

Coupes équilibrées crustales : méthodologie et application aux Alpes occidentales

Balanced cross-sections at crustal scale : methods and application to the western Alps

par Gilles MENARD et François THOUVENOT *

RÉSUMÉ. — La construction de coupes équilibrées à l'échelle de la croûte ainsi que leur remise à l'état avant déformation suivent les règles générales de construction des coupes équilibrées (conservation des longueurs et des surfaces entre l'état avant déformation et l'état actuel), mais présentent des caractères qui leur sont propres (nécessité de connaître les mouvements verticaux importants qui accompagnent les déformations à cette échelle ainsi que le mode de déformation de la croûte).

Un exemple de construction de telles coupes est proposé pour les Alpes occidentales. Ces coupes, équilibrées pour le chevauchement crustal des massifs cristallins externes (Burdigalien-Actuel), traduisent un raccourcissement crustal variant de 10 km environ au niveau du Vercors à 55 km environ au niveau des Préalpes. Elles permettent d'intégrer dans un modèle unique un certain nombre de phénomènes comme le raccourcissement crustal, le raccourