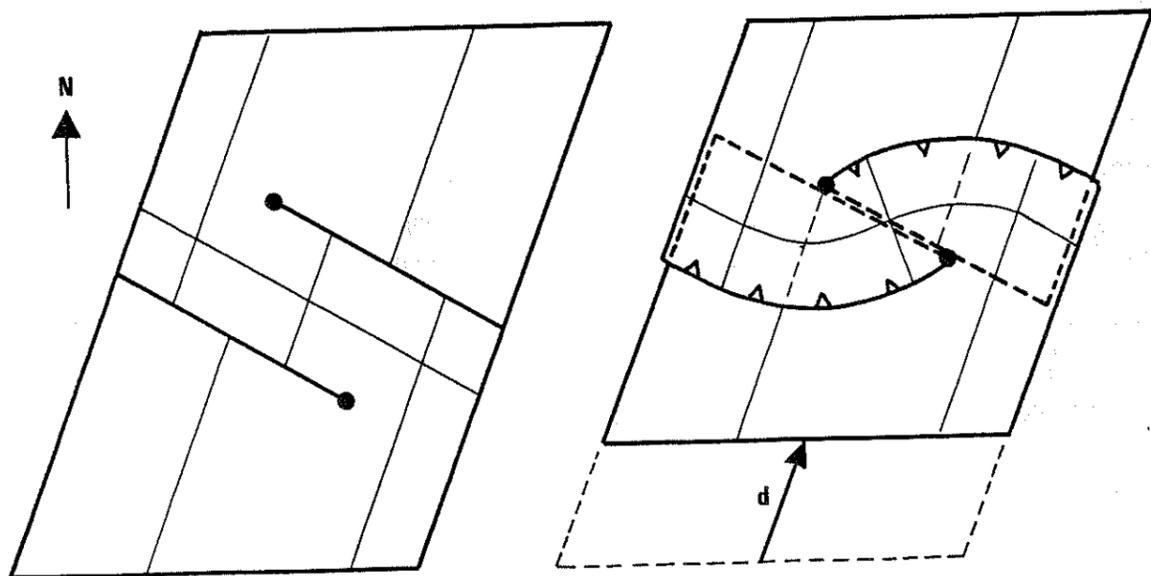


Figure 62 : Schéma des relations entre chevauchement à vergence Nord et chevauchement à vergence Sud.

d = déplacement

- discontinuité contrôlant les chevauchements
- repère passif en surface
- - - repère passif caché sous le chevauchement
- ▲ chevauchement

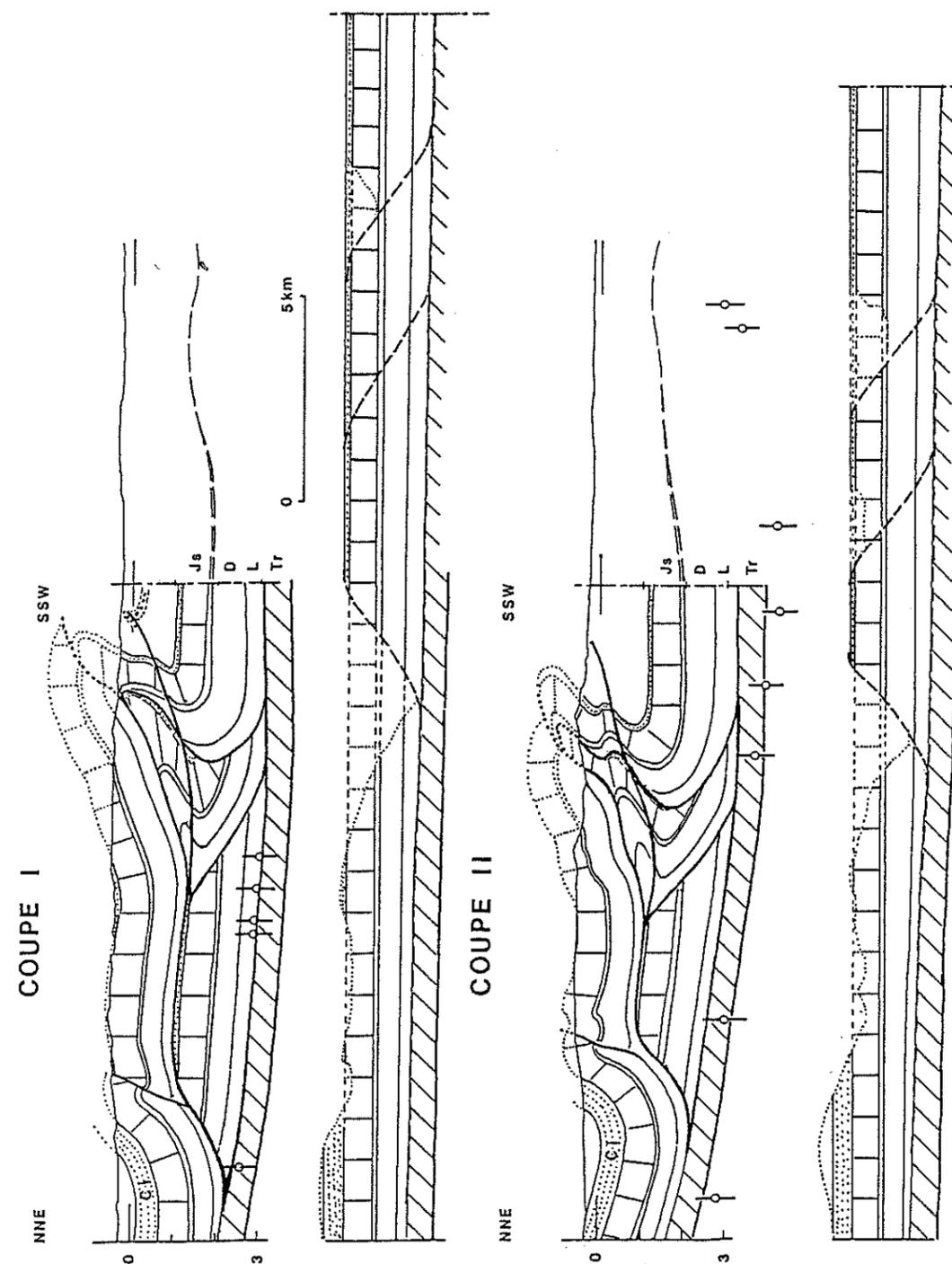


Figure 61 : Coupes équilibrées I et II, une écaïlle intracutanée. Cl = Crétacé inférieur, JS = Jurassique supérieur, D = Dogger, L = Lias, TR = Trias ; □ = profondeur du socle, données pétrolières, ○ = profondeur du socle, données de sismologie expérimentale (réflexion). Pour chaque coupe : Etat actuel (en haut), état initial au Crétacé moyen (en bas).

#### IV. Evolution latérale du raccourcissement

Il est important de noter que la limite septentrionale des coupes (bassin de Rians) n'est pas une limite fixe. Un raccourcissement, plus ou moins important, est absorbé au Nord de cette limite.

A l'échelle de la Provence, on peut néanmoins considérer que le raccourcissement varie peu d'Est en Ouest. Le fort raccourcissement (12 à 14 km) observé sur les coupes occidentales (CI et CII, fig. 61) est complété au Nord par un faible raccourcissement (moins d'un kilomètre) lié à un simple pli, celui de Pont-de-Mirabeau. Le raccourcissement plus faible (6 à 8 km) des coupes centrale et orientales (CIII, CIV et CV, fig. 55) est lui, complété au Nord par un raccourcissement plus important (environ 4 km) lié au chevauchement de la montagne Vautubière (fig. 63).

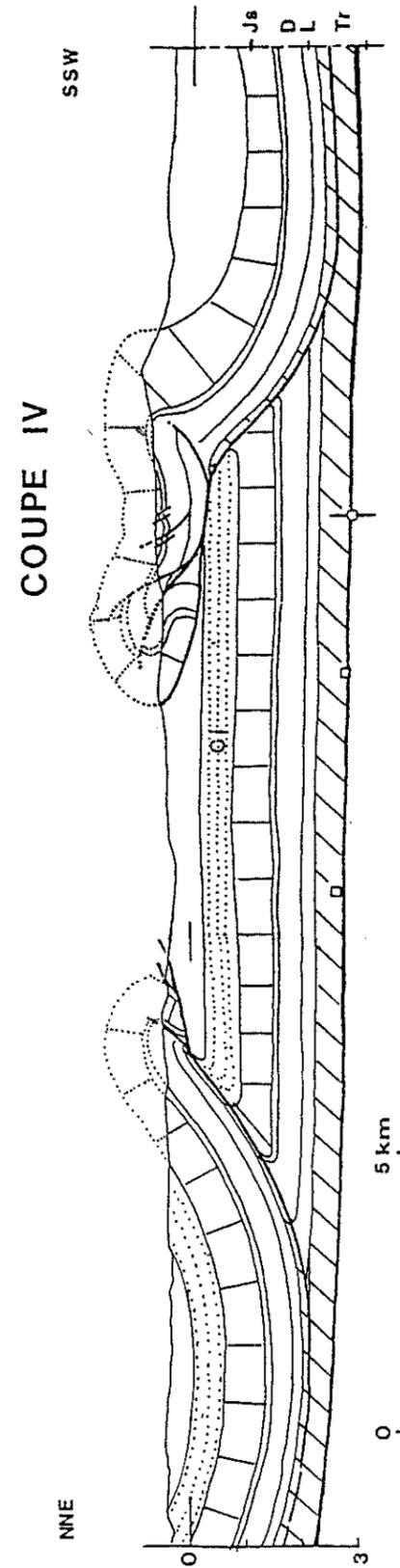


Figure 63 : Coupe IV - un simple passage sur une rampe au Sud (structure des Ubacs, Sainte-Victoire Est) une écaille intracutanée au Nord (structure de la Vautubière). CI = Crétacé inférieur, JS = Jurassique supérieur, D = Dogger, L = Lias, TR = Trias ; □ = profondeur du socle, données pétrolières, ◊ = profondeur du socle, données de sismologie expérimentale pour la réflexion.

Pour chaque coupe : Etat actuel (en haut), état initial au Crétacé moyen (en bas).

*TROISIEME PARTIE*

**INTERPRETATION MECANIQUE**

**DES STRUCTURES**

Pour une bonne prévision de l'évolution en profondeur de structures visibles en surface, comme pour l'interprétation de coupes sismiques, la définition des conditions d'apparition et de développement des chevauchements est un objectif majeur. Le but général de cette étude est de définir les mécanismes de déformation et les modalités d'amortissement de systèmes chevauchants, particulièrement dans l'avant-pays de chaînes de collision. Nous avons donc cherché à reconnaître les paramètres les plus importants qui ont pu imposer successivement la localisation, le pendage et la vergence de ces chevauchements. Concernant cette dernière, nous utiliserons les termes de pro-chevauchement et de rétro-chevauchement pour qualifier des déplacements sur des rampes qui sont respectivement conforme et contraire au sens de déplacement du compartiment mobile (fig. 64).

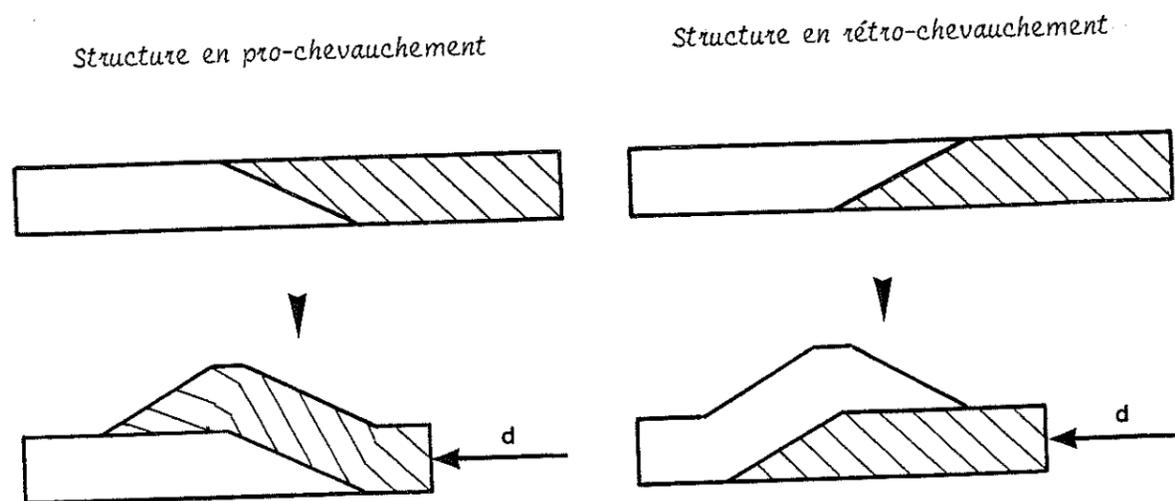


Figure 64 : Structures en pro-chevauchement et en rétro-chevauchement pour un déplacement identique du même compartiment mobile.

$d$  = déplacement

▨ Compartiment mobile

Il a d'abord été nécessaire de décrire très précisément la géométrie et la cinématique de tels chevauchements dans un secteur où deux vergences opposées (pro et rétro chevauchement) pouvaient être observées. Des géométries interprétatives ont été données dans le chapitre précédent. L'objet de ce dernier chapitre est maintenant de proposer une interprétation mécanique des conditions "vraisemblables" de formation de ces structures. Cette interprétation permettra d'indiquer quels sont les paramètres qui jouent un rôle dans le développement des chevauchements. Elle permettra aussi d'évaluer leur importance relative et leur effet sur la vergence de ces chevauchements.

Dans le cas particulier qui nous intéresse, à savoir des failles de chevauchement (rampes) qui vont se raccorder à une surface de décollement relativement horizontale (palier), on peut distinguer plusieurs types de problèmes : la localisation du niveau de décollement en palier, la localisation et le pendage des rampes, le développement des chevauchements avec une vergence dépendante des conditions de déformation.

Les problèmes de localisation (niveau du palier ou situation des rampes) sont difficiles à discuter directement sur l'exemple de la région étudiée puisque les niveaux de décollement restent toujours cachés en profondeur. Cette partie a donc été traitée en faisant référence à des travaux théoriques ou expérimentaux. Par contre, pour ce qui concerne les problèmes de vergence des chevauchements, la description précise de structures à vergence opposée et l'observation de leur évolution latérale a permis de proposer des modèles numériques d'évolution des structures basés sur le principe du calcul de l'énergie minimale dissipée dans la déformation. L'idée est qu'il existe, dans certaines conditions de déformation, une vergence plus rentable du point de vue de l'énergie consommée.

## I. Localisation des chevauchements

### I.1. Profondeur des paliers de décollement

La première condition d'apparition d'un système chevauchant en paliers et rampes est l'existence en profondeur d'un niveau de décollement qui présente le minimum de résistance au cisaillement pour des conditions données, pouvant bien sûr varier latéralement et avec la profondeur. Dans la région étudiée, ce palier de décollement semble localisé au niveau des formations triasiques de gypse-anhydrite. Les seules coupes équilibrées viables du point de vue des données géologiques et sismiques impliquent un décollement à la base du Lias (voir chapitre précédent).

On ne peut cependant pas tirer beaucoup d'indications sur les conditions mécaniques du développement de ce décollement, dans la mesure où les relations contrainte/déformation pour l'anhydrite sont plutôt complexes (NICOLAS et POIRIER, 1976). Ainsi, ce que l'on peut appeler le seuil de plasticité d'un agrégat polycristallin d'anhydrite dépend beaucoup de la vitesse de déformation, avec une évolution des mécanismes de déformation d'un comportement de type plastique (fluage par glissement sur dislocations à grande vitesse de déformation) à un comportement de type visqueux (fluage par dissolution-cristallisation à faible vitesse de déformation, en présence d'eau).

Les relations contrainte/déformation pour ce dernier type de fluage à des vitesses géologiques  $10^{-15} \text{ s}^{-1}$  ne sont pas connues. Le premier cas a été mieux étudié notamment par Muller et Giernes (1974), mais ces auteurs montrent que le seuil de plasticité n'évolue pas de la même manière avec la température selon l'intensité de la déformation (voir discussion sur le problème des barrières, § suivant).

Pour toutes ces raisons, la meilleure approche pour comprendre les problèmes de localisation du palier de décollement nous semble être une expérimentation analogique. Des discussions avec l'équipe de J.P. Brun nous conduisent à proposer de tester un système relativement simple, composé de deux matériaux dont l'évolution du seuil de plasticité varierait avec la profondeur et que l'on devrait déformer par poussée latérale, sur un niveau de décollement potentiel incliné (fig. 65). Dans un tel système, l'évolution contrastée avec la profondeur des deux types de matériaux, l'un au comportement de type Mohr-Coulomb (sable) – courbe en pointillé (fig. 65a) – l'autre au comportement de type plastique – courbe en tireté (fig. 65b) – devrait conduire à observer et à déterminer une profondeur minimale pour que le décollement puisse s'engager sur le niveau plastique de base.

Pour ce qui concerne l'application de ce principe au cas des chevauchements dans la Sainte-Victoire, on remarquera simplement que sur un plan incliné de quelques degrés à pendage Sud (limite socle/couverture), on a bien un décollement généralisé à la base sur le gypse jusqu'à une profondeur minimale de l'ordre de 1 km. Cette profondeur peut être estimée par la situation de la bifurcation palier-rampe du chevauchement le plus externe, c'est-à-dire celui de Gréoux (C. TEMPIER, 1987).

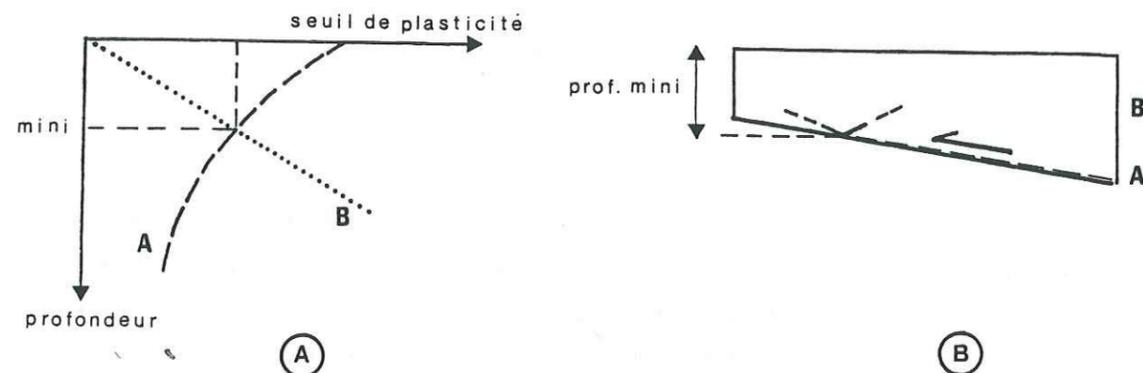


Figure 65a : Comparaison de l'évolution, avec la profondeur, du seuil de plasticité de deux matériaux.

A : matériau plastique.

B : matériau granulaire, comportement de type Mohr-Coulomb.

Figure 65b : Il existe une profondeur minimale pour qu'un décollement s'engage sur le niveau plastique de base.

## I.2. Situation et pendage des rampes

Comme dans le cas précédent, il est difficile de discuter de ce problème sur l'exemple de la région étudiée puisque les branchements rampe-palier n'y sont jamais observables. Cette discussion sera donc basée sur une compilation de travaux théoriques et expérimentaux.

D'un point de vue général, pour ce qui concerne la situation et le comportement de failles secondaires branchées sur une faille principale, deux approches doivent être distinguées :

\* une approche dynamique a été développée notamment par des mécaniciens de la rupture (BIENIAWSKI, 1967) puis reprise et adaptée par les sismologues (AKI et al., 1987). Cette approche considère l'initiation et la propagation des failles secondaires comme liées directement à la propagation du mouvement sur la fracture principale. Des structures en fourches sont ainsi observées avec toujours le même sens de déplacement sur les failles principales et secondaires (fig. 66).

\* une approche statique doit être envisagée pour expliquer des sens de mouvement inverse, entre failles principales et failles secondaires, observés en maintes régions y compris dans la région étudiée (fig. 50).

Ces deux approches sont donc brièvement présentées ci-après :

### 1.2.1. Approche dynamique

Les travaux théoriques et expérimentaux sur l'initiation et le développement de fractures en branches à partir d'une fracture rectiligne (fig. 66) conduisent à considérer que dans un matériau initialement homogène, ce type de fracture est un moyen de dissipation d'énergie lors d'une propagation rapide (BIENIAWSKI, 1967). Dans le cas de déformations naturelles, Beach (1980) estime que ces terminaisons en fourche pourraient traduire plutôt une brusque dissipation de l'énergie des fluides sous pression lors de fracturations hydrauliques. Ceci, en postulant que de brusques changements des valeurs de pression fluide sont plus faciles à concevoir dans la nature que de brusques changements des valeurs de contrainte. Mais des ruptures sismiques peuvent évidemment être associées à de tels changements de contraintes. Ce type d'approche conduit donc à associer, un brusque changement de direction dans la propagation des failles, à des instabilités de propagation de fracture et notamment lors de l'amortissement ou de l'arrêt des ruptures. Aki et al. (1987) ont ainsi montré, par l'analyse de nombreux séismes, que dans la majorité des cas, que le point d'initiation d'une rupture sismique est situé dans une partie déjà fracturée et rectiligne (zone de moindre résistance au cisaillement), alors que le point d'arrêt de cette rupture est situé à l'extrémité de la faille principale et qu'il est souvent associé à une brusque bifurcation de la direction de fracture conduisant à des structures fourchues.

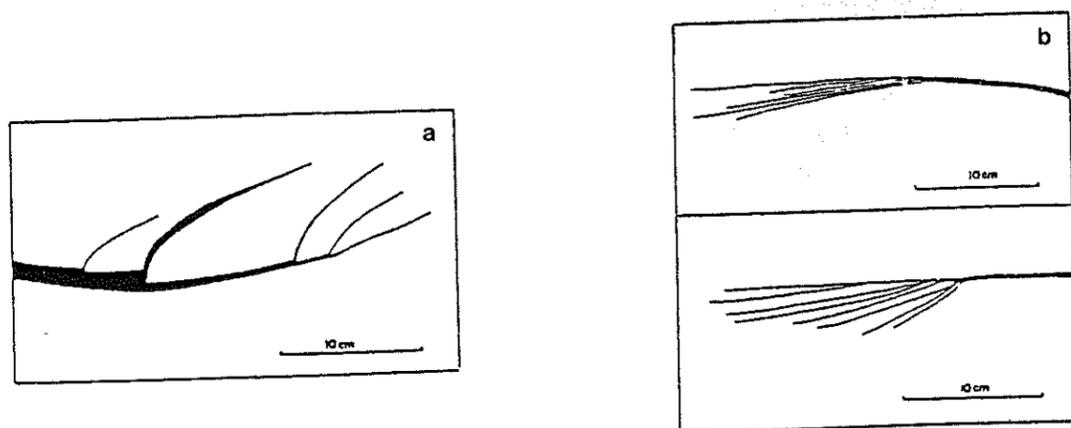


Figure 66 : Fractures en branches sur une faille principale, exemples naturels d'après Beach (1980).

Pour une application aux ruptures naturelles, il faut, en plus, faire la part de l'effet des hétérogénéités des propriétés mécaniques le long du niveau de glissement potentiel. Cette approche a été développée en sismologie par Aki (1984), par la définition des notions de barrière et d'aspérités. Dans le cas de fractures branchées sur un niveau de décollement Ballard, Brun et Van Den Driessche (1987) ont discuté de l'effet de telles hétérogénéités le long du niveau de décollement. Tous ces auteurs montrent bien que la simple présence d'une hétérogénéité ne se traduit pas toujours par le même comportement. Selon la valeur de l'énergie disponible pour la propagation et selon les propriétés mécaniques et la taille de la zone de "barrière" ou d'aspérités" trois cas peuvent schématiquement être distingués (fig. 67) :

- L'énergie disponible est relativement faible, alors une "barrière" arrête la rupture (fig. 67a).

- L'énergie disponible est relativement forte, alors selon sa taille (et son comportement), une "barrière" peut induire une bifurcation de fracture (barrière assez résistante, fig. 67b) ou la rupture peut sauter cette barrière et se poursuivre sur une fracture sans changement de direction (barrière peu importante, fig. 67c).

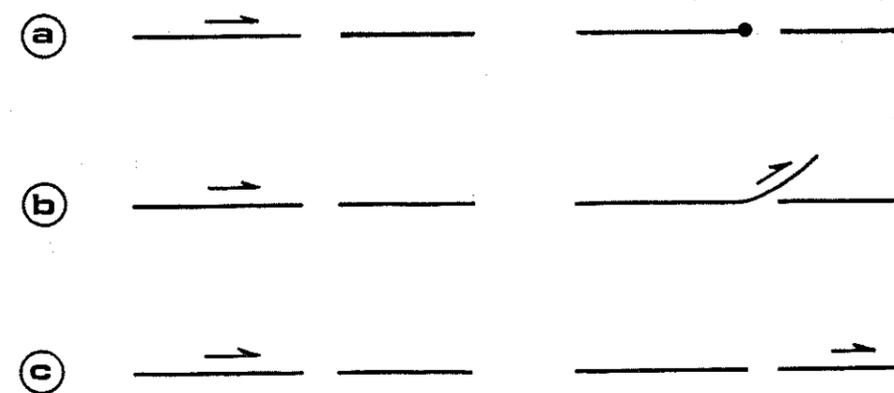


Figure 67 : Selon la valeur de l'énergie disponible pour la propagation d'une fracture à travers une barrière, trois cas peuvent se produire.

fig. 67a : arrêt de fracture rectiligne

fig. 67b : développement d'une fracture secondaire en branche

fig. 67c : saut de la barrière et poursuite de la faille rectiligne.

Cette notion d'hétérogénéités de glissement appliquée à l'initiation des rampes sur des niveaux de décollement pourrait être liée à des hétérogénéités initiales (antérieures à la déformation) ou bien acquises au cours de cette déformation. Dans le premier cas, une variation latérale d'épaisseur de gypse (associée à des failles, d'anciens reliefs ou des érosions locales), voire la disparition complète de cette couche pourrait effectivement se traduire par l'une des trois possibilités citées dans la figure 67. Dans le cas d'hétérogénéités induites par la déformation, il faut également prendre en compte des variations d'épaisseur (bourrage le long de surface irrégulière de décollement). Mais il faut souligner aussi que les propriétés d'écrouissage de l'anhydrite, par exemple, dépendent à la fois des valeurs de sa déformation et de la température. Selon Muller et Sierres (1974), entre 25 et 300°C, le seuil de plasticité décroît lorsque la température augmente pour des déformations inférieures à 5%. Par contre, ce seuil de plasticité s'accroît avec l'augmentation de température pour des déformations de plus de 15%. Ce comportement curieux peut à lui seul induire des instabilités de propagation des décollements (et donc parfois initier des rampes) par effet conjugué (auto-amplifié) de l'augmentation de température et de l'accroissement des valeurs de déformation lors de la propagation des glissements. L'analyse de tels systèmes pourrait conduire à définir une périodicité ou une pseudo-périodicité des bifurcations dans le cas de systèmes simples.

Le problème de l'initiation des rampes doit enfin être discuté, non seulement pour ce qui concerne leur bifurcation avec le palier de décollement, mais également de leur propagation à travers des séries d'épaisseur kilométrique. L'apparition d'une fracture de quelques dizaines, voire quelques centaines de mètres, branchée sur le niveau de décollement et éventuellement associée à sa propagation ne va pas forcément impliquer le développement d'une rampe. On touche ici probablement les limites d'une analyse dynamique qui implique une association dans le temps entre le fonctionnement d'un niveau de décollement et l'initiation des rampes. On peut aussi concevoir que ces deux phénomènes sont séparés dans le temps ce qui justifie une approche statique de l'étude de la structure des failles au-dessus d'un niveau de décollement.

### 1.2.2. Approche statique

A partir du moment où l'on ne considère plus que l'initiation des rampes doit être liée à la propagation du palier de décollement, différents réseaux de failles préexistantes sont susceptibles par coalescence d'évoluer en rampes. Pour restreindre la discussion, nous nous contenterons de présenter quelques exemples de réseaux de fractures susceptibles d'apparaître en association avec des déplacements liés aux chaînes de collision, plus particulièrement dans le cas de poussée arrière.

Nous considérerons tout d'abord une couverture décollée sur son socle d'épaisseur constante. Deux cas très simples peuvent être distingués (fig. 68) :

a) Le frottement à la base et sur la butée avant verticale est très faible, voire quasi nul (glissement facile). Une poussée arrière doit se traduire dans la couverture par l'apparition de deux types de failles inverses conjuguées et symétriques par rapport à l'horizontale, leurs pendages étant fonction des propriétés mécaniques de cette couverture. Par exemple, si cette couverture a le comportement décrit par la loi de Mohr-Coulomb, le pendage des failles dépend de l'angle de frottement interne du matériau.

b) Le frottement à la base est très fort (glissement impossible) et l'avant est libre. Une poussée arrière se traduit par un cisaillement simple de cette couverture avec développement de fractures selon la disposition décrite par Riedel (1929).

Sur la figure 68c a été rappelé, pour comparaison, le type de structure associé à une propagation dynamique de la rupture.

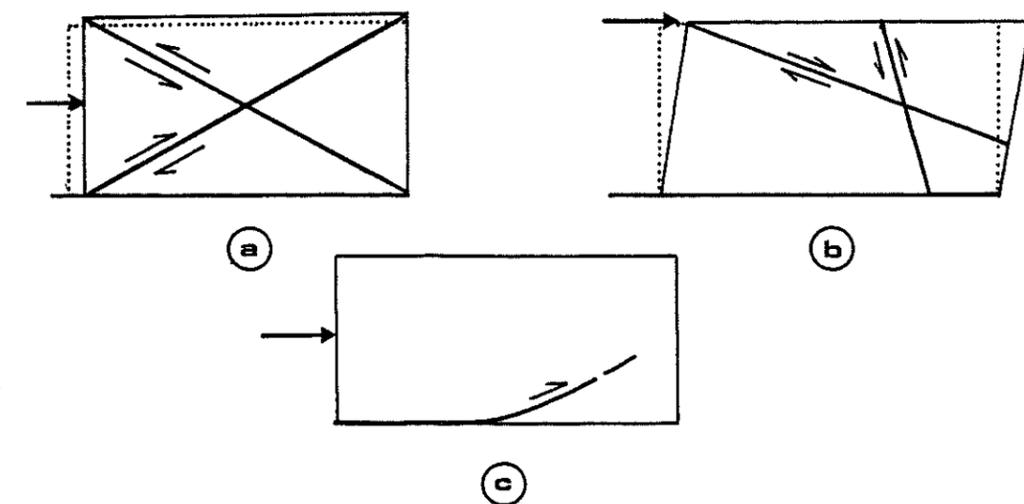


Figure 68 : Sous l'effet d'une poussée arrière et selon les conditions de déformation, trois cas peuvent se produire.

fig. 68a : un glissement facile à la base et une butée avant donnent des fractures à pendage identique.

fig. 68b : un frottement à la base très fort et l'avant libre donnent un cisaillement simple et des failles de type Riedel.

fig. 68c : la propagation dynamique d'une fracture principale développe une faille secondaire en branche.

Le premier cas conduit à deux failles conjuguées qui peuvent potentiellement devenir des rampes si la poussée arrière se maintient : l'une (la droite) en pro-chevauchement, l'autre (la senestre) en rétro-chevauchement (dit aussi écaillage intracutané, fig. 64). Dans le deuxième cas, la faille sénestre ne se prête pas par son pendage élevé et inverse à une évolution en pro-chevauchement, par contre la faille droite peut conduire à un rétro-chevauchement si un décollement peut s'initier, après l'apparition de cette faille, à la base de la couverture.

Dans le cas de géométrie plus complexe de la série décollée, notamment lorsque celle-ci change d'épaisseur au-dessus d'une flexure de la partie fixe, Wiltschko et Eastman (1986), Descloître et Martinez (1986) ont calculé la répartition des contraintes (fig. 69a) et celle des failles conjuguées susceptibles d'apparaître à la rupture (fig. 69b), avec des règles simples de comportement du matériau (Mohr-Coulomb).

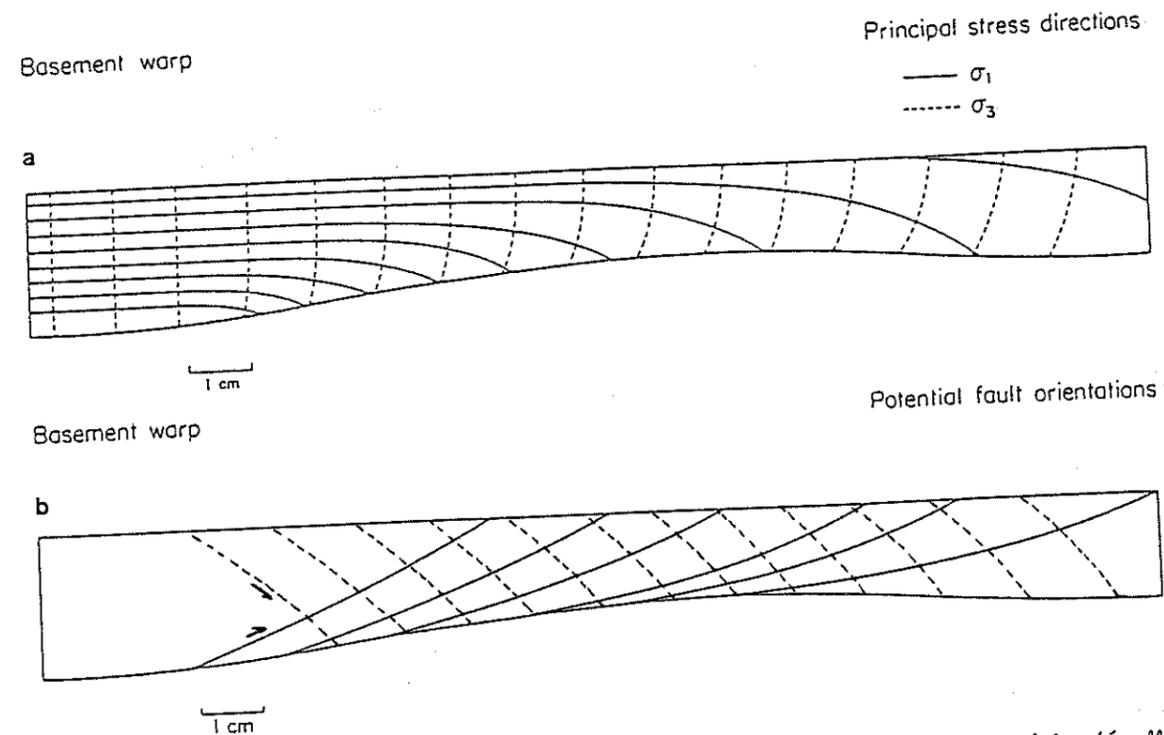


Figure 69 : Calcul de la répartition des contraintes principales dans une série décollée, près d'une flexure de socle rigide (fig. 69a), traces de failles potentielles déduites des contraintes (fig. 69b), d'après Wiltschko et Eastman (1983).

Ces quelques exemples soulignent la difficulté de prendre en compte le problème lié à l'initiation et à la propagation des fractures puisqu'on ne connaît que très rarement les rapports temporels entre ces phénomènes et le déplacement sur les paliers. Mais une observation générale permet de beaucoup simplifier le problème. Dans la région étudiée, comme dans la plupart des autres chaînes de montagne, on peut remarquer qu'à l'échelle de l'affleurement il existe de très nombreuses failles présentant de très faibles déplacements (type diaclases) qui se sont donc initialisées, puis propagées sans pour cela évoluer en rampes. Cette observation implique, tout d'abord, que l'apparition de ces failles nécessite peu d'énergie comparativement à l'apparition d'une rampe. Elle implique aussi que la notion de rampe ne doit être définie que lorsqu'un ensemble de fractures a pu, par coalescence, évoluer en une zone de failles traversant l'ensemble de la série décollée. Mais sur la région étudiée, lorsque ce type de faille a été décrite, les déplacements ont toujours été à la mesure de l'extension latérale de la faille, c'est-à-dire pluri-kilométriques. A partir du moment où, à l'échelle d'un seul décollement de quelques kilomètres, on considère de tels déplacements, le sens de vergence est clairement défini et il faut raisonner, non plus en déformations incrémentales, mais en déformations finies. C'est l'objet de la discussion ci-après sur la vergence des chevauchements. On retiendra, en tout état de cause, que l'apparition de réseaux de fractures (approche statique) ou de fractures en branches isolées (approche dynamique) implique toujours des instabilités de propagation du déplacement sur le niveau de décollement, soit des variations de vitesse (approche dynamique) soit des arrêts de propagation (approche statique avec arrêt du déplacement, déformation de la série, puis éventuellement reprise du décollement).

## II. Vergence des chevauchements

On rappellera en introduction que, dans la plupart des chaînes de montagne de type "chaîne de collision", où l'on peut distinguer une marge stable (avant pays sans déformation à l'échelle de la croûte) et une marge mobile (avec une large déformation crustale), la vergence générale des chevauchements est de type pro-chevauchante (fig. 70 : exemple des Montagnes Rocheuses). Cette règle générale souffre cependant d'exceptions. Ces vergences inverses qualifiées, pour simplifier dans le chapitre précédent de rétro-chevauchements, semblent particulièrement associées à la zone d'amortissement des systèmes chevauchants dans l'avant-pays des chaînes de collision (voir fig. 70, et aussi des exemples dans les Alpes (MÉNARD, 1988) et dans les Pyrénées (BABY, 1988)).

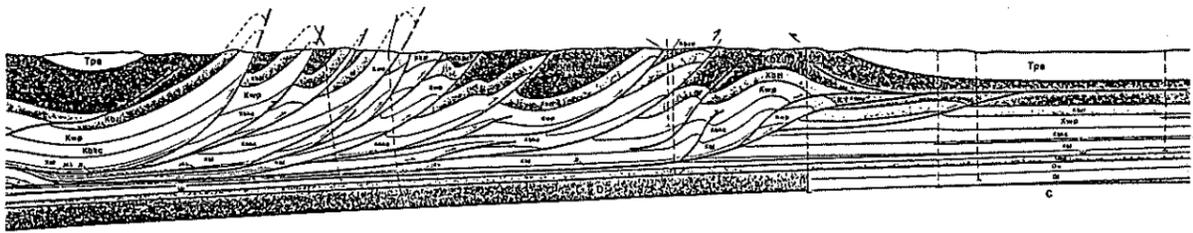


Figure 70 : Exemple de chevauchements dans les montagnes Rocheuses qui montre le développement fréquent des pro-chevauchements et la situation près de l'avant-pays des rétro-chevauchements.

Avant d'aller plus avant dans l'étude de la vergence des chevauchements, il est nécessaire de bien expliciter le vocabulaire employé pour définir cette vergence, vocabulaire qui ne semble pas toujours cohérent d'un auteur à l'autre. Pour ce qui nous concerne, nous distinguerons trois types de structures schématisés sur la figure 71. Avec un point fixe à l'extrémité gauche et un compartiment mobile à droite, on a distingué trois possibilités :

- la valeur du déplacement est du même ordre de grandeur sur deux failles inverses conjuguées à vergence opposée (fig. 71b).

- la valeur du déplacement en pro-chevauchement est nettement supérieure à celle de nombreux petits rétro-chevauchements, simplement associés au passage de la rampe (fig. 71a). Il s'agit de la géométrie la plus fréquente dans les chaînes de collision.

- la valeur du déplacement en rétro-chevauchement est nettement supérieure à celle de nombreux pro-chevauchements, simplement associés au passage de la rampe (fig. 71c). Il s'agit de structures dites en écaillage intracutané.

Il faut étudier séparément les développements de ces trois types d'association de structures.

Le développement des rétro-chevauchements mineurs de la figure 71a, comme celui des pro-chevauchements mineurs de la figure 71c, est simplement dû au passage de la série décollée sur la rampe. Ces failles apparaissent à la base de la rampe et sont transportées ensuite en étant éventuellement déformées. Ce phénomène a été très bien mis en évidence par les expérimentations analogiques de J.F. Ballard et al. (1987).

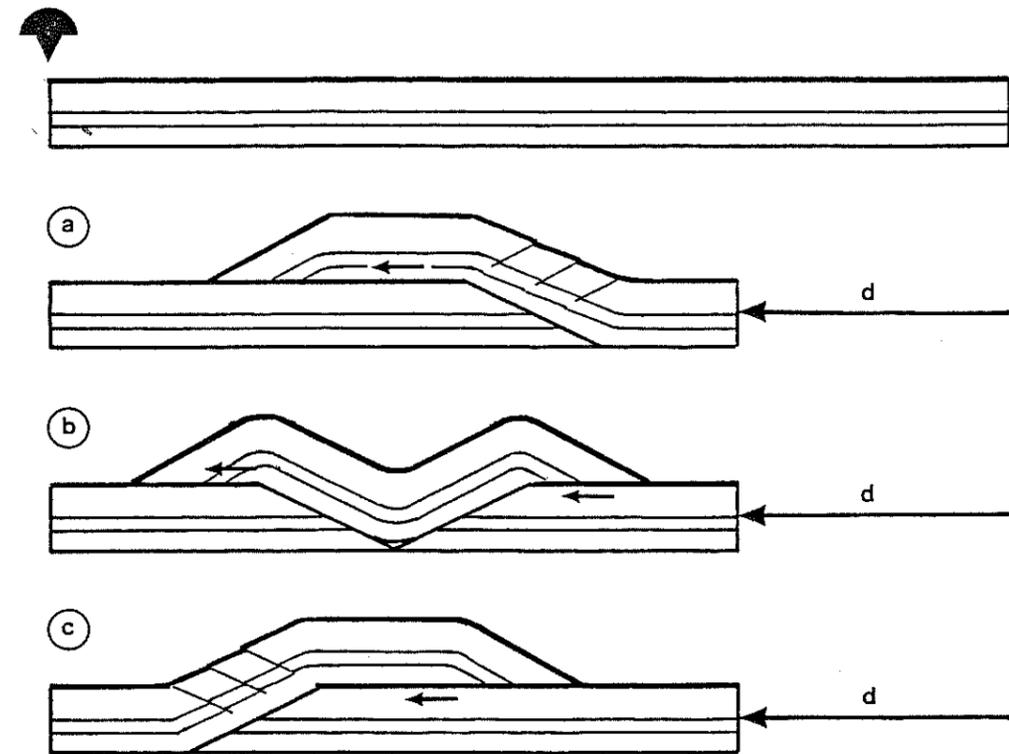


Figure 71 : Exemple d'association de chevauchements qui peuvent apparaître, avec le même déplacement d'un compartiment droit mobile, selon les conditions de déformation.

- a) Pro-chevauchement de large amplitude, avec rétro-chevauchements mineurs associés.  
 b) Chevauchements à vergence opposé, d'amplitude comparable ("pop-up").  
 c) Rétro-chevauchement de large amplitude, avec pro-chevauchements mineurs associés.

Dans la région étudiée, le seul exemple de chevauchements de même amplitude à vergence opposée (fig. 71b et coupe équilibrée n° III, fig. 55), se situe exactement au passage latéral entre un pro-chevauchement (fig. 71a et coupes équilibrées n° IV, V, fig. 55) et un rétro-chevauchement majeurs (fig. 71c et coupes équilibrées n° I, II, fig. 61). Ce type de structure peut-être considéré comme un état de transition dans le cas particulier étudié. Dans un cas plus général, on peut souligner l'analogie entre cette structure symétrique et celle décrite dans la figure 68a qui conduit à l'apparition de deux failles conjuguées de même amplitude lorsqu'on a à la fois un glissement très facile à la base de la série décollée et une butée avant. Les conditions d'apparition de telles structures symétriques sont les mêmes que celles du développement de bandes de pliage symétriques qui apparaissent par contraction d'une série litée bien lubrifiée à sa base (Cobbold et al., 1977), ou d'un pli coffré avec éjection verticale des parties charnières ("pop up").

La reconnaissance des paramètres qui interviennent dans la détermination de la vergence des chevauchements implique plutôt de comparer deux possibilités clairement différentes qui correspondent aux pro et au rétro-chevauchements majeurs des figures 71a et 71c. Le problème qui se pose, si l'on admet qu'à la Sainte-Victoire le stade de transition médian (coupe III en "pop up", fig 6 et modèle fig. 71b) correspond au passage entre le pro-chevauchement de l'Est et le rétro-chevauchement de l'Ouest, est de définir quels sont les paramètres qui déterminent la rentabilité de l'une ou de l'autre vergence. Le cas intermédiaire est alors considéré comme un équilibre entre les deux possibilités extrêmes majeures (pro-chevauchement et rétro-chevauchement). Ce sera l'objet des développements suivants.

Dans une première approche, que l'on peut appeler du "bilan énergétique", nous présenterons successivement un modèle de calcul de l'énergie consommée au cours du développement des chevauchements puis, à partir des structures décrites dans la région étudiée, nous discuterons de la vergence des chevauchements en estimant les valeurs des paramètres mécaniques qui ont favorisé l'un ou l'autre des sens de chevauchement. Dans une deuxième approche cinématique, nous discuterons du sens de chevauchements spécialement liés à des décrochements.

## II.1. Approche en termes d'énergie minimale

### II.1.1. Calcul de l'énergie consommée dans les chevauchements.

Partant du principe que dans la nature, l'énergie consommée par le développement d'une structure doit toujours être d'une valeur minimale, D. Elliott (1976) a proposé une méthode de calcul de l'énergie consommée dans les chevauchements. L'idée est de rajouter une contrainte supplémentaire à la construction de coupes équilibrées en recherchant une géométrie et une cinématique, compatible avec les données, qui soit telle qu'elle n'exige pour son développement qu'un minimum d'énergie.

Les principes des calculs de l'énergie consommée dans des déformations naturelles ont été donnés par des précurseurs, tel que Goguel (1948). Nadai (1950) discute très précisément de ce problème en montrant bien qu'entre un état initial et un état déformé, il existe toujours un chemin de déformation qui consomme le minimum d'énergie et qui devrait donc apparaître systématiquement (pour des conditions de déformation et un comportement des matériaux donnés évidemment). Mitra et Boyer (1988) ont aussi utilisé cette approche pour discuter du mode de développement des duplex.

#### a) Principe des calculs

Pour appliquer ce principe de la consommation minimale d'énergie, nous avons cherché à calculer l'énergie consommée dans chacun des cas des figures 71a et 71c (pro et rétro-chevauchements majeurs). Nous montrerons que dans certaines conditions et pour certaines valeurs des paramètres mécaniques, l'une ou l'autre de ces vergences devrait être plus facilement obtenue car elle correspond à une moindre consommation d'énergie. Pour estimer ces paramètres nous avons donc reproduit, avec le plus de fidélité possible, la géométrie et la cinématique observées de façon à rechercher dans quelles conditions un minimum d'énergie serait consommé pour obtenir la structure observée. Par conséquent, si sur une même coupe on observe un pro et un rétro-chevauchement apparus successivement, il s'agira d'estimer quels sont les paramètres qui ont changé pour qu'une telle inversion de la vergence puisse se produire, tout en restant compatible avec le principe de la plus faible dépense d'énergie.

Suivant l'analyse de D. Elliot (1976), il est possible de considérer qu'un chevauchement progressant sur un palier (éventuellement incliné) et sur une rampe consomme de l'énergie (fig. 72) que l'on peut schématiquement décomposer en cinq parts nécessaires à :

- 1- initier la rupture ( $W_I$ ),
- 2- propager cette rupture le long du niveau de rupture et de décollement ( $W_P$ ),
- 3- changer l'énergie potentielle de la partie décollée (gravité) lorsque celle-ci est soulevée par la progression du chevauchement ( $W_G$ ),
- 4- vaincre le frottement sur le niveau de décollement ( $W_F$ ).
- 5- accommoder la déformation interne de la partie décollée lorsqu'elle passe sur la rampe ( $W_D$ ).

Dans l'exemple de la figure 72, la somme des énergies nécessaires au déplacement de la partie décollée, doit être égale à l'énergie qui est fournie au système pour la progression et qui peut être ici une poussée arrière. Le but de cette étude n'est pas de discuter des types d'énergie fournis au système. Nous considérerons que ce moteur initial n'intervient pas sur le sens des vergences, mais ceci est clairement une première approximation.

D. Elliott (1976), après avoir estimé chacune des énergies consommées dans le cas de chevauchements dans les montagnes Rocheuses, conclut que les énergies consommées pour l'initiation et la propagation sont négligeables comparées aux trois autres parts. Nous avons tendance à penser la même chose à partir d'une observation très simple : il existe toujours, dans les séries décollées, un très grand nombre de failles à toutes échelles qui apparaissent très probablement avant l'initiation et la propagation des rampes et qui peuvent servir de guides pour celles-ci. Nous avons négligé cet effet de l'initiation et de la propagation des ruptures pour une autre raison : il s'agit de différencier les paramètres qui déterminent l'un ou l'autre sens de vergence. On verra que les énergies consommées par la gravité, le frottement ou la déformation interne sont clairement différentes pour chacun des deux cas. par contre, il est tout aussi clair qu'il n'y a pas de différence à attendre pour l'initiation et la propagation de deux rampes choisies de géométries identiques, symétriques et de sens opposés. Ces ruptures n'interviennent donc pas, ou seulement avec le même poids, dans notre comparaison des bilans énergétiques entre pro et rétro-chevauchement.

En considérant l'exemple de la figure 72, le détail des calculs d'énergie consommée peut être donné schématiquement.

A chaque incrément de déplacement ( $d$ ), nous avons calculé la somme des trois types d'énergie considérée (gravité, frottement, déformation), consommée pour faire avancer l'ensemble de la partie décollée. Afin de simplifier les calculs, nous avons divisé l'ensemble de la partie décollée en éléments aux limites verticales d'une largeur  $D$  (fig. 72). Chaque

élément peut présenter alors un changement d'altitude ( $W_G$ ), un frottement à sa base ( $W_F$ ) et une déformation interne au passage de la rampe ( $W_D$ ) qui, pour simplifier a été considérée comme étant toujours un cisaillement simple vertical. Un cisaillement simple vertical implique une épaisseur verticale constante et donc un léger allongement de la longueur des couches qui n'excède pas 10%. L'énergie totale consommée à chaque incrément est la somme de l'énergie consommée pour tous les éléments.

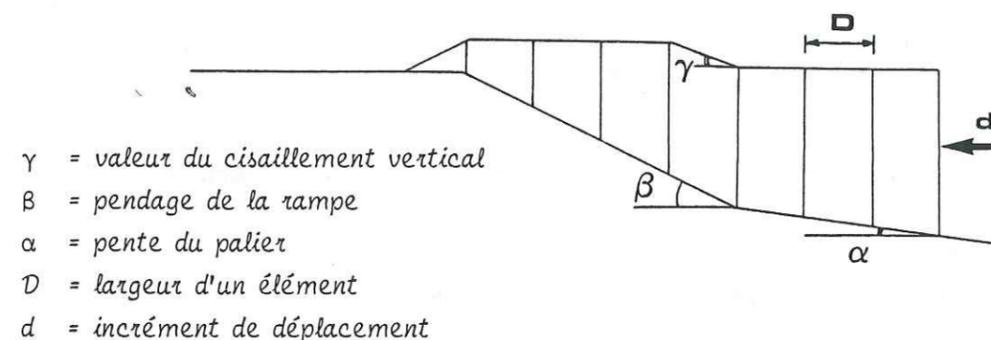


Figure 72 : Exemple de chevauchement d'une série décollée sur un socle rigide, donnant les définitions des termes utilisés dans le texte pour le calcul de l'énergie consommée par ce chevauchement.

Dans un cas simple où l'incrément de déplacement est égal à la longueur des éléments et où les longueurs horizontales de la rampe et du palier sont des multiples de la valeur de cet incrément de déplacement, on peut distinguer quatre types de comportement des éléments à chaque incrément de déplacement :

- cas a : un élément sur le palier, après déplacement reste sur ce palier ;
- cas b : un élément sur le palier, après déplacement monte sur la rampe ;
- cas c : un élément sur la rampe, après déplacement reste sur la rampe ;
- cas d : un élément sur la rampe, après déplacement passe sur le niveau plat supérieur.

L'énergie est calculée par largeur d'un mètre.

Dans le cas a, deux types d'énergie sont consommées : gravité ( $W_G$ ) et frottement ( $W_F$ )

$$W_G = \rho \cdot g \cdot V \cdot \Delta h$$

avec  $\rho$  = masse volumique ;  $g$  = accélération de la pesanteur ;  $V$  = volume de l'élément =  $D.H.C$  ( $D$  est la largeur de l'élément,  $H$  sa hauteur et  $C$  son épaisseur) ;  $\Delta h$  = changement d'altitude du centre de gravité de l'élément =  $d.tg\alpha$  ( $d$  est l'incrément de déplacement,  $\alpha$  est la pente du palier).

$$W_F = d \cdot \tau_b \cdot A$$

avec  $\tau_b$  = résistance au cisaillement sur la surface de décollement ;  $A$  = surface de décollement =  $D.C/\cos\alpha$ .

Dans le cas b, les trois types d'énergie sont consommées : gravité ( $W_G$ ), frottement ( $W_F$ ) et déformation interne ( $W_D$ ).

$W_G$  et  $W_F$  sont calculées comme ci-dessus. Mais pour le frottement, l'angle de base  $\alpha$  est remplacé par une valeur de pente moyenne du passage palier/rampe. Pour la gravité, un terme fonction du déplacement vertical associé au cisaillement simple s'ajoute au terme dû à la pente du palier.

$$W_D = \tau_y \cdot \gamma \cdot V$$

avec  $\tau_y$  = seuil de plasticité du matériau que l'on considère comme un matériau plastique parfait ;  $\gamma$  = valeur du cisaillement vertical (fonction de la différence de pendage entre rampe et palier).

Dans le cas c, deux types d'énergie sont consommées : gravité ( $W_G$ ) et frottement ( $W_F$ ). Le calcul est le même que pour le cas a, seule change la valeur de l'angle qui devient ici  $\beta$ , pendage de la rampe.

Dans le cas d, trois types d'énergie sont consommées : gravité ( $W_G$ ), frottement ( $W_F$ ), et déformation interne ( $W_D$ ). Pour la gravité, on prend en compte la différence d'altitude de l'élément entre rampe et surface, pour le frottement on utilise une valeur moyenne de pente rampe/surface. Enfin, pour la déformation interne, l'angle de dépliage est égal à la différence de pendage entre la rampe et la surface.

Il faut souligner aussi que ces calculs ne concernent que des structures cylindriques, infinies dans la direction perpendiculaire à la coupe. Pour prendre en compte l'effet d'amortissement latéral des structures on peut rajouter, dans l'énergie consommée, une part d'énergie due à des frottements latéraux ou à des déformations internes (cisaillement verticaux) nécessairement associés à cet amortissement latéral. Mais cet effet de bordure sera surtout pris en compte dans l'approche cinématique.

Il faut remarquer enfin que le mode de déformation choisi au passage sur la rampe (cisaillement simple vertical), s'il permet de reproduire correctement la forme d'ensemble d'une série décollée qui franchit une rampe, ne permet pas de représenter les flancs inverses que l'on observe dans les séries de la Sainte-Victoire après leur passage sur les rampes (fig. 55, fig. 61). Cette approximation est justifiée, si l'on admet que le renversement des séries s'est produit après une érosion partielle des reliefs. Dans ce cas, même si ce renversement est lié au déplacement, il peut être considéré comme de la morpho-tectonique, et non consommateur d'énergie ou en consommant une quantité identique pour des pro-chevauchements et des rétro-chevauchements. A ce titre le problème n'intervient pas dans la comparaison des bilans d'énergie.

#### b) Un premier cas simple

Avant d'aborder la modélisation des cas réels, il est utile de discuter du rôle de différents paramètres sur un premier cas simple (fig. 73).

Soit une série sédimentaire en biseau avec un palier de décollement faiblement incliné ( $1,5^\circ$ ) pour tenir compte de la variation d'épaisseur des séries, on cherche à estimer l'énergie consommée pour développer soit un pro, soit un rétro-chevauchement. Dans le but de simplifier le calcul, on admettra une symétrie des deux cas : pour un même déplacement général imposé, le mouvement est transféré soit sur une rampe pro-chevauchante (fig. 73a), soit sur une rampe rétro-chevauchante (fig. 73b) dont la pente est identique ( $27,5^\circ$ ), mais de sens opposé et avec le même point d'initiation sur le palier.

Le calcul des différentes énergies suppose de choisir les valeurs de certains paramètres caractéristiques des matériaux : la valeur de la masse volumique  $\rho$  a été choisie égale à 2,7. Pour les valeurs de la résistance au cisaillement sur le décollement basal et du seuil de plasticité, on peut, dans un premier temps choisir des valeurs moyennes issues de la littérature. Par exemple, la résistance au cisaillement d'une couche de gypse aux vitesses géologiques est donnée par divers auteurs : 4MPa (GOGUEL, 1965), 4,4MPa (SIDDANS, 1979), 3-3,5 MPa (MUGNIER, 1984 et FABRE et al., 1982). Nous avons calculé une valeur plus faible de 2,3MPa (cf. II.1.2. Bilan d'énergie pour les coupes à l'est). Des résultats expérimentaux récents de Urai et al. (1986) sur le sel, conduisent à des valeurs encore plus faibles (de quelques bars) lorsque le mécanisme de déformation est de type dissolution-cristallisation. Le seuil de plasticité de la série décollée a aussi été estimé,

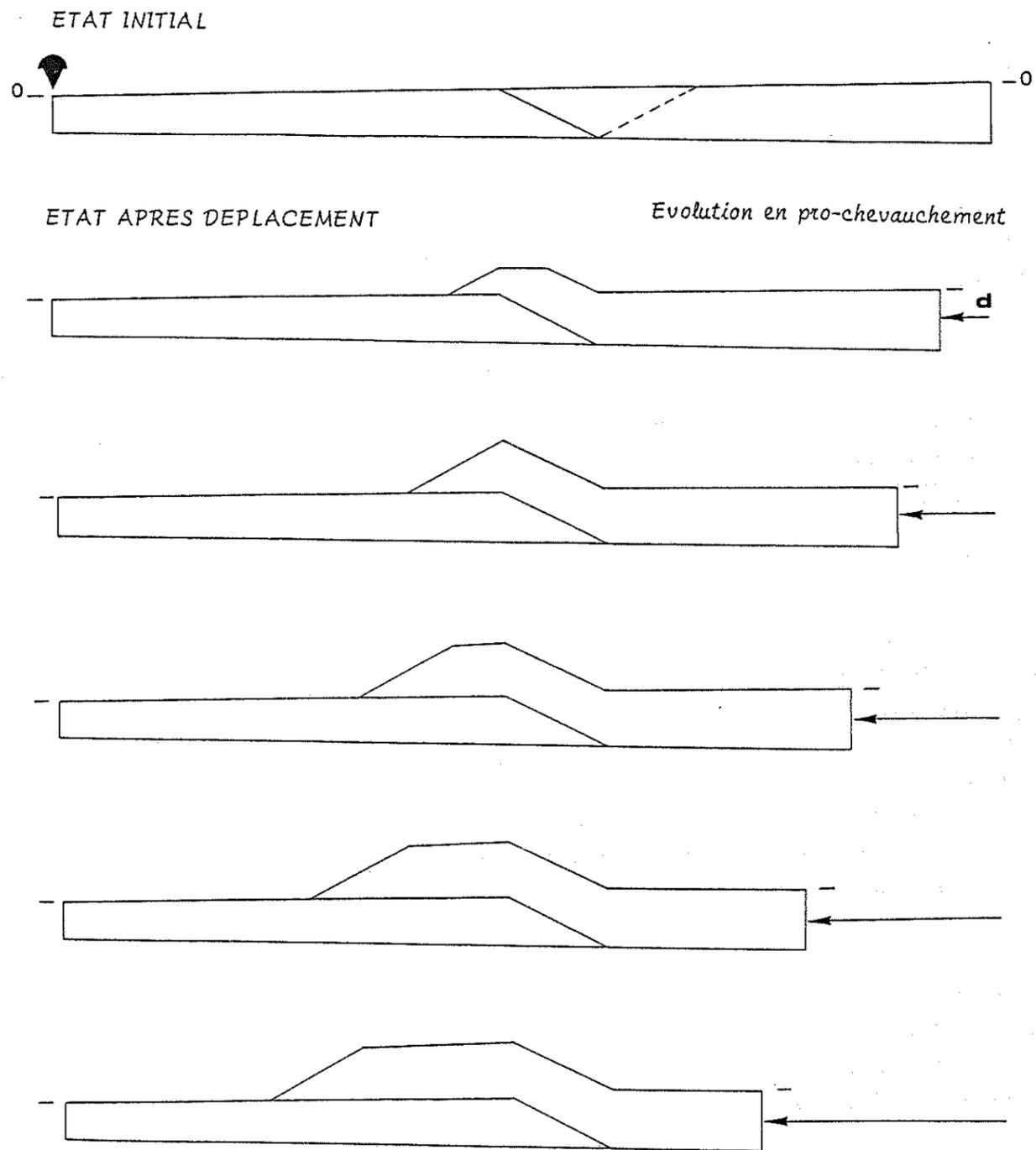


Figure 73a : Série sédimentaire en biseau avec un palier de décollement faiblement incliné ( $1,5^\circ$ ), sans changement de pente en cours d'évolution. Les rampes ont un pendage identique ( $27,5^\circ$ ).

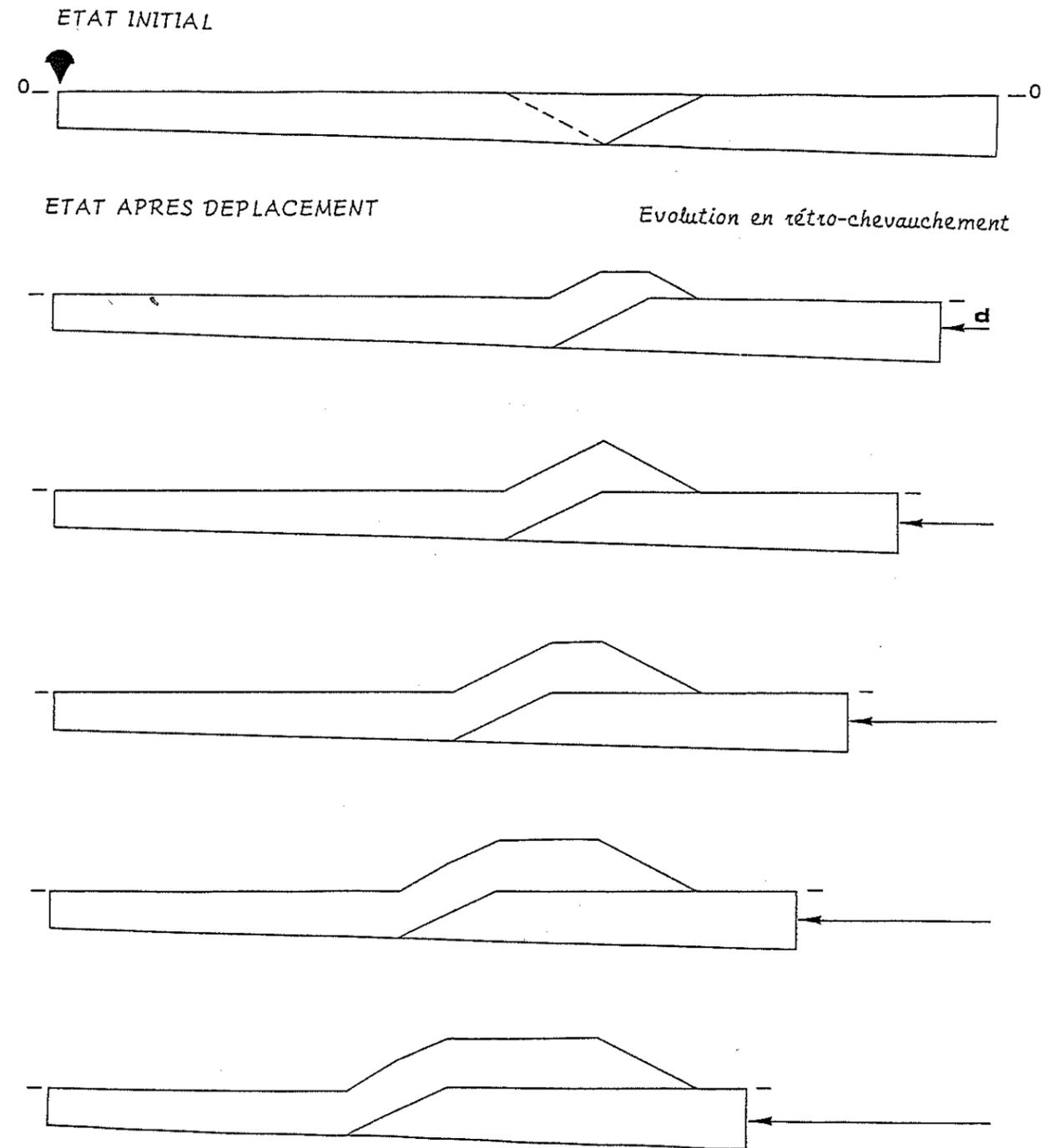


Figure 73b : Série sédimentaire en biseau avec un palier de décollement faiblement incliné ( $1,5^\circ$ ), sans changement de pente en cours d'évolution. Les rampes ont un pendage identique ( $27,5^\circ$ ).

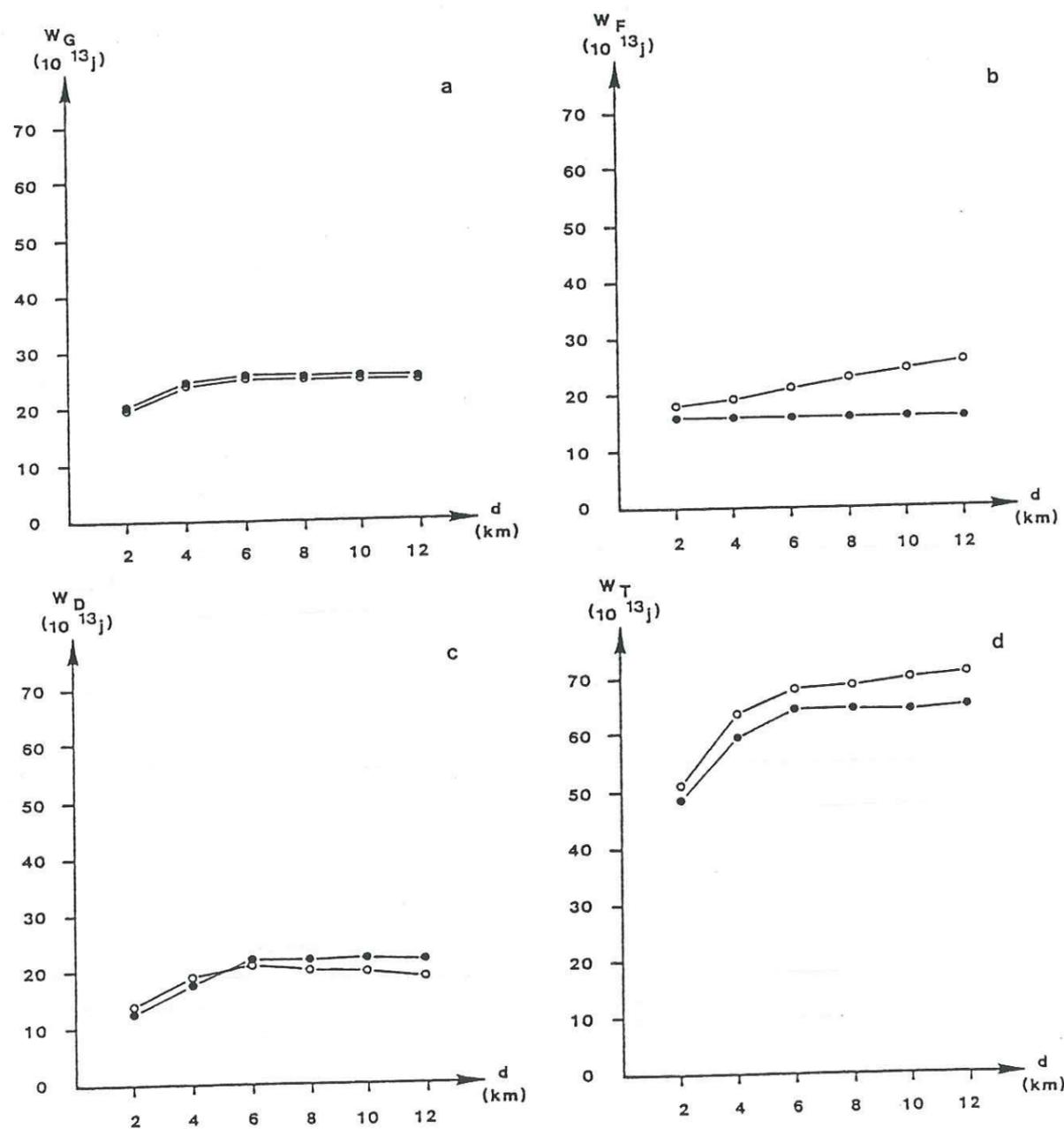


Figure 74 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement (●) et un rétro-chevauchement (○) dans le cas de la figure 73.

$d$  = déplacement

$W_G$  = énergie consommée pour vaincre la gravité

$W_F$  = énergie consommée pour vaincre le frottement

$W_D$  = énergie consommée pour vaincre la déformation interne

$W_T$  = énergie totale consommée

pour des vitesses géologiques, à 50-100 MPa (CHAPPLE, 1978), 30-100MPa (MOLNAR, LYON-CAEN 1988), 20 MPa (ELLIOTT, 1976 et MITRA BOYER, 1986). Des valeurs moyennes de  $\bar{\sigma}_b = 4 \text{ MPa}$  et  $\bar{\sigma}_y = 50 \text{ MPa}$  ont été choisies.

L'évolution comparative des énergies consommées pour un pro et un rétro chevauchement de 10 km, estimé de 2 en 2 km est donnée dans la figure 74 pour l'énergie gravitaire (74a), l'énergie de frottement (74b), l'énergie de déformation interne (74c) et l'énergie totale (74d).

Schématiquement, on remarque qu'avec les valeurs des paramètres mécaniques choisies, les différentes énergies nécessaires sont du même ordre de grandeur. Toutefois, il est net que le développement d'un pro-chevauchement dépense au total moins d'énergie. Il est évidemment intéressant de se demander pourquoi ?

L'énergie consommée pour vaincre les forces de gravité est sensiblement équivalente. Elle dépend surtout de la pente (constante) du palier et du pendage (identique) des rampes. L'énergie dépensée par le frottement est différente entre pro et rétro-chevauchement puisque à tout instant la longueur de frottement augmente pour le rétro-chevauchement alors qu'elle reste constante pour le pro-chevauchement.

La dépense énergétique due à la déformation interne correspond aux valeurs du cisaillement vertical. On remarque que celui-ci est plus important pour les rétro-chevauchements que pour les pro-chevauchements puisque les angles palier/rampe sont différents :  $\gamma_{\text{rétro}} = \beta + \alpha$  et  $\gamma_{\text{pro}} = \beta - \alpha$ . En revanche, en raison de la forme en biseau de la pile déplacée, la hauteur cisillée est moindre pour les rétro-chevauchements que pour les pro-chevauchements et cela s'accroît avec le progrès du déplacement. Cette compensation, progressivement de plus en plus accusée alors que les angles palier/rampe restent constants, fait que les différences énergétiques constatées au départ tendent peu à peu à se réduire.

S'il est évident que dans cet exemple les pro-chevauchements sont énergétiquement plus rentables, il faut se demander quelles sont les raisons qui peuvent permettre d'inverser cette tendance. Il est clair que cela ne peut être par un pendage nul du palier, ni même s'il est en sens inverse du cas analysé. Par contre, les rétro-chevauchements sont plus aisés si la pente de la rampe à mouvement rétro est plus faible que celle de la rampe à mouvement pro. Ainsi, si des failles préexistantes dans la pile sédimentaire peuvent être utilisées pour engager le déplacement, l'existence de failles à pendage moindre dans le sens rétro que dans le sens pro peut énergétiquement favoriser le développement du rétro-chevauchement car l'économie réalisée sur la dépense d'énergie pour déformer le matériau et surpasser les forces gravitaires peut compenser le surplus de frottement. Aucun argument de terrain ne permet d'assurer qu'une telle différence de pendage pour des failles préexistantes auraient pu fixer le pendage des rampes utilisées.

Si on considère maintenant les coupes réelles de la figure 55 et 61, on doit prendre en compte d'autres critères. Il faut notamment choisir des règles cinématiques pour représenter l'enfoncement progressif des bassins de sédimentation (bassin de l'Arc, bassin de Rians) synchrones des mouvements de chevauchement. Il faut aussi se fixer des règles de répartition des volumes érodés par rapport aux volumes sédimentés au fur et à mesure du développement de ces chevauchements.

Les coupes considérées passent à l'Est et à l'Ouest de la Sainte-Victoire. Elles permettent de résoudre un certain nombre de problèmes.

Rappelons que, dans une coupe passant à l'Est, on observe (fig. 63) deux chevauchements que l'on peut admettre apparus successivement (en supposant l'âge des brèches donné par la carte au 50.000<sup>ème</sup> correct), le plus septentrional étant le plus récent (MITRA et BOYER, 1986). Le premier est un pro-chevauchement, le second un rétro-chevauchement. Il s'agit de savoir quels paramètres ont changé entre l'apparition de ces deux chevauchements pour imposer un tel changement de vergence.

Pour les coupes passant à l'Ouest de la Sainte-Victoire, deux interprétations sont possibles pour prendre en compte les données sismiques et géologiques (haute altitude de la structure du bois de Concors) : soit un grand rétro-chevauchement (écaïlle intracutanée, fig. 61), soit un simple passage d'une série épaisse sur une flexure (fig. 58). Ces deux cas ont été étudiés. Dans un cas, on a un rétro-chevauchement à l'Ouest qui passe à l'Est à un pro-chevauchement, on doit donc déterminer les paramètres qui changent d'Est en Ouest. Dans l'autre cas, après déplacement de la série épaisse, on doit admettre le développement d'un rétro-chevauchement pour expliquer la Sainte-Victoire et l'on s'interroge sur la minimisation d'énergie qu'a dû représenter le développement de ce rétro-chevauchement par rapport à celui d'un pro-chevauchement.

### II.1.2. Bilans d'énergie pour les coupes à l'Est de la Sainte-Victoire.

La coupe équilibrée de la figure 63 est schématisée dans son état initial sur la figure 75. Les épaisseurs de séries, les pendages du palier (1°) et des rampes (24°) ont été respectés, dans la limite des contraintes imposées par le calcul des bilans d'énergie. Pour ce qui concerne la cinématique, nous avons imposé un déplacement de 10 km : 6 km observés sur le pro-chevauchement, puis 4 km sur le rétro-chevauchement. Afin de prendre en compte la nécessité d'un remplissage des bassins crétacé supérieur et tertiaire synchrones du déplacement des chevauchements (voir § précédent), nous avons choisi d'imposer le premier incrément de déplacement au Crétacé supérieur. Il intervient sur une surface post-crétacée inférieure horizontale considérée comme le niveau d'altitude zéro. Toutes les observations de terrain montrent que les dépôts de bassins sont constitués d'une

part importante des produits de l'érosion des formations Jurassiques impliquées dans les chevauchements. Nous avons donc considéré qu'il était nécessaire d'équilibrer les volumes d'érosion et de sédimentation de telle manière qu'après les 10 km de déplacement la surface en excès (surface des séries décollées au dessus du niveau de la couche la plus récente déposée dans les bassins) soit identique entre le modèle et la coupe naturelle.

Pour modéliser le remplissage des bassins, nous avons considéré qu'après chaque incrément de déplacement, on pouvait imposer une flexion du soubassement des séries décollées qui peut être comparée (à une autre échelle) à la flexion de la croûte de l'avant pays sous l'effet des chevauchements crustaux situés en arrière de la région étudiée.

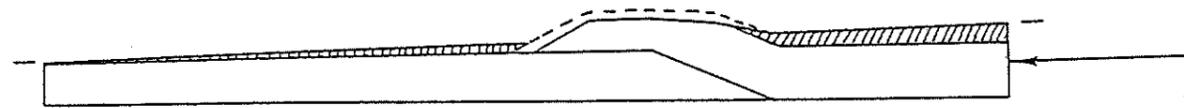
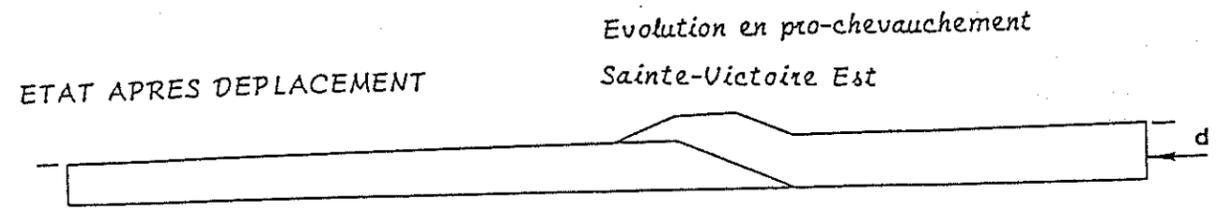
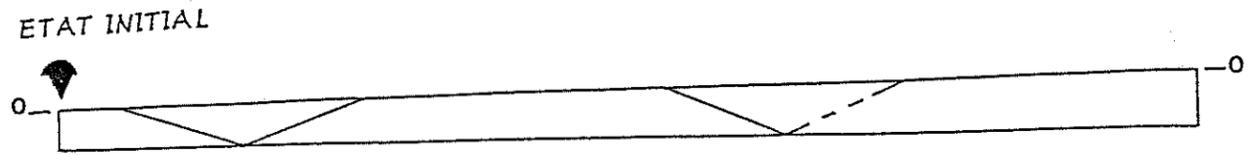
La valeur totale de cette flexion est imposée par l'épaisseur des sédiments crétacés supérieur et tertiaire. Afin de prendre en compte les observations de terrain, selon lesquelles les sédiments des bassins sont en grande partie issues de l'érosion des terrains jurassiques soulevés lors du chevauchement, nous avons fait un bilan des surfaces en excès induites par le déplacement de 10 km de la couverture lorsque l'on conserve les valeurs déplacées par rapport à la surface (en coupe) des sédiments déposés dans les bassins crétacés supérieur et tertiaire. On note que sur la longueur de coupe considérée, les 4/5 de la surface doivent être à peu près sédimentés sur place, 1/5 restant effectivement en excès sur la coupe à son état final (fig. 63).

En fonction de ces valeurs, nous avons imposé la règle suivante : après un premier incrément de déplacement de 2 km, on impose une flexion de 300m à l'arrière de la coupe, puis un remplissage des bassins jusqu'au niveau zéro, non compensé par une érosion. A partir du deuxième incrément, on impose successivement une flexion de même amplitude, un remplissage des bassins et une érosion des reliefs du même volume.

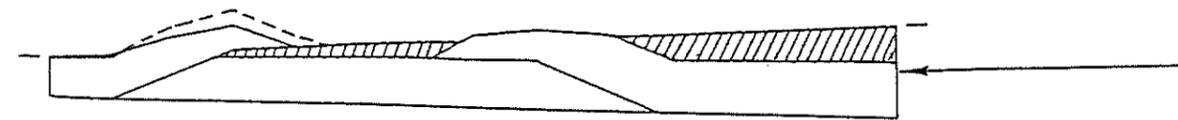
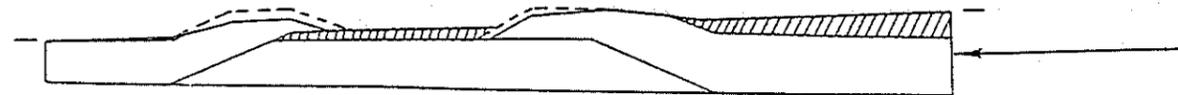
L'énergie consommée a été calculée pour chaque élément, puis pour tous les éléments, ceci à chaque incrément de déplacement. Comme nous avons utilisé des incréments de même valeur, on peut considérer que cette consommation d'énergie est équivalente à une puissance (énergie consommée par unité de temps) à vitesse de déplacement constante. L'évolution de cette valeur au cours du déplacement (ou du temps) exprime donc l'évolution de la valeur de la puissance consommée.

Un modèle d'évolution géométrique de cette coupe, qui respecte la cinématique observée, est donné dans la figure 75. Pour tester l'influence des différents paramètres, l'énergie nécessaire au développement du premier pro-chevauchement a été comparée à celle qu'aurait exigé le développement d'un rétro-chevauchement (initié au même point sur le palier et avec le même pendage initial des rampes). De même, l'énergie dépensée par le second rétro-chevauchement (montagne de Vautubière, fig. 63) a été comparée à celle

CAS CALCULE OBSERVE



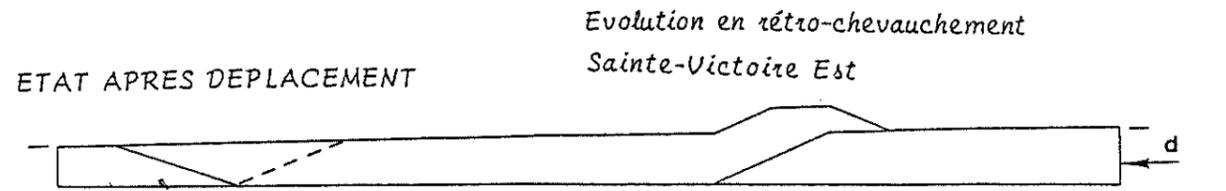
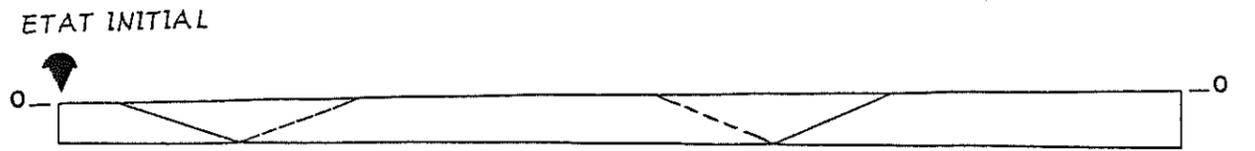
Evolution en rétro-chevauchement  
Vautubière



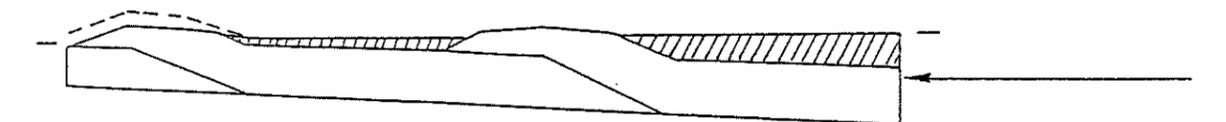
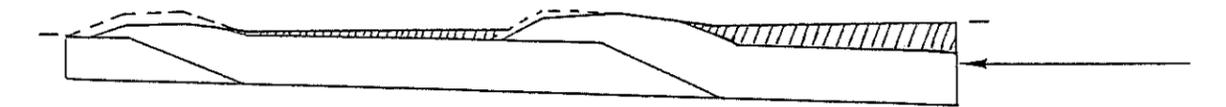
volume érodé  
 dépôts syntectoniques

Figure 75 : Modèle établi à partir des coupes à l'Est de la Sainte-Victoire (fig. 63), avec flexion et érosion.

CAS CALCULE POUR COMPARAISON



Evolution en pro-chevauchement  
Vautubière



volume érodé  
 dépôts syntectoniques

Figure 75 : Modèle établi à partir des coupes à l'Est de la Sainte-Victoire (fig. 63), avec flexion et érosion.

qu'aurait nécessité un pro-chevauchement au même endroit. Les évolutions comparatives des énergies consommées sont données dans la figure 76. Elles peuvent être commentées comme suit :

- Pour l'énergie gravitaire, les basculements successifs vers l'arrière tendent à favoriser les rétro-chevauchements par rapport aux pro-chevauchements puisque la pente de la rampe des premiers diminue progressivement, alors que celle des seconds augmente.

- Pour le frottement, la règle observée sur l'exemple précédent (pente de palier constante, fig. 73 et 74) reste valable. Les rétro-chevauchements présentent toujours plus de longueur de frottement que les pro-chevauchements qui sont donc plus rentables.

- Pour la déformation interne, la différence des valeurs de cisaillement pour franchir les deux types de rampes est stable puisque les angles rampe/palier restent identiques au cours des basculements. Par contre, l'augmentation du biseau sédimentaire accroît la différence de hauteur cisailée entre pro et rétro-chevauchement. Dès le troisième incrément de déplacement (après le deuxième incrément de basculement), la consommation d'énergie de déformation interne devient favorable aux rétro-chevauchements.

Les paramètres géométriques et cinématiques étant fixés (angles de rampes et de paliers, angle du palier initial, taux de changement de la pente basale, etc...), on constate, pour une valeur donnée de  $\tau_y$ , qu'à partir d'un certain stade de déplacement (fig. 76c) le rétro-chevauchement consomme moins d'énergie de déformation interne que le pro-chevauchement.

On peut alors rechercher pour chaque stade du déplacement les valeurs limites du seuil de plasticité  $\tau_y$  qui permettrait le développement des rétro-chevauchements. Cela consiste à rechercher pour chaque stade la valeur du seuil de plasticité nécessaire pour que les économies d'énergie sur la déformation interne et sur l'énergie gravitaire compensent le surplus d'énergie de frottement associé aux rétro-chevauchements. Les calculs et les valeurs sont présentés sur la figure 77 pour les différents modèles. En ce qui concerne la coupe considérée ici (fig. 77b), on note que de tels chevauchements ne peuvent apparaître qu'au troisième incrément de déplacement (après le deuxième incrément de basculement), mais avec des valeurs de seuil de plasticité très élevées (194 MPa). On sait que le pro-chevauchement de la Sainte-Victoire Est s'est poursuivi à ce troisième incrément. Par contre, dans la suite du basculement entre le développement observé d'un rétro-chevauchement plus au Nord (montagne Vautubière) et la poursuite de la Sainte-Victoire Ouest (quatrième incrément), l'économie d'énergie potentielle (gravité) est suffisante à elle seule pour compenser le surplus de frottement. Il n'y a même plus besoin d'un seuil de plasticité minimal. Aux incréments suivants, la nécessité d'un tel seuil réapparaît, mais avec des valeurs minimales très faibles (13MPa). On vérifie ainsi que la prédiction de vergence, basée sur une consommation minimale d'énergie correspond bien aux observations naturelles avec des valeurs plausibles des paramètres mécaniques. Il faut insister sur le fait que c'est le basculement arrière qui permet le développement des rétro-chevauchements puisque dans

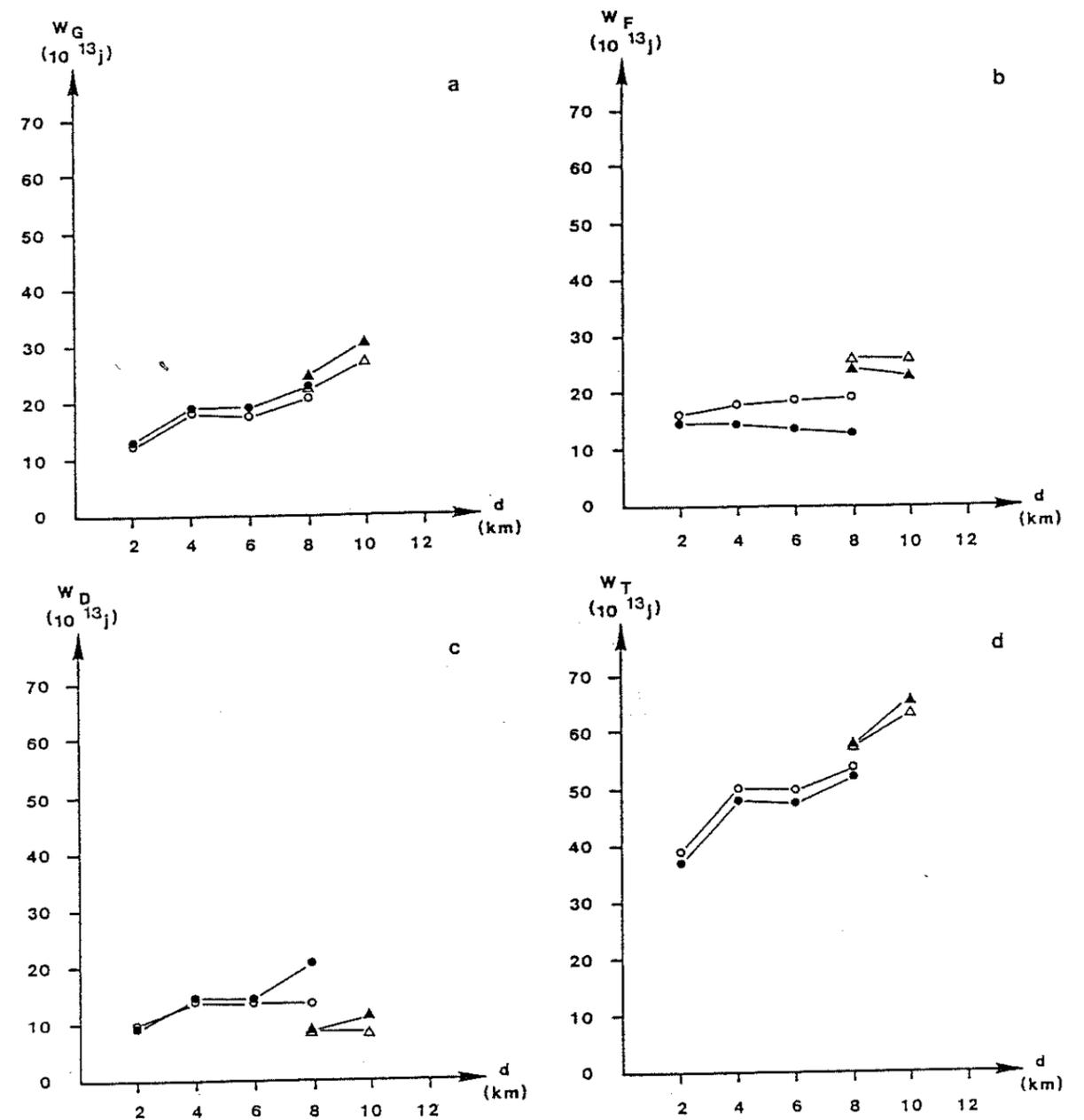


Figure 76 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement (● : Sainte-Victoire Est, ▲ : Vautubière) et un rétro-chevauchement (○ : Sainte-Victoire Est, △ : Vautubière) dans le cas de la figure 75.

$d$  = déplacement

$W_G$  = énergie consommée pour vaincre la gravité

$W_F$  = énergie consommée pour vaincre le frottement

$W_D$  = énergie consommée pour vaincre la déformation interne

$W_T$  = énergie totale consommée

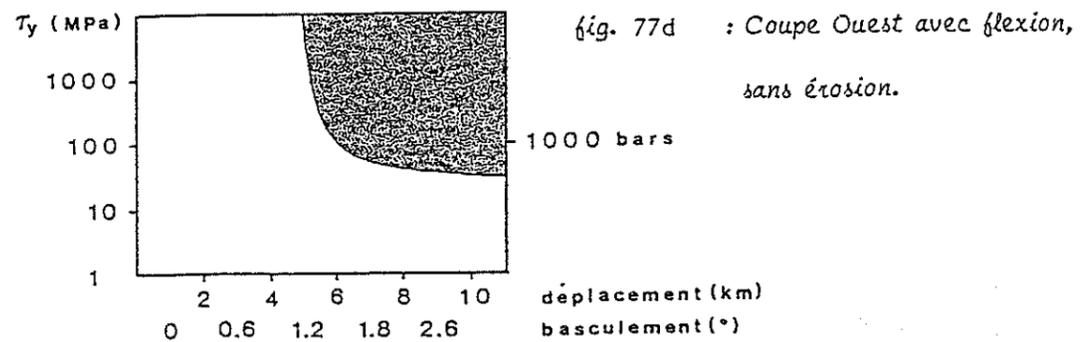
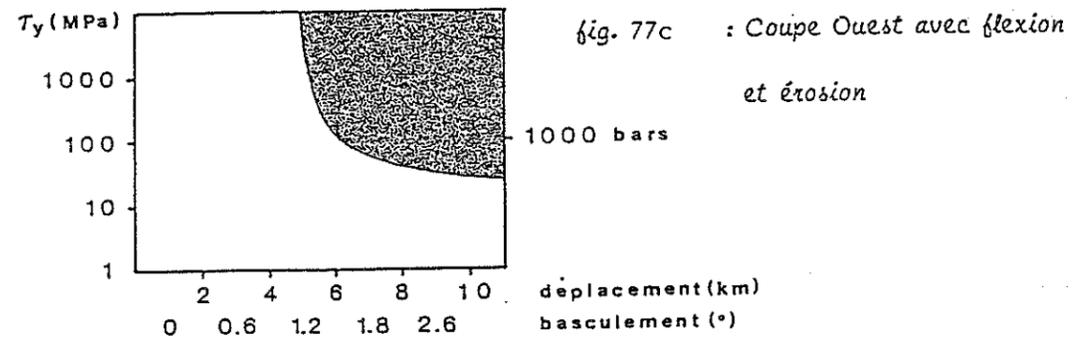
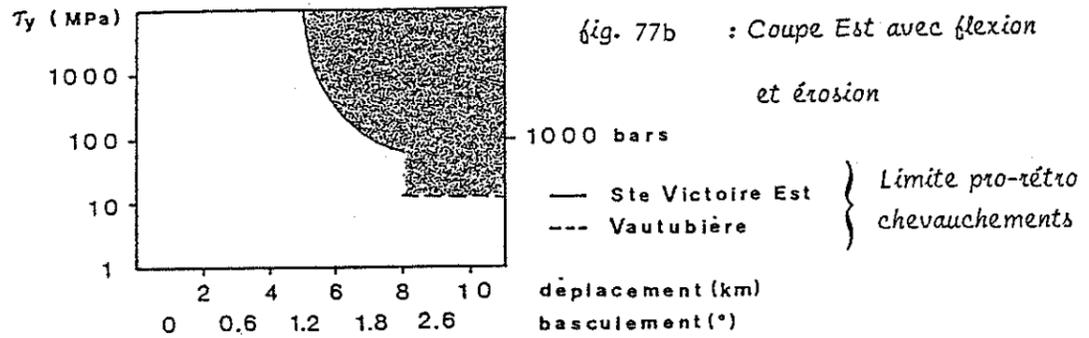
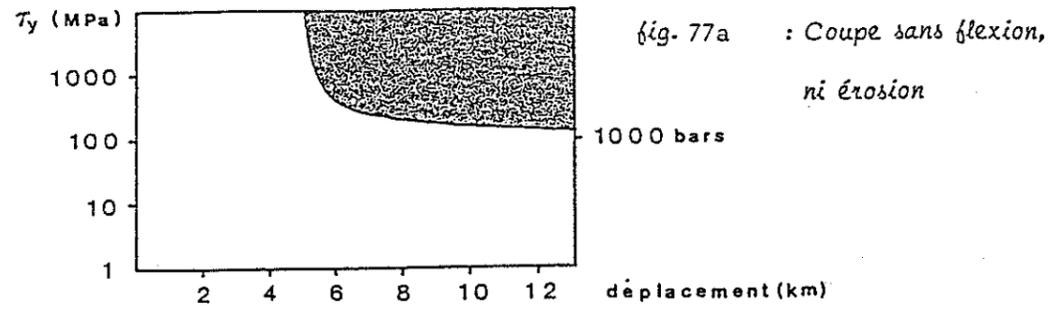


Figure 77 : Domaines des valeurs de  $\tau_y$  (grisé) pour qu'un rétro-chevauchement devienne plus économique (en énergie consommée) qu'un pro-chevauchement. La comparaison est faite avec des rampes de pendage initial identique (mais opposé), avec le même point d'initiation rampe/palier ; (a) = fig. 73, (b) = fig. 75, (c) = fig. 79, (d) = fig. 32 ; calculs avec  $\tau_b = 4$  MPa. Pour qu'un rétro-chevauchement se développe, il faut aussi que les valeurs de  $\tau_y$  soient réalistes, par exemple, plutôt inférieures à 100 MPa. Voir page suivante pour calculs.

Calcul pour la figure 77

$$\tau_y \geq \frac{(WF_R - WF_P) - (WG_P - WG_R)}{(WD_P - WD_R)} \cdot 5 \cdot 10^7 \quad \text{avec } \tau_b = 4 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

avec  $WG_P, WF_P, WD_P$  respectivement égales à l'énergie gravitaire, de frottement et de déformation interne pour un pro-chevauchement.  
 $WG_R, WF_R, WD_R$  respectivement égales à l'énergie gravitaire, de frottement et de déformation interne pour un rétro-chevauchement.

Calcul pour la figure 78

$$\tau_b \leq \frac{(WG_P - WG_R) + (WD_P - WD_R)}{(WF_R - WF_P)} \cdot 4 \cdot 10^6 \quad \text{avec } \tau_y = 50 \text{ MPa}$$

avec  $WG_P, WF_P, WD_P$  respectivement égales à l'énergie gravitaire, de frottement et de déformation interne pour un pro-chevauchement.  
 $WG_R, WF_R, WD_R$  respectivement égales à l'énergie gravitaire, de frottement et de déformation interne pour un rétro-chevauchement.

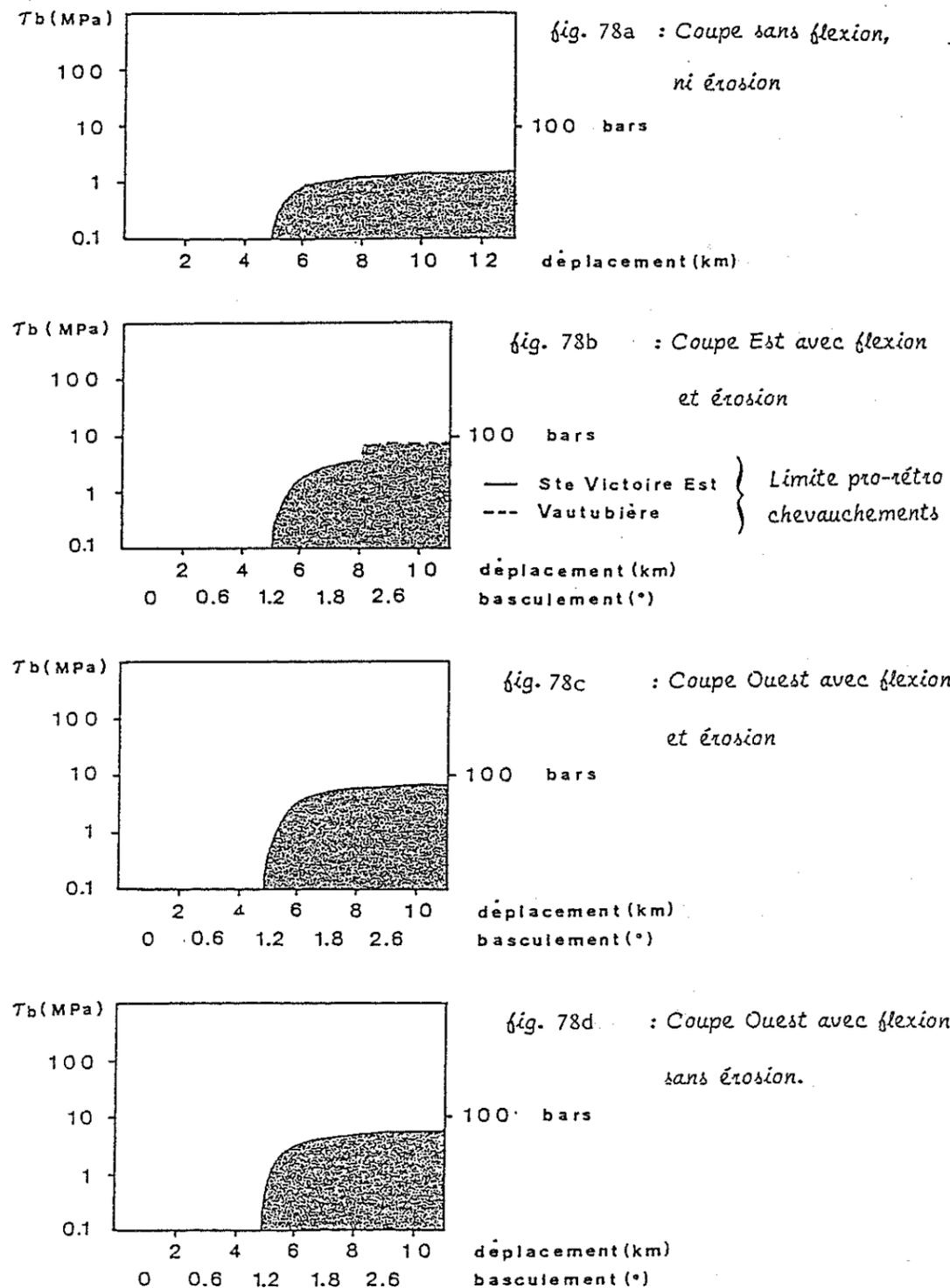


Figure 78 : Domaines des valeurs de  $\tau_b$  (grisé) pour qu'un rétro-chevauchement devienne plus économique (en énergie consommée) qu'un pro-chevauchement. La comparaison est faite avec des rampes de pendage initial identique (mais opposé) avec le même point d'initiation rampe/palier, (a) = fig. 73, (b) = fig. 75, (c) = fig. 79, ~~(d) = fig. 74~~, calculs avec  $\tau_y = 50$  MPa. Pour qu'un rétro-chevauchement se développe, il faut aussi que les valeurs de  $\tau_b$  soient réalistes, par exemple, plutôt supérieures à 1 MPa. Voir page précédente pour calculs.

le cas de pente constante, le même calcul des seuils de plasticité nécessaires au développement de rétro-chevauchements ne permet pas de trouver des valeurs plausibles à ces seuils (fig. 77a). On peut faire le même type de calcul que ci-dessus pour estimer cette fois le coefficient de frottement ( $\tau_b$ ), nécessaire pour que le développement d'un rétro-chevauchement soit plus rentable qu'un pro-chevauchement, en se fixant  $\tau_y$  (fig. 78).

On peut remarquer également que le relai dans l'espace entre pro-chevauchement et rétro-chevauchement doit correspondre aussi, selon cette logique, à une consommation minimale d'énergie : le surplus d'énergie de frottement consommé pour un chevauchement plus externe est compensé par l'économie réalisée sur les énergies gravitaires et de déformation interne.

Sur la figure 76, pour les valeurs choisies des paramètres mécaniques ( $\tau_b = 4$  MPa,  $\tau_y = 50$  MPa), le développement de la montagne Vautubière par rapport à la poursuite du pro-chevauchement de la Sainte Victoire Est, est défavorable du point de vue du frottement, très favorable pour la consommation d'énergie liée à la déformation interne, pratiquement identique pour l'énergie gravitaire et un peu défavorable pour le total de l'énergie consommée. Mais on peut calculer la valeur du frottement nécessaire pour que ce bilan d'énergie devienne favorable pour le total de l'énergie consommée. Le principe du calcul de  $\tau_b$  est du même type que celui donné dans la figure 78, mais le bilan d'énergie est fait ici entre deux chevauchements (l'un pro, l'autre rétro) qui se relaient dans l'espace : comparaison entre le quatrième incrément de la Sainte-Victoire Est et le premier incrément de la montagne Vautubière. En gardant la même valeur de  $\tau_y$ , on trouve une valeur maximale  $\tau_b$  de  $2.3 \cdot 10^6$  Pa (23 bars), qui suffit à expliquer le relai dans l'espace et dans le temps observé entre ces deux chevauchements.

Une analyse systématique de l'espacement des chevauchements dans d'autres chaînes, associée à une bonne connaissance de leur géométrie et de leur cinématique permettrait de mieux contraindre les valeurs des paramètres mécaniques. A partir de telles valeurs, des prédictions sur l'espacement des chevauchements pourraient être entreprises sur des secteurs moins bien connus.

### II.1.3. Bilan d'énergie pour les coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire

#### a/ Interprétation des coupes à l'Ouest avec une écaille intracutané

Selon cette interprétation, une série sédimentaire en biseau a été affectée d'un rétro-chevauchement de grande amplitude (éventuellement précédé d'un pro-chevauchement d'amplitude limitée correspondant à la faille du Bimont). La pente initiale du palier sur cette coupe Ouest est de  $1,5^\circ$ , elle est supérieure à celle adoptée sur la coupe Est. Une

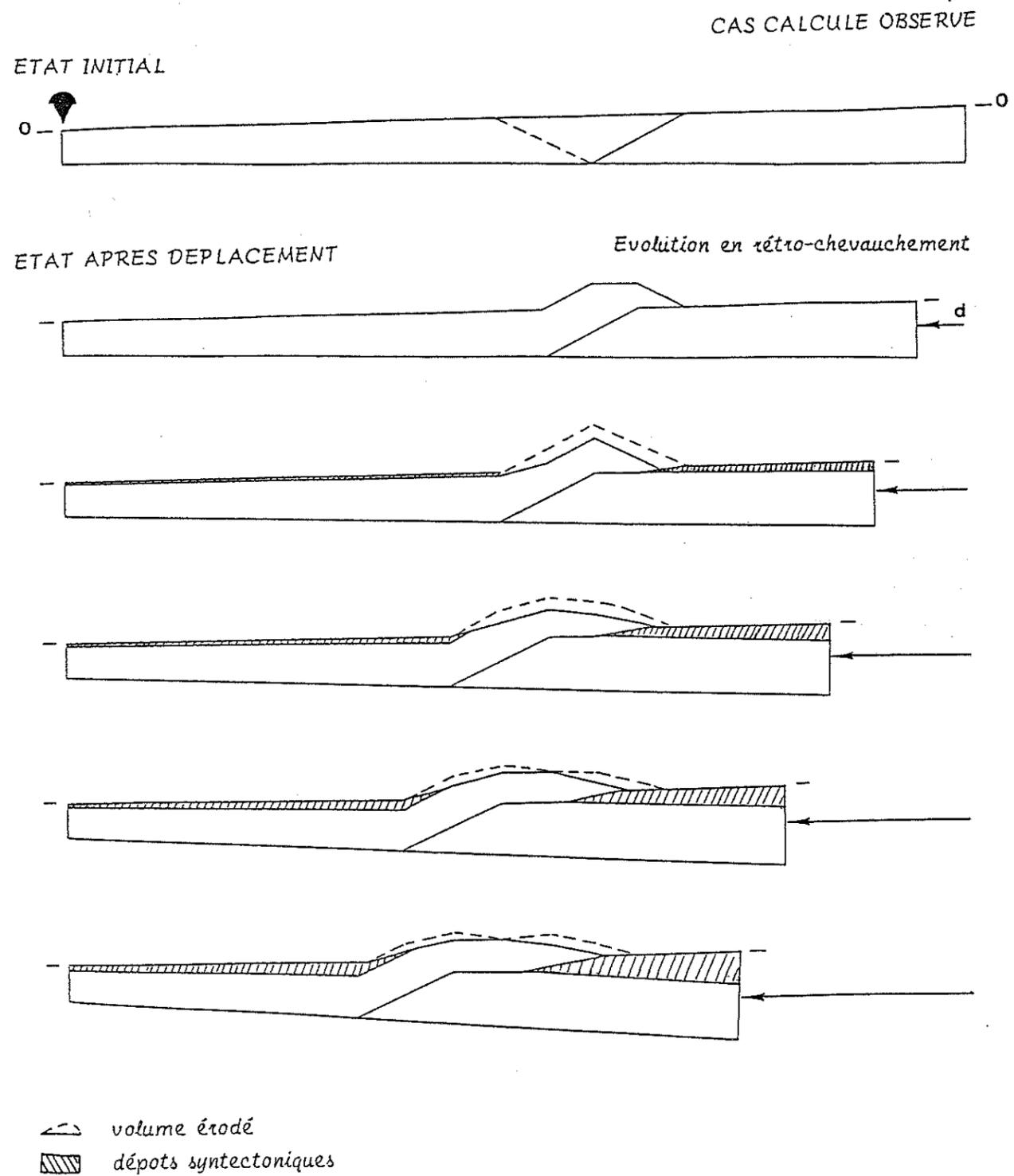


Figure 79 : Modèle avec flexion et érosion établi à partir des coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire (fig. 61), interprétées avec une écaille intracutanée.

## CAS CALCULE POUR COMPARAISON

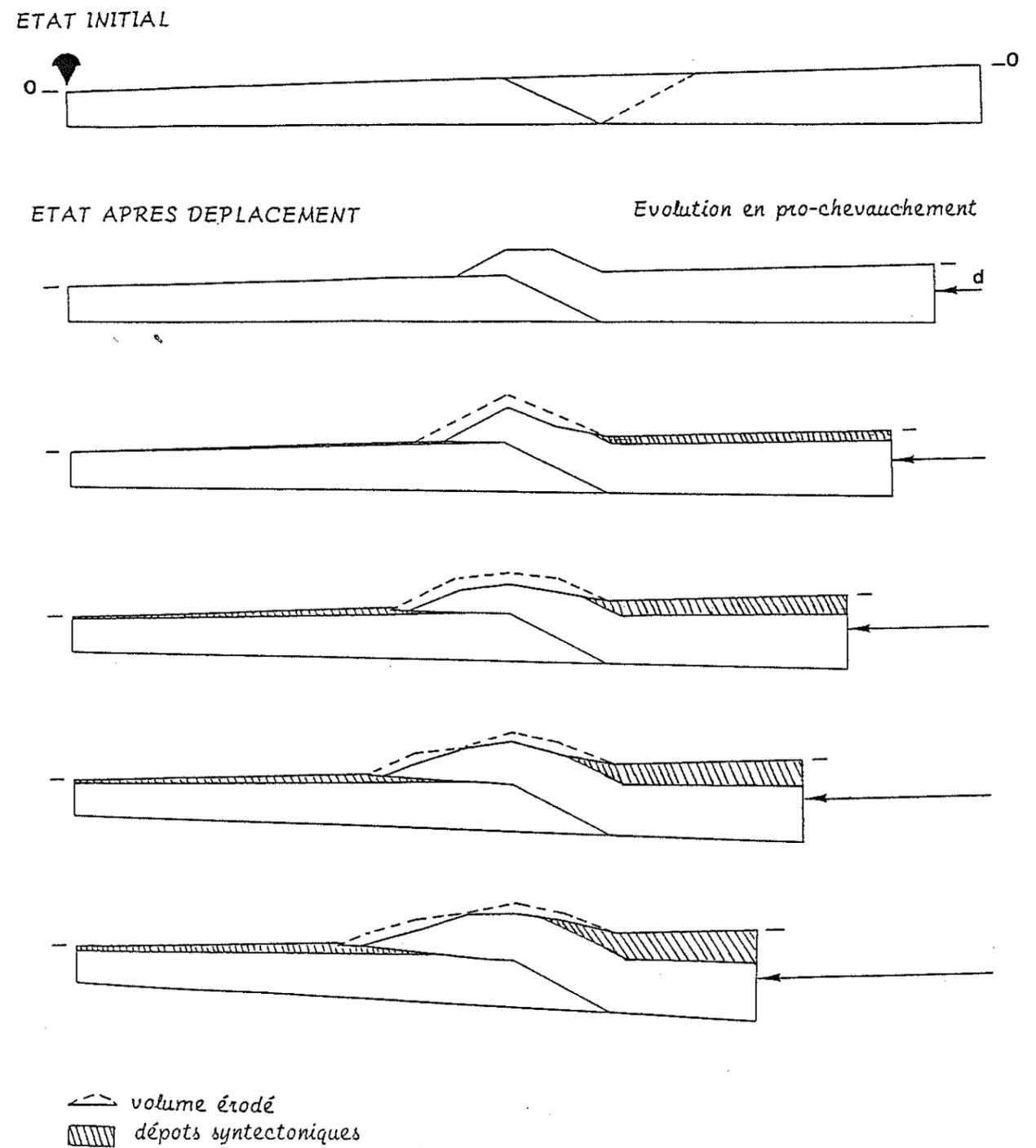


Figure 79 : Modèle avec flexion et érosion établi à partir des coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire (fig. 61).

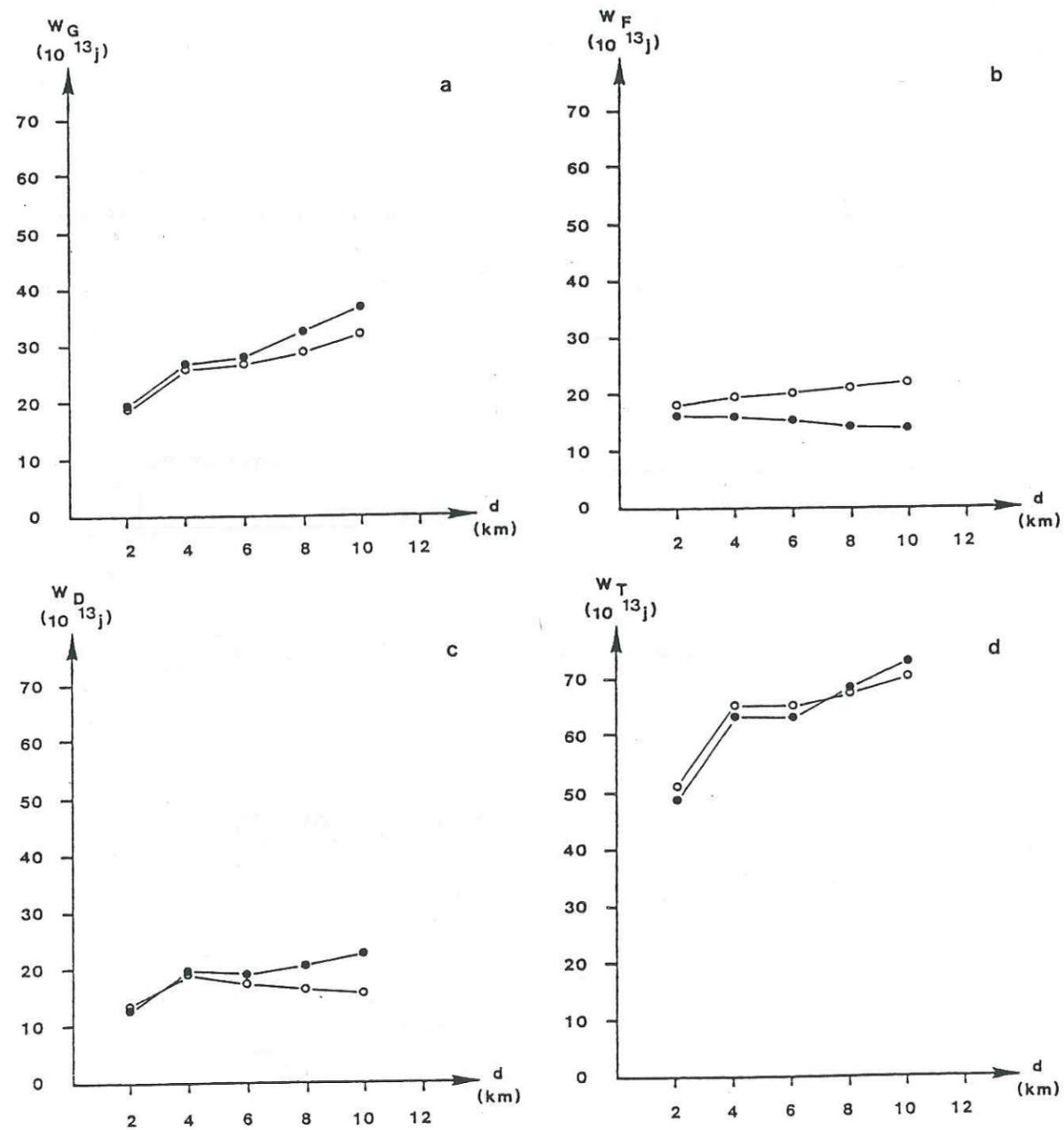


Figure 80 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement (•) et un rétro-chevauchement (◦) dans le cas de la figure 79.

d = déplacement

$W_G$  = énergie consommée pour vaincre la gravité

$W_F$  = énergie consommée pour vaincre le frottement

$W_D$  = énergie consommée pour vaincre la déformation interne

$W_T$  = énergie totale consommée

évolution identique des incréments de déplacement et de basculement a par contre été choisie (12 km de déplacement, basculement de 2,6°). La règle de bilan entre érosion et sédimentation est également la même (fig. 79).

L'évolution comparative des énergies consommées, dans l'hypothèse d'un pro ou d'un rétro-chevauchement est donnée dans la figure 80. On voit, qu'avec les valeurs choisies pour les paramètres mécaniques ( $\tau_b = 4 \text{ MPa}$ ,  $\tau_y = 50 \text{ MPa}$ ), la différence de consommation pour la déformation interne est favorable au pro-chevauchement pour les deux premiers incréments de déplacement, et ensuite, comme pour la coupe Est, cette tendance s'inverse au troisième incrément. La valeur minimale du seuil de plasticité nécessaire pour que cette économie sur l'énergie de déformation interne et l'énergie gravitaire, compense le surplus de frottement dans le développement des rétro-chevauchements, est de 117 MPa. Comme précédemment cette valeur diminue encore aux incréments suivants pour atteindre des valeurs plus plausibles de 41 puis 25,7 MPa.

Même en admettant que les premières structures développées sur cette coupe Ouest aient pu être de type pro-chevauchement (faille du Bimont), il paraît difficile d'attribuer un déplacement de plusieurs kilomètres à ce chevauchement. L'analyse en terme d'énergie minimale calculée sur une coupe apparaît ici insuffisante pour expliquer le développement d'un rétro-chevauchement aussi précoce. Nous compléterons cette explication par une approche cinématique.

Nous avons aussi essayé de tester sur cette coupe l'hypothèse d'une érosion retardée par rapport aux dépôts. Les énergies consommées ont été calculées pour la même séquence de déplacement et de basculement mais sans érosion des reliefs (fig. 81). La comparaison avec les calculs précédents permet de mieux comprendre le rôle de l'érosion. Ce phénomène se traduit évidemment par un gain important sur la consommation d'énergie gravitaire. On note en particulier, la différence de pente entre les courbes des figures 80a et 81a, et aussi la rupture de pente sur les figures 76a et 80a qui traduit l'effet du début de l'érosion sur la consommation de l'énergie gravitaire. L'érosion a aussi un effet sur la longueur de frottement mais sans différence notable entre les deux types de chevauchements. En ce qui concerne l'évolution des différences d'énergie consommée entre pro et rétro-chevauchement, illustrée par l'évolution des valeurs du seuil de plasticité nécessaires au développement des rétro-chevauchements, l'évolution sans érosion est moins favorable au développement de rétro-chevauchements que l'évolution avec érosion particulièrement pour les grands déplacements (fig. 77d).

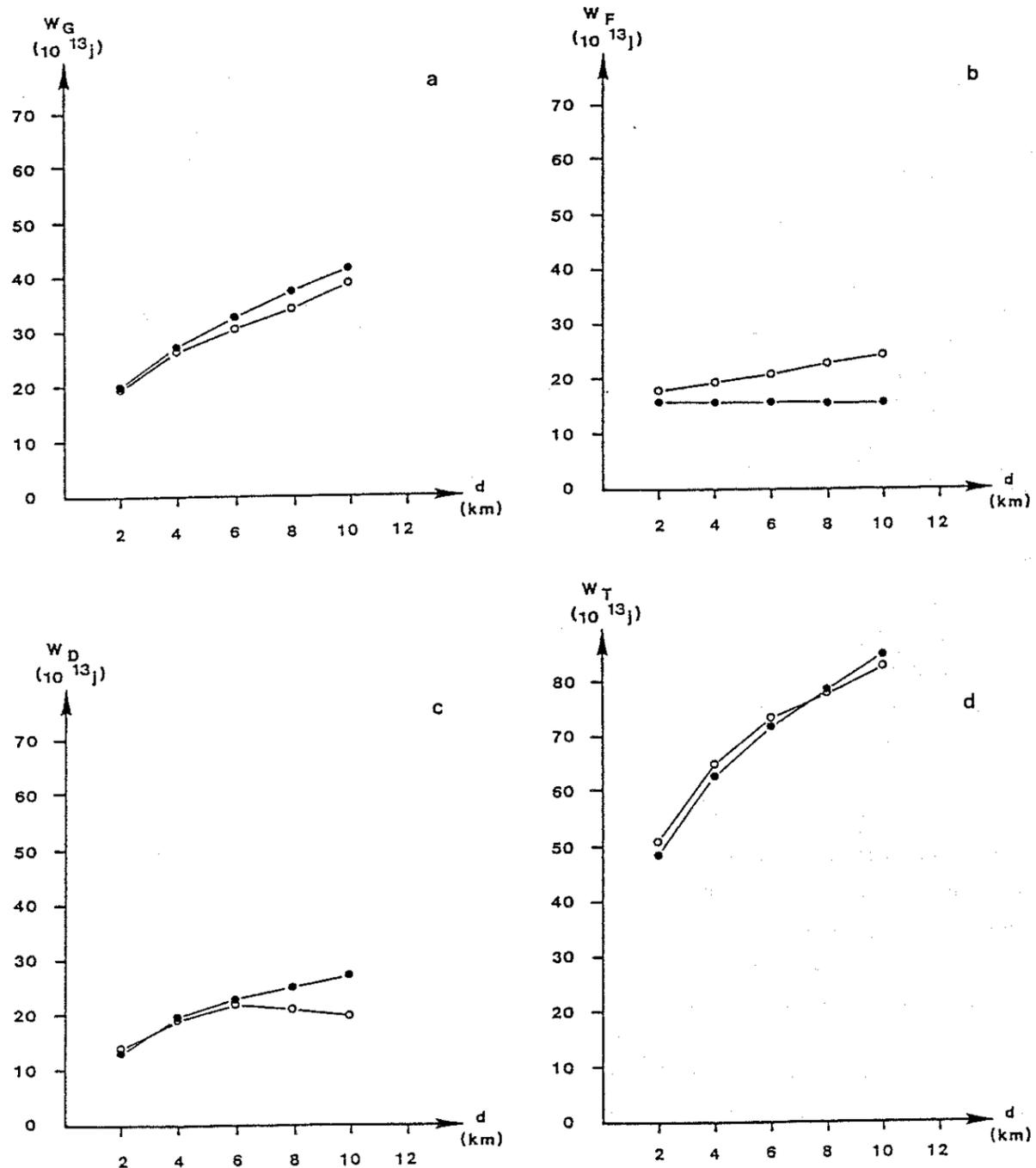


Figure 81 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement (•) et un rétro-chevauchement (◦) dans le cas d'un modèle avec flexion mais sans érosion établi à partir des coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire (fig. 61), interprétées avec une écaille intracutanée.

d = déplacement

$W_G$  = énergie consommée pour vaincre la gravité

$W_F$  = énergie consommée pour vaincre le frottement

$W_D$  = énergie consommée pour vaincre la déformation interne

$W_T$  = énergie totale consommée

## b) Interprétation des coupes à l'Ouest avec une flexure de socle

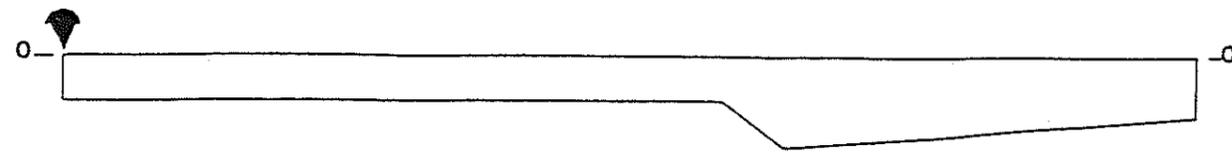
Selon cette interprétation, une flexure (ou faille) de socle doit être associée à une variation d'épaisseur du Lias, avec un maximum d'épaisseur au Sud de la Sainte-Victoire (fig. 58). Lors du déplacement (toujours du Sud vers le Nord) de la couverture, le passage de cette série épaisse au-dessus de la flexure serait responsable de la surélévation observée du bois de Concors (Nord de la Sainte-Victoire).

Nous avons construit une évolution géométrique et cinématique compatible avec les données. Un déplacement du Sud vers le Nord de 8 km est nécessaire pour modéliser la surélévation du bois de Concors. Le palier du compartiment situé au Sud de la Sainte-Victoire ayant un pendage Nord (fig. 58), ce simple déplacement de couverture se traduit par le développement d'un bassin au Sud de la Sainte-Victoire (nécessité géométrique). Mais cette pente n'est pas suffisante pour expliquer l'épaisseur complète du Crétacé supérieur et Tertiaire (1.5 km). Nous avons donc, comme pour les coupes précédentes, ajouté des incréments de basculement vers l'arrière après chaque incrément de déplacement. La différence avec les autres coupes porte seulement sur l'amplitude de ces basculements ( $1,7^\circ$  au lieu de  $2,6^\circ$ ). Comme précédemment, nous avons pris en compte une érosion des reliefs au fur et à mesure de leur développement, de telle façon que le relief de la dernière coupe soit identique au relief actuel.

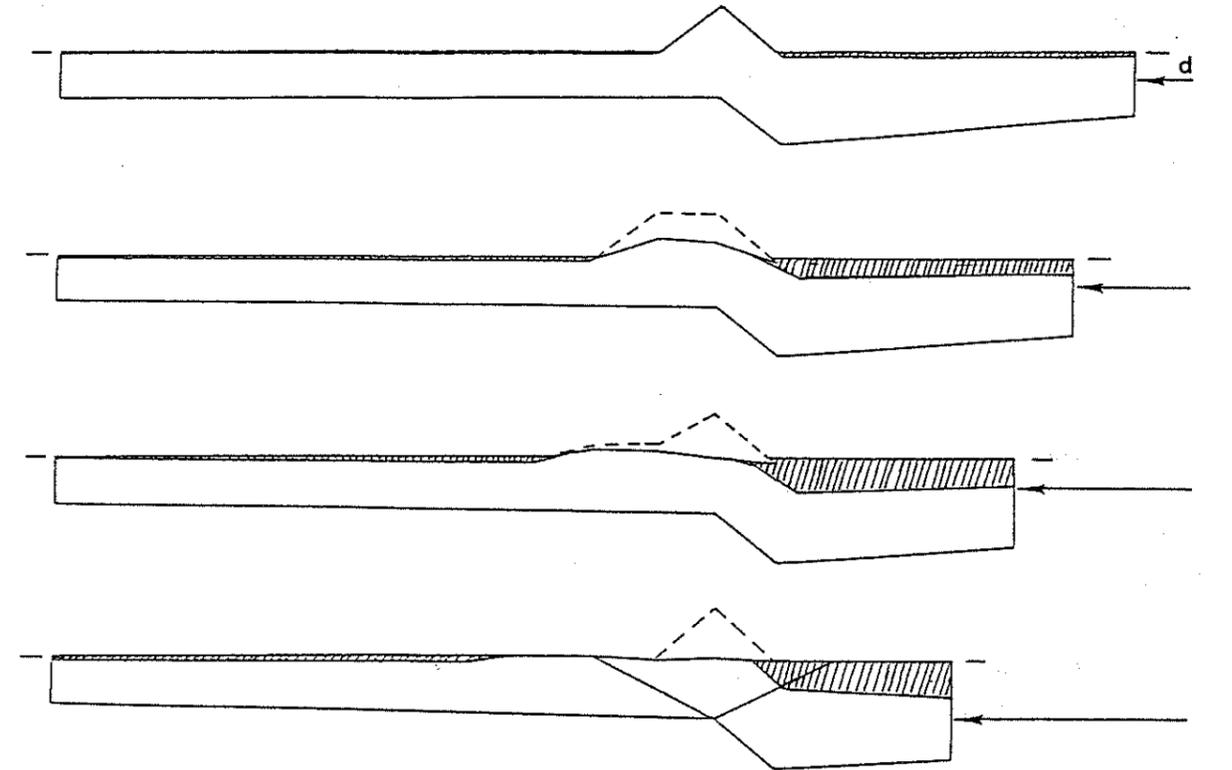
Ce déplacement de la couverture par rapport au socle, sur le palier au niveau de la Sainte-Victoire implique une remontée en rampe sur des chevauchements ou au moins le développement de plis dans la couverture, plus au Nord. De telles structures ont été observées dans le sondage de Pont-de-Mirabeau. Leur géométrie n'est cependant pas assez fiable pour nous permettre de calculer précisément l'évolution de l'énergie consommée lors de ces premiers kilomètres de déplacement. La reconstitution cinématique qui en a été faite (fig. 82) n'avait pour objet que d'aboutir à une géométrie fiable avant le jeu en rétro-chevauchement de la Sainte-Victoire. Un tel rétro-chevauchement doit en effet intervenir au cinquième incrément de déplacement pour modéliser la géométrie finie observée (fig. 58).

Les énergies consommées ont été calculées uniquement pour le cinquième incrément dans les deux hypothèses d'un rétro-chevauchement ou d'un pro-chevauchement. Comme précédemment, la comparaison porte sur des structures développées sur des rampes ayant le même pendage initial et le même point d'initiation sur le palier (ici le sommet de la flexure). Le développement d'un rétro-chevauchement n'est jamais rentable d'un point de vue énergétique, et ceci pour les trois types de dépenses d'énergies considérées. Cette évolution n'est pas pour autant à rejeter comme l'indique un autre type d'approche dite

ETAT INITIAL

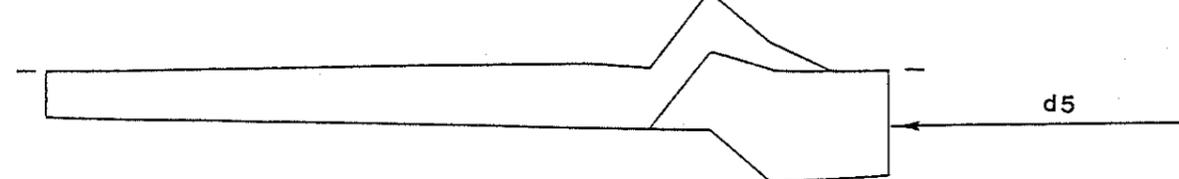


ETAT APRES DEPLACEMENT



Evolution en rétro-chevauchement

CAS CALCULE OBSERVE



Evolution en pro-chevauchement

CAS CALCULE POUR COMPARAISON



volume érodé

dépôts syntectoniques

Figure 82 : Modèle en flexion avec érosion établi à partir des coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire (fig. 58), interprétées avec un passage sur une flexure de socle.

cinématique que nous avons envisagée pour expliquer la vergence des chevauchements.

## II.2. Approche cinématique, effet des bordures

Ce type d'approche est basé sur l'analyse des champs de déplacement dans des zones de chevauchements. L'effet de gradients de vitesse de déplacement est particulièrement important pour la vergence des chevauchements. Cette approche implique l'analyse de champs de déplacement (et donc d'état de contrainte) hétérogène, contrairement à l'approche énergétique qui postulait plutôt une certaine homogénéité de ces paramètres.

Une présentation des résultats d'expérimentation analogique de MM F. Odonne (1981) et de J.F. Ballard (1988) permet d'illustrer cette approche cinématique.

F. Odonne (1981) a étudié l'évolution de la forme et de l'orientation des plis d'une couverture induits par des décrochements de socle. Sur l'observation de tels plis, dans un multi-couches de parafine et de graisse, cette hauteur a montré que lorsque le socle rigide transmet le déplacement à sa couverture, un décrochement au niveau de ce socle se traduit dans la couverture par un déversement des plis. Sur une coupe perpendiculaire au plan de décrochement, on observe des déversements inversés de part et d'autre de la trace de la faille (fig. 83). L'explication en est que les couches situées le plus près du socle sont déplacées (et plissées) à une vitesse supérieure à celles des couches situées près de la surface de la série décollée. Dans ce cas, le déversement des structures est un effet induit par la cinématique choisie pour le modèle.

J.F. Ballard (1988) a étudié, plus particulièrement, le problème de la vergence des chevauchements. Dans le dispositif utilisé par cet auteur, les chevauchements sont localisés dans une couche de sable qui surmonte une fine couche d'un matériau ductile. L'ensemble est déformé dans une boîte comportant deux parties : l'une mobile, l'autre fixe. Un raccourcissement horizontal est obtenu par le déplacement d'une moitié de la boîte, les parois latérales et le plancher pouvant s'emboîter (fig. 84a).

Selon les conditions aux limites, imposées sur les parois latérales, c'est-à-dire selon que ces parois latérales sont solidaires ou pas du plancher mobile, la vergence des chevauchements est différente. On voit, sur la figure 84b, la vergence des chevauchements obtenus lorsque le plancher mobile et son piston arrière sont déplacés alors que les parois latérales, en contact avec le sable, sont maintenues fixes. Cette vergence est telle que le compartiment situé au-dessus du plancher mobile est toujours chevauché (au moins pour le premier chevauchement initié sur la discontinuité de vitesse au niveau de l'emboîtement des planchers).

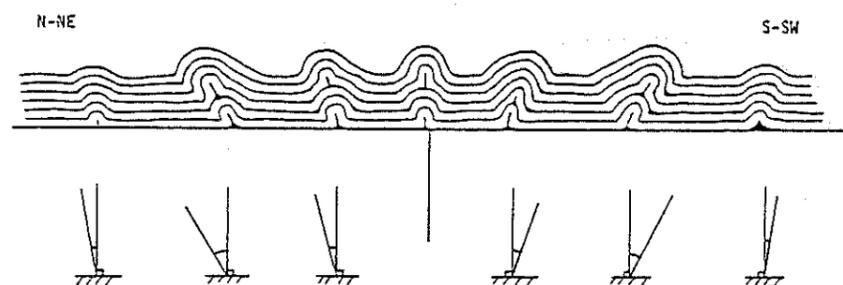
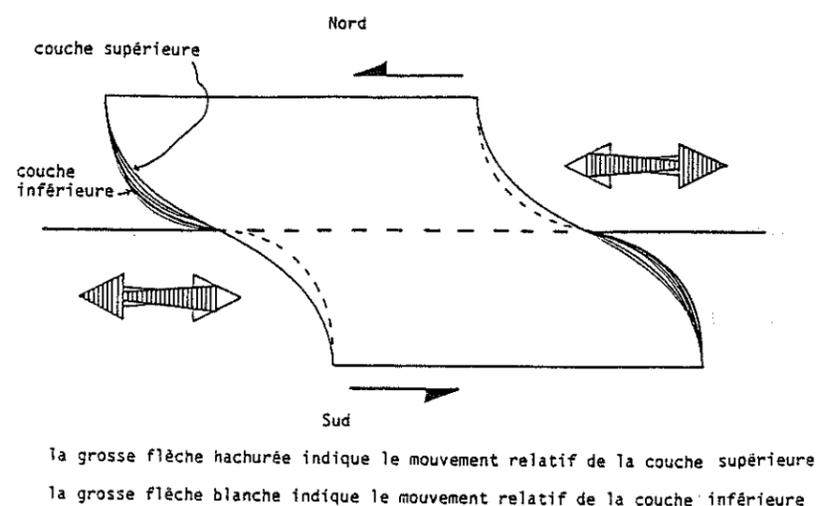


Figure 83 : Résultats obtenus par F. Odonne (1981).

fig. 83a : Dispositif expérimental, schéma montrant le glissement couche sur couche au sein de la couverture.

fig. 83b : Coupe du modèle sensiblement perpendiculaire aux axes de plis, montrant le déversement opposé des plis de par et d'autre de la faille.

Par contre on voit sur la figure 84c, que lorsque les parois latérales sont solidaires du plancher mobile sur toute la longueur de ce plancher, on obtient une vergence inverse du chevauchement : le compartiment situé au-dessus du plancher mobile peut devenir chevauchant. La probabilité d'obtention de ces vergences n'est pas la même dans les deux cas. Une étude approfondie des effets de bordure latérale (mobile ou non) sera développée dans la thèse de J.F. Ballard, notamment grâce aux résultats obtenus à partir de dispositifs intermédiaires entre les deux précédemment cités (longueur des parois mobiles différentes de la longueur du plancher mobile).

En première approximation, on peut considérer que l'inversion de vergence décrite par J.F. Ballard est liée aux différences de frottement sur les bordures latérales. On remarque en effet, que dans les deux cas, la même discontinuité de vitesse se produit au niveau de l'emboîtement plancher fixe/plancher mobile (avec des vitesses constantes aux limites de chacun de ces planchers). De même, dans les deux cas du fait des butées avant et arrière, les vitesses de déplacement horizontales près de ces butées sont constantes sur toute la hauteur du matériau déformé. Par contre, le long des parois latérales selon qu'elles sont mobiles ou non par rapport au matériau, les conditions aux limites (et donc les vitesses de déplacement) sont différentes.

- Dans le cas de parois latérales solidaires du plancher mobile (fig. 84c), le matériau déformé, situé au-dessus de ce plancher, est entraîné à la fois à la base, par l'arrière et par les côtés. On a donc un déplacement quasi-uniforme de toute la pile déformée.

- Dans l'autre cas (parois latérales fixes, fig. 84b), cette partie de matériau située au dessus du plancher mobile n'est plus entraînée que par la base et l'arrière, elle est plutôt freinée sur les côtés. On a alors une décroissance des vitesses de déplacement du bas vers le haut de la pile, déformée comme dans le cas de la modélisation de F. Odonne. Cette décroissance de vitesse impose systématiquement le sens du déversement dans le dispositif à parois fixées (fig. 84b) alors que dans l'autre cas (fig. 84c) la vergence doit être fonction d'autres critères.

Il est possible d'utiliser les résultats obtenus par F. Odonne (1981) et J.F. Ballard (1988) pour interpréter les rétro-chevauchements de la Sainte-Victoire. Dans cette région, en effet, la présence d'une faille de décrochement N30 sénestre est bien connue par les données géologiques et géophysiques. Cette faille d'Aix-Meyreuil (ou de la Durance, plus au Nord) correspond à une limite majeure de sédimentation : séries épaisses à l'Ouest, plus minces à l'Est où se développent les structures de la Sainte-Victoire et les structures associées. Il est clair que le déplacement facile des séries orientales, plus minces sera freiné contre les séries plus occidentales. En ce sens, on retrouve un peu les conditions de l'expérience à parois fixes de J.F. Ballard (84b). Le rétro-chevauchement connu immédia-

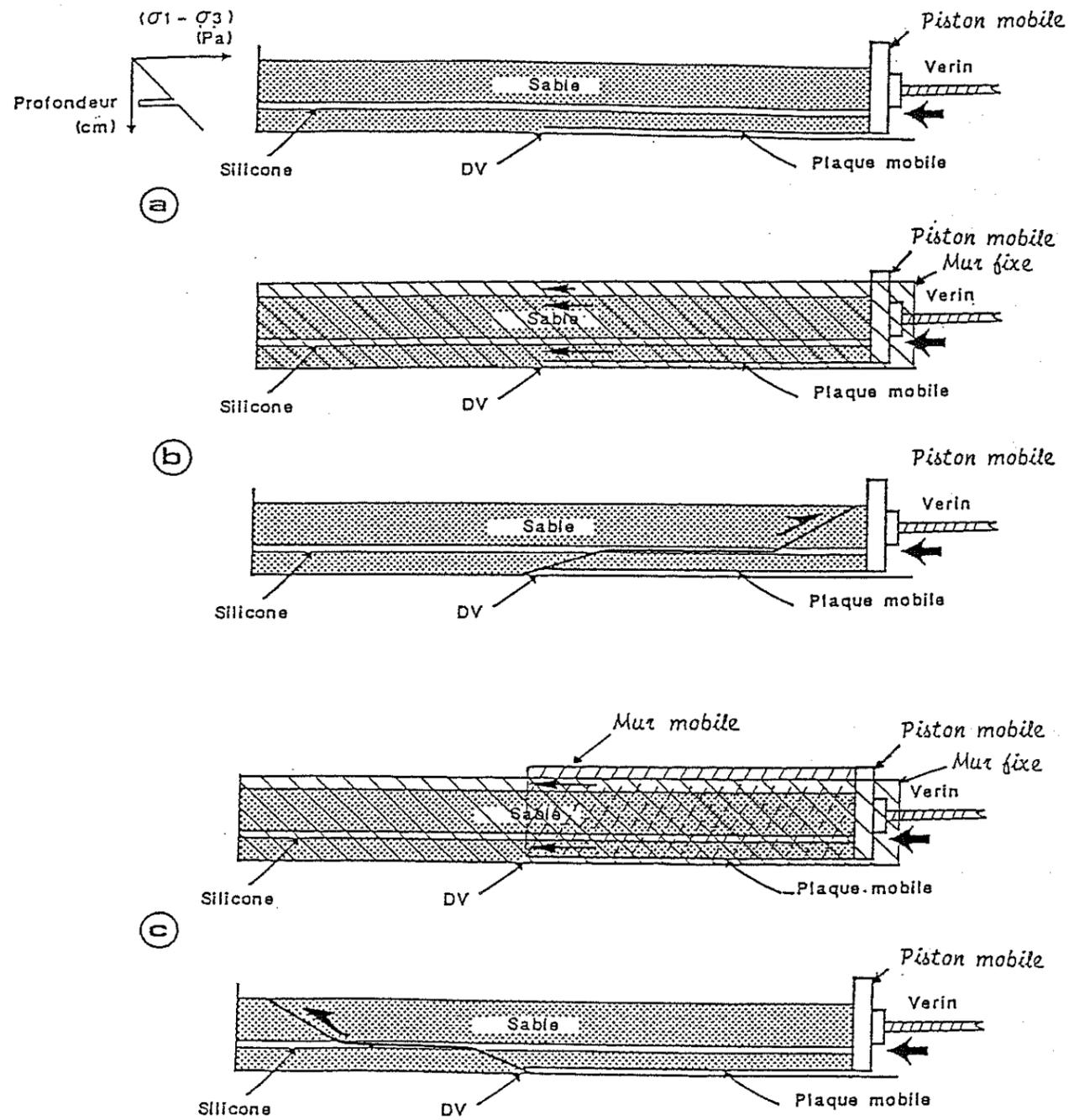


Figure 84 : Expérimentation analogique de J.F. Ballard et al. (1987) qui permet d'étudier la vergence des chevauchements en fonction des conditions aux limites latérales.

fig. 84a : Dispositif expérimental

fig. 84b : Plaque et piston arrière mobiles, murs latéraux fixes sur tout la longueur de la boîte (haut) et vergence des chevauchements (bas).

fig. 84c : Plaque, piston arrière et murs latéraux mobiles sur tout la longueur de la plaque mobile (haut) et vergence des chevauchements (bas).

← déplacement

tement à l'Est du décrochevement d'Aix-Durance (coupe I et II, fig. 61) implique, comme dans les résultats expérimentaux, une vitesse de déplacement de la base de la couverture (du Sud vers le Nord) plus grande que celle du haut.

Dans les expériences de F. Odonne, l'amortissement latéral des plis en échelon de la couverture sur un décrochement de socle, était lié à l'évolution latérale du glissement à l'interface socle/couverture : glissement facile près de la faille, limité ou impossible à une certaine distance. Pour les structures de la Sainte-Victoire, il n'y a pas d'amortissement latéral des structures en s'éloignant de la faille d'Aix. Au contraire, le décollement socle/couverture et les chevauchements corrélatifs se produisent également loin à l'Est. On peut admettre que dans ces régions orientales, la décroissance de vitesse de déplacement entre les niveaux de la couverture près du socle et ceux qui sont plus près de la surface est négligeable (analogie avec fig. 84c), au contraire de ce qui vient d'être décrit près de la faille d'Aix (analogie avec fig. 84b). Ce fait, joint aux autres paramètres pris en compte, peut suffire à expliquer l'évolution des structures d'Ouest en Est et la localisation des rétrochevauchements près de la faille d'Aix.

Il est important de souligner que l'effet de freinage lié au jeu décrochant de la limite occidentale des structures de la Sainte-Victoire n'a pas à être pris en compte pour expliquer l'ensemble des déplacements en rétrochevauchement. Dans l'hypothèse d'un écaillage intracutané de grande amplitude (rétrochevauchement), il faut rappeler que la première moitié du déplacement (4 km) est énergiquement plus rentable en prochevauchement. Ce déplacement peut alors être accomodé partiellement par le jeu de la faille de Bimont, mais nous avons vu que le déplacement lié à cette faille reste limité (de l'ordre du kilomètre). Le développement d'un rétrochevauchement dès les deux ou trois premiers kilomètres de déplacement doit donc être assisté par le jeu en décrochement de la faille d'Aix (approche cinématique proposée ci-dessus). Par contre, après les premiers basculements, le chevauchement doit se poursuivre normalement de façon plus économique en rétrochevauchement.

De même, on a vu que pour le glissement d'une série épaisse sur la flexure de socle, les 4/5 du déplacement se produisent par un simple passage sur cette flexure et que le 1/5 restant nécessite seul un rétrochevauchement. Deux kilomètres de déplacement sont donc énergiquement peu rentables, pour lesquels on peut admettre l'assistance des frottements sur le décrochement latéral.

On constate que le rôle des frottements, liés au décrochement n'intervient que pour quelques kilomètres de déplacement et, selon les hypothèses, plutôt au début ou plutôt à la fin du déplacement.

## CONCLUSIONS

Le but de cette étude était de définir les facteurs qui déterminent l'amortissement d'un système chevauchant et en particulier les structures, assez fréquentes dans les régions frontales d'une chaîne de collision, où les vergences de chevauchement s'opposent : structures en "pop-up" et en "zones triangulaires". Le choix d'un secteur où est exposée de façon exemplaire l'inversion de chevauchements par rapport à la direction générale de déplacement, s'est porté sur la Montagne Sainte-Victoire. En effet, depuis longtemps des chevauchements contraires y sont bien connus, bien documentés et assez accessibles. Ces structures, qui nous paraissaient répondre à celles requises pour traiter le problème posé, y ont été désignées, afin de faciliter le langage, par les termes de "pro"-chevauchements, lorsque les vergences sont dans le sens du transport général (ici, charriages en direction du Nord), et de "rétro"-chevauchements, lorsqu'elles sont en sens opposé (ici vers le Sud, comme le chevauchement de la Sainte-Victoire proprement dit.

Sur cet exemple particulier, on a donc tenté de caler, en dimensions réelles, la géométrie, la cinématique et quelques paramètres mécaniques réalistes susceptibles de commander les conditions de formation de pro et de rétro-chevauchements.

Il était d'abord indispensable d'établir la géométrie des structures régionales avec un maximum de précision possible et une vraisemblance qui tienne compte, de façon cohérente, de toutes les données disponibles. La méthode actuellement la plus efficace pour intégrer au mieux une documentation géométrique de surface et de profondeur et un modèle cinématique logique, est la construction équilibrée d'une coupe verticale contenant la direction de déplacement. Dans le cas particulier, qui offrait l'intérêt de relais latéraux et longitudinaux entre pro et rétro-chevauchements, de telles constructions ont été effectuées en coupes sériées parallèles dont la compatibilité de l'équilibrage a été assurée. Ainsi, géométrie et cinématique des structures choisies en exemple ont été plus fortement contraintes et la vraisemblance de l'interprétation adoptée en a été accrue.

Cet objectif a été atteint d'abord par une synthèse des données existantes, puisées à différentes sources. Cela a permis de prendre en compte les caractéristiques des formations impliquées et en particulier leurs variations latérales d'épaisseur, souvent importantes. Une nouvelle cartographie de certains points de détail, de nouvelles mesures d'épaisseur ou de pendages de différents objets structuraux, sont venues compléter, avec de nouvelles déterminations de l'âge ou de la position relative de diverses formations, ces documents de base. Ceux-ci restaient en effet incomplets, ou parfois ambigus et les précisions apportées

étaient indispensables pour réaliser les constructions prévues.

Ainsi, les relations dans le temps et dans l'espace, entre les phénomènes d'érosion et de sédimentation et le développement des chevauchements ont été précisées avec un bilan des transferts au cours des déformations. La direction générale du déplacement des unités décollées a été déterminée Nord 30°, qui est donc celle des coupes construites. Dans le but de mieux contraindre l'épaisseur de ces unités, donc la position de la surface de décollement qui, pour l'essentiel, doit se situer dans les horizons évaporitiques du Trias à l'interface socle/couverture, une étude sismique a été réalisée. Basée sur les principes traditionnels des profils sismiques, la méthode utilisée, qui a consisté à enregistrer des tirs de carrière, ressemble plus aux coupes de type recherche, destinées à déterminer les structures profondes de la croûte, qu'aux profils de type industriel, beaucoup plus lourds. Malgré la situation évidemment non modifiable des points de tirs, qui n'était pas toujours adéquate pour fournir toutes les précisions désirables, les résultats obtenus indiquent une claire différence de profondeur du socle entre l'Ouest et l'Est de la Montagne Sainte-Victoire. A l'Ouest, la surface du socle s'approfondit nettement en direction du Sud (de 3 à 4 km) avec un maximum au Sud d'Aix ; à l'Est l'interface socle/couverture reste beaucoup plus régulière toujours à une profondeur de l'ordre de 3.3 km.

Cette géométrie du plan de décollement n'a pas pu être déterminée avec plus de précision. On retiendra simplement que l'approfondissement constaté au Sud de la Sainte-Victoire peut être lié, soit à une flexure assez brutale (ou une faille ?) ou bien à un simple affaissement des zones méridionales, plus important à l'Ouest qu'à l'Est. Cet approfondissement est limité aux abords d'un linéament majeur bien connu sous le nom de faille d'Aix-Meyreuil (ou de la Durance), dont la direction Nord 30° est celle du déplacement des unités décollées.

A l'aide de toutes ces données, un bilan des volumes de couverture déplacée sur son socle a pu être dressé grâce à la construction de coupes équilibrées sérieées parallèles à la direction de leur déplacement.

Ces coupes font apparaître, d'Est en Ouest, une évolution latérale d'un pro-chevauchement de grande amplitude (là où la couverture a une épaisseur régulière à l'Est de la Sainte-Victoire) vers des rétro-chevauchements à l'approche de la faille d'Aix (là où existe un sillon plus profond dans la région Sud). Compte-tenu de l'incertitude qui subsiste quant à

la géométrie réelle de la surface de décollement et aux modalités de son approfondissement dans cette région occidentale, deux interprétations sont possibles. Elles sont aussi bien contraintes l'une que l'autre par la géométrie et la cinématique, et elles sont également compatibles cartographiquement de coupe à coupe, quant aux déplacements. Elles peuvent se résumer ainsi : la partie épaisse méridionale de la couverture a pu être déplacée en masse par dessus la flexure, puis tardivement, affectée par un rétro-chevauchement ; ou bien il n'existe qu'un unique rétro-chevauchement (grande écaille intracutanée) d'amplitude comparable au pro-chevauchement de l'Est. Quelle que soit l'interprétation choisie, les coupes intermédiaires entre pro-chevauchement à l'Est et rétro-chevauchement à l'Ouest, indiquent une structure symétrique (analogue à un "pop-up") à déplacements pro et rétro équivalents.

Sur les coupes passant à l'Est de la Sainte-Victoire une inversion de vergence des chevauchements a aussi été décrite, mais contrairement à l'évolution latérale synchrone décrite ci-dessus, cette inversion s'est produite par un relais dans l'espace et dans le temps entre le grand pro-chevauchement de la Sainte-Victoire Est et un rétro-chevauchement situé plus au Nord (plus en avant par rapport à l'évolution de la chaîne). Ce changement de vergence a été associé au processus d'érosion et de sédimentation en respectant les bilans des transferts et la cinématique nécessaire aux dépôts (basculement des séries vers l'arrière de la chaîne).

Le problème de la détermination des facteurs qui conditionnent l'apparition de l'une ou l'autre vergence a ensuite été abordé par une approche mécanique et particulièrement en tentant d'estimer et de comparer les bilans énergétiques des pro et rétro-chevauchements. Pour chacun de ces deux cas, en utilisant les dimensions fournies par les coupes équilibrées et en prenant en compte les variations d'épaisseur des séries déplacées, dues à l'érosion et à la sédimentation, on a calculé les énergies nécessaires pour vaincre les forces de pesanteur, les frottements et réaliser les déformations constatées. En comparant les résultats du calcul avec les évolutions cinématiques décrites par les coupes équilibrées, il a alors été possible de rechercher le meilleur ajustage des valeurs des propriétés mécaniques qui devaient être associées aux changements de vergence. Ces calculs amènent aux conclusions suivantes :

- à l'Est de la Sainte-Victoire, les calculs d'énergie consommée permettent de montrer que, sur une même coupe Nord 30°, l'inversion de la vergence et le relais dans l'espace et dans le temps entre un pro-chevauchement et un rétro-chevauchement devient rentable lorsque le déplacement des unités décollées, associé à leur basculement progressif

vers l'arrière, atteint une valeur de l'ordre de plusieurs kilomètres.

Le seuil de plasticité de ces unités doit aussi être au minimum de 50 MPa, et la résistance au cisaillement sur la surface de glissement au maximum de 2,3 MPa. Ce sont des valeurs réalistes pour les formations considérées.

- à l'Ouest de la Sainte-Victoire, les mêmes calculs d'énergie ne permettent pas d'expliquer l'ensemble du mouvement en rétro-chevauchement, puisqu'avec les conditions aux limites et la géométrie des rampes choisies (pendage symétrique), les premiers kilomètres sont toujours plus rentables en pro-chevauchement. On peut envisager, comme à l'Est, un relais de pro à rétro avec la prise en compte d'un pro-chevauchement d'amplitude kilométrique replissé par le rétro (faille de Bimont). De même, un rétro-déversement après passage de la flexure par une série épaisse n'apparaît pas rentable. Mais dans cette région Ouest, il était nécessaire de prendre en compte aussi la présence de la flexure de socle parallèle au déplacement des unités décollées et son mouvement de décrochement associé.

En raison des frottements dus au décrochement, une différence entre les vitesses de déplacement du bas et du haut de l'unité décollée doit intervenir alors que ces vitesses sont homogènes à l'Est.

Cet effet doit s'ajouter aux effets dus au basculement pour favoriser soit le développement de pro-chevauchement dès les premiers kilomètres, soit le rétro-chevauchement tardif selon les hypothèses choisies pour ce secteur.

Au total, il est clair que la vergence de chevauchements peut être due à un héritage structural. L'existence d'une faille dans la couverture avant son décollement, pourvu qu'elle soit convenablement orientée (en direction et pendage) peut déterminer alors le sens du chevauchement. Mais cette hypothèse ne peut être testée dans la région étudiée en l'absence d'informations sur l'existence d'éventuelles failles profondes et sur les variations d'épaisseur du Lias et du Dogger qui pourraient en découler.

De même, lorsque deux systèmes de failles préexistent, avant décollement, le chevauchement le plus économique s'engage sur la moins pentée. Par contre lorsqu'on considère de telles failles conjuguées, créées sous sollicitation avec des pendages identiques, et de sens opposé, le calcul montre que les pro-chevauchements sont énergétiquement plus faciles, quelle que soit la géométrie de la série décollée, si le système évolue à pendage constant. Seul un basculement vers l'arrière de l'ensemble socle/couverture, qui affecte le pendage des rampes, conduit à faciliter le rétro-chevauchement dans une série décollée sur

un palier légèrement montant. Un tel basculement est classiquement observé dans les chaînes de collision résultant de l'empilement d'écaillés crustales.

Dans la région de la Sainte-Victoire, l'amortissement des chevauchements majeurs provençaux vers le Nord aboutit à la formation de chevauchements plus limités à vergence inverse. Ceux-ci paraissent favorisés essentiellement par les basculements vers l'arrière de l'ensemble socle/couverture modifiant le pendage des rampes. Ils peuvent être facilités par des gradients de vitesse de déplacement dans l'épaisseur de l'unité charriée, ce qui permet de souligner le rôle déterminant des conditions aux limites et de la cinématique des systèmes chevauchants : effet des limites latérales, du frottement à la base, des transferts de surfaces, des basculements. Il est probable que ce cas d'espèce exemplaire puisse être généralisé.

On souligne enfin que le principe de l'analyse mécanique par recherche d'un minimum de consommation d'énergie permet, à partir d'une bonne connaissance de la géométrie et de la cinématique des structures, de calculer les valeurs des paramètres mécaniques nécessaires pour expliquer les évolutions observées sur les systèmes chevauchants.

A partir de la description de chevauchements successifs ou de changements latéraux de vergence on pourrait, sur d'autres structures bien contraintes, préciser les valeurs des paramètres mécaniques, puis les utiliser pour l'interprétation des structures profondes.

## BIBLIOGRAPHIE

- AKI K. (1984).** Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. *J. Geophys. Res.*, 89, p. 5867-5872.
- ANGELIER J., AUBOUIN J. (1976).** Contribution à l'étude géologique des bandes triasiques provençales de Barjols (Var) au bas Verdon, *Bull. Bur. Rech. Géol. Min.*, Orleans, 1, 3, p. 187-217.
- BABY P. (1988).** Chevauchements dans une zone à structure complexe, la zone Nord-pyrénéenne ariégeoise. Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 189 p.
- BALLARD J.F., BRUN J.P., VAN DEN DRIESSHE J., ALLEMAND P. (1987).** Propagation des chevauchements au dessus de zones de décollement : modèles expérimentaux, *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 305, série II, p. 1249-1253.
- BATHIARD J. (1963).** Etude géologique des structures du Regagnas, de la Lare et de leurs bordures. Compagnie d'exploitation pétrolière (C.E.P.-S.A.F.R.E.P.), Permis du Regagnas, 77 p.
- BAUDRIMONT A.F. (1962).** Complément à l'étude de bois de Concors. PREPA, Secteur Provence, Permis Jouques, 11 p.
- BAUDRIMONT A.F. (1962).** Etude géologique de la structure en éventail de Sainte Victoire-Grand Sambuc entre Aix-en-Provence et Rians. Rapport de fin de campagne, PREPA, Secteur Provence, Permis Jouques, 38 p.
- BEACH A. (1980).** Numerical models of hydraulic fracturing and the interpretation of syntectonic veins, *J. Struct. Géol.*, 2, p. 425-438.
- BIENIAWSKI Z.T. (1967).** Mechanism of brittle fracture of rock, *Int. J. Rock. Mech. and Mining Sci.*, 4, p. 407-423.
- CHAPPLE W.M. (1978).** Mechanics of thin-shinned fold-and-thrust belts. *Geol. Soc. Am.*, 89, p. 1189-1198.
- CHENEVAS-PAULE F. (1987).** Contribution de l'analyse structurale à l'étude des fondations de barrages, exemples de sites calcaires dans le Sud-Est de la France. Thèse de 3e cycle. Université d'Aix-Marseille I, 141 p.
- CHOROWICZ J., RUIZ R. (1979).** Observations nouvelles sur la structure des

- "brèches" de Sainte-Victoire (Provence). C. R. Acad. Sci. Fr., 288, (D), p. 207-210.
- COBBOLD P.R. (1977).** Description and origin of banded deformation structures. II Rheologie and the growth of banded perturbations. Can. J. Earths. Sci., 14, p. 2510-2523.
- CORROY G. (1953).** Les grands travaux d'extension du Canal du Verdon. Le souterrain de la Campan, le barrage de Bimont et les ouvrages annexes. Conditions géologiques. Travaux du Laboratoire de Géologie, Faculté d'Aix-Marseille, t. IV, p. 1-29.
- CORROY G. (1957).** La montagne Sainte-Victoire. Bull. Serv. Carte géol. Fr., t. LV, n° 251.
- CORROY G., TEMPIER C., DURAND J.P. (1964).** Evolution tectonique de la montagne Sainte-Victoire en Provence. C. R. Acad. Sci. Fr., 258, (D), p. 1556-1557.
- DAHLSTROM C.D.A. (1969).** Balanced cross-section. Can. J. Earth Sci., 6, p. 743-757.
- DAHLSTROM C.D.A. (1970).** Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mounstains. Bull. Can. Pétro. Geol., 18, p. 332-406.
- DAVIS D., SUPRE J., DAHLEN F.A. (1983).** Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges. J. G. R., vol. 88, n° 82, p. 1153-1172.
- DESCLOITRES M. (1986).** Modélisation analytique des déformations au front d'un chevauchement : exemple de la fracturation d'une barre calcaire. Mémoire de D.E.A., Université de Grenoble, 63 p..
- DUFAURE P., LEGUILLETTE J., VETTER P. (1967).** Coupes de deux sondages forés dans la région de Gardanne (Bouches du Rhône), Bull. Soc. géol. de France, (7), IX, p. 547-548.
- DURAND J.P., GAVIGLIO P., GONZALES L., VETTER P. (1980).** Le gisement de Gardanne. Sixième et septième journées, 24 et 25 juillet, p. 413-419.
- DURAND J.P., TEMPIER C. (1962).** Etude tectonique de la région des brèches du massif de Sainte-Victoire dans la région du Tholonet (Bouches du Rhône), Bull. soc. géol. France, 7, IV, 1, p. 97-101.
- DUROZOY G. (1980).** Hydrogéologie du bassin de l'Arc. Supplément au numéro de juin 1980 de la revue Industrie minière, B.R.G.M., p. 69-74.
- ELLIOTT D. (1976).** The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets. Phil. Trans. R. Soc. London, A. 272, p. 289-312.
- ELLIOTT D. (1976).** The motion of thrust sheets. J. Geoph. Res., p. 949-963.
- ELLIOTT D. (1983).** The construction of balanced cross-section. J. Struct. Geol., 5, p.101.

- FABRE D., MARCAIS J. (1982).** Analyse de comportement géomécanique de quelques gypses du rif marocain. 9e réunion des sciences de la Terre, p. 236.
- GALY . (1970).** Coupe suivant le profil sismique DU1 - Document Elf-ERAP, 1 p.
- GAVIGLIO P. (1985).** La déformation cassante dans les calcaires fuvéliens du bassin de l'Arc (Provence), Comportement des terrains et exploitation minière. Thèse d'Etat, Université d'Aix-Marseille I, 219 p.
- GLINTZBOECKEL C. (1980).** Le gisement de charbon du bassin de l'Arc (Houillères de Provence), reconnaissance de l'extension du gisement. Supplément au numéro de juin 1980 de la revue Industrie minière, B.R.G.M., p. 41-53.
- GOGUEL J. (1948).** Essai d'interprétation de la prospection géophysique de la Bresse et du Bas Dauphiné. Publication du BRGG n° 6.
- GOGUEL J. (1965).** Traité de tectonique, 2e Edition. Ed. Masson et Cie, 457 p.
- GUIEU G., ROUSSET C. (1980).** La Provence. In introduction à la géologie du Sud-Est (France). Livret-guide 26ème Congr. géol. int., p. 65-79.
- GUILLEN J. (1969).** Etude géologique et géotechnique des aménagements du canal de Provence entre Rians et Saint-Maximin (Var). Thèse de 3ème cycle, Université de Grenoble, 97 p.
- HOSSACK J.R. (1979).** The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction, a review. J. géol. Soc. (London), 136, p. 705-711.
- LAMBERT C. (1962).** Structure du chaînon de Concors et ses environs. Diplôme d'Etudes Supérieures de Sciences Naturelles. Université d'Aix-Marseille, 30 p.
- MARTINEZ G. (1986).** Modélisation de la fracturation en zone d'atténuation de la déformation d'une barre calcaire. Mémoire de D.E.A., Université de Grenoble, 68 p.
- MASSE J.P., PHILIP J. (1976).** Paléogéographie et tectonique du Crétacé moyen en Provence : révision du concept d'isthme durancien. Rev. Géogr. Phys. Géol. dyn., (2), Vol. 18, 1, p. 49-66.
- MENARD G. (1980).** Profondeur du socle antétriasique dans le Sud-Est de la France. C. R. Acad. Sc. Paris., t. 290, série D, p. 299-302.
- MENARD G. (1988).** Structure et cinématique d'une chaîne de collision. Les Alpes occidentales et centrales. Thèse d'Etat, Grenoble, 268 p.
- MENARD G., MUGNIER J.L., GRATIER J.P., ENDIGNOUX L., MEILLIEZ F., TRIBOULET S., BALLARD J.F., TEMPIER C., FAURE J.L ET SEGURET M., DERAMOND ET AL. (1988).** L'équilibrage des coupes géologiques. But, méthodes et applications. Edition du C.A.E.S.S. Université Rennes I.

- MITRA G., BOYER S.E. (1986).** Energy balance and deformation mechanisms of duplex. *J. Struct. Geol.*, 8, p. 291-304.
- MOLNAR P., LYON-CAEN H. (1987).** Some simple physical aspects of the support, structure and evolution of mountain belts. *Geol. Soc. Am. Mem.*, Special Paper T 18, p. 179-207.
- MUGNIER J.L. (1984).** Déplacements et déformations dans l'avant-pays d'une chaîne de collision. Méthodes d'études et modélisation, exemple du Jura. Thèse USMG Grenoble IRIGM, 163 p.
- MULLER P., SIEMES M. (1974).** Festigkeit verformbarkeit und gefugeregehung von anhydrit, experimentelle stauchverformung unter manteldrucken bis 5 Kbar bei temperaturen bis 300 ° C. *Tectonophysics*, 23, p. 105-127.
- NADAI A.L. (1950).** Theory of flow and fracture of solids, Chapter 2, p. 43-153.
- NICOLAS A., POIRIER J.P. (1976).** Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks. Editor : John Wiley and Sons, 444 p.
- ODONNE F. (1981).** Modélisation analogique du glissement lié à un décrochement de socle. Aspects expérimentaux et naturels d'une relation socle-couverture. Thèse 3e cycle, Université de Grenoble, 146 p.
- PERRIER G. (1973).** La sismologie expérimentale (extrait du chp. 10 : la croûte terrestre). *Traité de géophysique interne*, t. 1, Rédacteurs J. Coulomb et G. Jobert, Masson éditeurs.
- PRIOU L. (1970).** Jouques 1, mesures de vitesses - Document Elf-ERAP, p. 1-3.
- REYNAUD R., BAUDRIMONT A.F. (1968).** Interprétation des études de sismique réflexion, Permis 1967, Durance 1968 - Rapport géologique sur la zone haute de Jouques - Rians et ses bordures, Document Elf-ERAP, p. 1-14, p. 1-24.
- RIEDEL W. (1929).** Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Central bl. Miner. Abt. B.*, p. 354-368.
- RUIZ R. (1978).** Etude structurale en Provence : le massif de la Sainte-Victoire. Thèse de docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, 129 p.
- SIDDANS A.W.B. (1979).** Arcuate folds and thrust patterns in the subalpin Chains of Southeast France.
- TEMPIER C. (1966).** Les faciès du Jurassique terminal en Provence. *C. R. Acad. Sc.*, t. 262, p. 958-960.
- TEMPIER C. (1968).** Nouvelles données sur le Jurassique du massif de la Sainte-Victoire et des secteurs voisins. Extrait des *Annales de la Fac. des Sc. de Marseille*, t. XL,

p. 79-103.

- TEMPIER C. (1972).** Les faciès calcaires du Jurassique Provençal. *Trav. Lab. Sci. Terre, St Jérôme, Marseille, (B)*, n° 4, 361 p.
- TEMPIER C. (1987).** Modèle nouveau de mise en place des structures provençales, *Bull. soc. géol. France*, 8, III, 3, p. 533-540.
- TEMPIER C., DURAND J.P. (1981).** Importance de l'épisode tectonique d'âge crétacé supérieur dans la structure du versant méridional de la montagne Sainte-Victoire (Provence). *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 293, p. 629-632.
- URAI J.L., SPIERS C.J., ZWART H.J. AND LISTER G.S. (1986).** Weakening of rock salt by water during long-term creep., vol. 324, n° 6097, p. 554-557.
- WILTSCHKO D., EASTMAN D. (1983).** Role of basement warps and faults in localizing thrusts fault ramp. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 158, p. 177-190.

## Listes des figures

Figure 1 : Esquisse géographique.

Figure 2 : la série stratigraphique.

fig. 2a : Eocène et Crétacé supérieur du bassin de l'Arc (DURAND et al., 1980) ;  
fig. 2b : Crétacé inférieur du bassin de Concors (LAMBERT, 1962) ; Fig. 2c : Crétacé inférieur et Jurassique de Sainte-Victoire (RUIZ, 1978) ; Fig. 2d : Trias du sondage de Jouques (Données Elf-ERAP, 1970).

Figure 3 : Controverses portant sur les datations du Crétacé inférieur dans le vallon de Bimont, à l'Ouest de la Sainte-Victoire. Deux interprétations différentes sont proposées.  
Figure 3a : Cartographie du vallon de Bimont et coupe associée d'après G. Corroy et al. (1964).

Figure 3b : Cartographie du vallon de Bimont et coupe associée d'après R. Ruiz (1978 ; J. CHOROWICZ et R. RUIZ, 1979).

Figure 4 : Cartographie des formations bréchiques au pied du massif de la Sainte-Victoire.

Figure 5 : Répartition des faciès du Jurassique supérieur dans le massif de la Sainte-Victoire, d'après C. Tempier (1972).

Figure 6 : Carte de situation des forages dans la région étudiée.

Figure 7 : Carte des variations d'épaisseur de l'Eocène et du Crétacé.

Figure 8 : Esquisse structurale - Isobathes du niveau "Grande Mine" qui se situe vers la base du Fuvélien, d'après Ch. GLINTZBOECKEL, 1980).

Figure 9 : Le biseau d'érosion du Crétacé inférieur dans le synclinal de l'Arc.  
figure 9a : Affleurements de Crétacé inférieur et limite supposée du biseau d'érosion dans le synclinal de l'Arc.

figure 9b : Coupe dans le synclinal de l'Arc, d'après J.P. Durand (1980). On notera la disparition vers le NE du Crétacé inférieur.

figure 10 : Carte des variations d'épaisseur du Jurassique supérieur.

Figure 11 : Carte des variations d'épaisseur du Jurassique moyen et inférieur.

Figure 12 : Schéma structural simplifié

Dénomination des structures :

D.R. = dôme du Regagnas, B.A. = bassin de l'Arc, S.V.E. = structure Sainte-Victoire Est, C.C. = Costes Chaudes, U.R. = unité des Reynauds, S.U. = structure des Ubacs, B.R. = bassin de Rians, S.C. = structure du bois de Concors.

Dénomination des chevauchements et des failles :

$\phi$ SV = chevauchement Sainte-Victoire,  $\phi$ B = chevauchement Bimont,  $\phi$ Va = chevauchement Vauvenargues,  $\phi$ G = chevauchement Gardiole,  $\phi$ U = chevauchement Ubacs,  $\phi$ Vt = chevauchement Vautubière,  $\phi$ C = chevauchement de Concors, FM = faille de Meyreuil.

Figure 13 : Coupes sériées.

La terminologie des structures et des chevauchements est donnée sur la figure 12.

Figure 14 : Cartographie des formations bréchiques au pied du massif de la Sainte-Victoire et coupes correspondantes. Coupe 1, d'après C. Tempier et J.P. Durand (1981) ; coupes 3 et 4, d'après J. Chorowick et R. Ruiz (1979).

Figure 15 : Interprétation de la faille du vallon de Bimont : la faille est moins pentée que la stratification.

Figure 16 : Interprétation de la faille du vallon de Bimont : la faille est plus pentée que la stratification. L'état initial est peu probable.

Figure 17 : Stéréogrammes.

figure 17a : Stéréogramme des stries mesurées au front de la Sainte-Victoire sur des plans de cisaillements subhorizontaux.

figure 17b : Stéréogramme des axes des plis d'entraînement mesurés dans le flanc inverse et la terminaison périclinale du pli de la Sainte-Victoire.

figure 18 : Le passage, selon une direction Nord-Sud, d'une série mince sur la flexure de la Durance devrait logiquement créer un bassin (non observé) parallèle à cette flexure.

Figure 19 : Pointés et corrélations des différentes arrivées d'énergie sur les 3 composantes filtrées du mouvement. La même phase apparaît plus ou moins nettement sur chaque composante.

Figure 20 : Pointés et corrélations de différentes arrivées d'énergie sur la même composante du mouvement en utilisant la trace brute et les traces filtrées.

Figure 21 : modèle à une couche

Figure 22 : Courbe temps de propagation en fonction de la distance (hodochrone) du modèle précédent (figure 21).

Figure 23 : Cas d'une couche pentée, d'après Perrier (1973)

Figure 24 : La méthode des  $T^2, \Delta^2$   
Report des données dans les axes ( $T^2, \Delta^2$ ).

Figure 25 : Variation de h en fonction de  $\Delta$

Figure 26 : Carte d'isochrones - Enveloppe de l'horizon socle, d'après un document Elf-ERAP (R. REYNAUD, 1967, 1968).

Figure 27 : Sismosondage de Jouques

Figure 28 : Coupe suivant le profil sismique DU I (situé sur la figure 26), d'après GALY (document Elf-ERAP, 1970).

Figure 29 : Carte de situation des profils sismiques dans la région bassin de l'Arc - montagne Vautubière.

Figure 30 : Profil longitudinal L2.

fig. 30a : localisation des stations ; Fig. 30b : Coupe géologique le long du profil ; fig. 30c : Assemblage des traces ; Fig. 30d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

Figure 32 : Profil longitudinal L1.

fig. 32a : localisation des stations ; Fig. 32b : Coupe géologique le long du profil ; fig. 32c : Assemblage des traces ; Fig. 32d : Méthodes des ellipses, réflecteur R1.

Figure 33 : Assemblage des traces, composante T.

Figure 34 : Profil longitudinal L3.

fig. 34a : localisation des stations ; Fig. 34b : Coupe géologique le long du profil ; fig. 34c : Assemblage des traces ; Fig. 34d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

Figure 35 : Profil longitudinal L4.

fig. 35a : localisation des stations ; Fig. 35b : Coupe géologique le long du profil ; fig. 35c : Assemblage des traces ; Fig. 35d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

Figure 36 : Détail de l'assemblage des traces.

Figure 37 : Pointés des réfléchiés pour les profils L1 à L4.

Figure 38 : Méthode des ellipses appliquée au réflecteur R2.

Figure 39 : Profil longitudinal L5.

fig. 39a : Localisations des stations ; Fig. 39b : Coupe géologique le long du profil.  
fig. 39c : Assemblage des traces ; Fig. 39d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

Figure 40 : Détail de l'assemblage des traces.

Figure 41 : Profil longitudinal L6.

fig. 41a : Localisation des stations ; Fig. 41b : Coupe géologique le long du profil.  
fig. 41c : Assemblage des traces ; Fig. 41d : Méthode des ellipses, réflecteur R1.

Figure 42 : Détail de l'assemblage des traces.

Figure 43 : Profil longitudinal L7.

fig. 43a : localisation des stations ; Figure 43b : Coupe géologique le long du profil ;  
fig. 43c : Assemblage des traces ; Fig. 43d : Méthodes des ellipses, réflecteur R1.

Figure 44 : Détail de l'assemblage des traces.

Figure 45a : Carte de localisation des stations des profils L8 et L9.

Figure 45b : Profil longitudinal L8.

Figure 45c : Profil longitudinal L9.

Figure 46 : Pointé des réfléchies pour les profils L5 à L9.

Figure 47 : Méthode des ellipses

Figure 48 : Situation des données brutes concernant le réflecteur R1, voisin de la base du toit du socle.

Figure 49 : Situation des données brutes concernant le réflecteur R2, limite du permien ?

Figure 50 : Schéma structural simplifié.

Figure 51 : Coupes sériées qui synthétisent les données géologiques et sismiques.

Figure 52 : Evolution latérale de l'altitude de l'Argovien sur une coupe.

Figure 53 : Interprétation des coupes centrales et orientales

Figure 54 : La rampe des coupes IV et V correspond en surface à la flexure entre le Jurassique des Plateaux de Pourrières et le Crétacé du bassin de l'Arc.

Figure 55 : Coupes équilibrées III, IV et V, un pli coffré et un simple passage sur une rampe, voir compléments de légende fig. 58.

Figure 56 : Le déplacement d'une série très épaisse sur une faille normale de socle.  
d = déplacement

Figure 57 : Modèle analogique d'après J.F. Ballard (1987). Des failles accomodent le passage sur la rampe.

Figure 58 : Coupe équilibrée II, le déplacement d'une série très épaisse sur une flexure de socle.

Figure 59 : Schéma du dispositif avec une flexure de socle de direction Est - Ouest. La série épaisse initialement au Sud de la flexure a été transportée. Il faut envisager une rotation horaire importante.

Figure 60 : Interprétation des coupes.

Les chevauchements à vergence inverse ont fonctionné de façon synchrone.

Figure 61 : Coupes équilibrées I et II, une écaille intracutanée. CI = Crétacé inférieur, JS = Jurassique supérieur, D = Dogger, L = Lias, TR = Trias ; = profondeur du socle, données pétrolières, = profondeur du socle, données de sismologie expérimentale (réflexion).

Figure 62 : Schéma des relations entre chevauchement à vergence Nord et chevauchement à vergence Sud.

Figure 63 : Coupe IV - un simple passage sur une rampe au Sud (structure des Ubacs, Sainte-Victoire Est) une écaille intracutanée au Nord (structure de la Vautubière).

Figure 64 : Structures en pro-chevauchement et en rétro-chevauchement pour un déplacement identique du même compartiment mobile.

Figure 65a : Comparaison de l'évolution, avec la profondeur, du seuil de plasticité de deux.

Figure 65b : Il existe une profondeur minimale pour qu'un décollement s'engage sur le niveau plastique de base.

Figure 66 : Fractures en branches sur une faille principale, exemples naturels d'après Beach (1980).

Figure 67 : Selon la valeur de l'énergie disponible pour la propagation d'une fracture à travers une barrière, trois cas peuvent se produire.

Figure 68 : Sous l'effet d'une poussée arrière et selon les conditions de déformation, trois cas peuvent se produire.

Figure 69 : Calcul de la répartition des contraintes principales dans une série décollée, près d'une flexure de socle rigide (fig. 69a), traces de failles potentielles déduites des contraintes (fig. 69b), d'après Wiltschto et Eastman (1983).

Figure 70 : Exemple de chevauchements dans les montagnes Rocheuses qui montre le développement fréquent des pro-chevauchements et la situation près de l'avant-pays des rétro-chevauchements.

Figure 71 : Exemple d'association de chevauchements qui peuvent apparaître, avec le même déplacement d'un compartiment droit mobile, selon les conditions de déformation.

Figure 72 : Exemple de chevauchement d'une série décollée sur un socle rigide, donnant les définitions des termes utilisés dans le texte pour le calcul de l'énergie consommée par ce chevauchement.

Figure 73 : Série sédimentaire en biseau avec un palier de décollement faiblement incliné ( $1,5^\circ$ ), sans changement de pente en cours d'évolution. Les rampes ont un pendage identique ( $27,5^\circ$ ).

fig. 73a : Evolution en pro-chevauchement

fig. 73b : Evolution en rétro-chevauchement

Figure 74 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement et un rétro-chevauchement dans le cas de la figure 73

fig. 74a : Evolution en pro-chevauchement

fig. 74b : Evolution en rétro-chevauchement

Figure 75 : Modèle établi à partir des coupes à l'Est de la Sainte-Victoire (fig. 14), avec flexion et érosion.

Figure 76 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement (Sainte-Victoire Est, Vautubière) et un rétro-chevauchement (Sainte-Victoire Est, Vautubière) dans le cas de la figure 75

Figure 77 : Domaines des valeurs de  $\tau_b$  (grisé) pour qu'un rétro-chevauchement devienne plus économique (en énergie consommée) qu'un pro-chevauchement. La comparaison est faite avec des rampes de pendage initial identique (mais opposé) avec le même point d'initiation rampe/palier.

Figure 78 : Domaines des valeurs de  $\tau_y$  (grisé) pour qu'un rétro-chevauchement devienne plus économique (en énergie consommée) qu'un pro-chevauchement. La comparaison est faite avec des rampes de pendage initial identique (mais opposé), avec le même point d'initiation rampe/palier

Figure 79 : Modèle avec flexion et érosion établi à partir des coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire (fig. 61), interprétées avec une écaïlle intracutanée.

Figure 80 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement et un rétro-chevauchement dans le cas de la figure 79.

Figure 81 : Evolution comparative des énergies consommées pour un pro-chevauchement et un rétro-chevauchement dans le cas de la figure 32

Figure 82 : Modèle en flexion avec érosion établi à partir des coupes à l'Ouest de la Sainte-Victoire (fig. 58), interprétées avec un passage sur une flexure de socle.

Figure 83 : Résultats obtenus par F. Odonne (1981).

fig. 83a : Dispositif expérimental, schéma montrant le glissement couche sur couche au sein de la couverture.

fig. 83b : Coupe du modèle sensiblement perpendiculaire aux axes de plis.

Figure 84 : Expérimentation analogique de J.F. Ballard et al. (1987) qui permet d'étudier la vergence des chevauchements en fonction des conditions aux limites latérales.

fig. 84a : Dispositif expérimental

fig. 84b : Plaque et piston arrière mobiles, murs latéraux fixes sur tout la longueur de la boîte.

fig. 84c : Plaque, piston arrière et murs latéraux mobiles sur tout la longueur de la plaque mobile.

Tableau I : Données concernant le point de tir et les stations des profils sismiques. La localisation des stations est indiquée sur la figure 11. Les stations sont numérotées de 1 à n par point de tir, la lettre fait référence au point de tir.

THESE PRESENTEE A L'UNIVERSITE  
JOSEPH FOURIER DE GRENOBLE I

Titre de l'ouvrage :

**MECANISMES ET EVOLUTION  
DE CHEVAUchemENTS  
A VERGENCES OPPOSEES**

Exemple des structures de la Sainte-Victoire (Provence)

Nom de l'auteur : Brigitte BIBERON

Etablissement : Observatoire de Grenoble et Institut de  
Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique.

**RESUME**

L'analyse des chevauchements à vergence opposée du secteur de la Sainte-Victoire (Provence) a permis de définir les modalités d'amortissement de systèmes chevauchants, principalement dans l'avant pays des chaînes de collision.

Cette analyse s'est appuyée sur un grand nombre de données géologiques et géophysiques, et en particulier sur des données issues de profils sismiques réalisés pour cette étude. La construction de coupes géologiques équilibrées a permis d'intégrer au mieux l'ensemble des données de surface et de profondeur et de proposer un modèle géométrique et une cinématique cohérente.

Le problème de la détermination des facteurs qui conditionnent l'apparition de l'une ou l'autre des vergences a ensuite été abordé par une approche mécanique (calcul de l'énergie minimale dissipée dans la déformation) et cinématique (comparaison avec des modèles analogiques). Les valeurs des paramètres mécaniques ont pu être calculées sur l'exemple d'inversion de vergence observée sur les coupes équilibrées. Il a été montré que dans le cas d'une série décollée sur un palier légèrement montant, un pro-chevauchement est plus économique, en terme d'énergie dépensée, qu'un rétro-chevauchement. Mais un basculement progressif vers l'arrière de l'ensemble socle/couverture qui affecte le pendage des rampes, conduit à faciliter le développement de rétro-chevauchement ; ce type de flexion progressive de l'avant-pays est classiquement observé dans les chaînes de collision. Ces rétro-chevauchements peuvent être aussi facilités par des gradients de vitesse de déplacement entre le bas et le haut de la série (rôle déterminant des conditions aux limites et de la cinématique des systèmes chevauchants).

**MOTS-CLES**

Coupe équilibrée ; Déformation ; Déplacements ; Profils sismiques ; Provence ; Energie de déformation ; Chevauchements ; Tectonique.

9 MAI 1989

UNIVERSITE DE GRENOBLE  
INSTITUT DE GEOLOGIE  
DOCUMENTATION  
RUE MAURICE-GIGNOUX  
B 28031 GRENOBLE CEDEX  
TEL: (76) 87.48.48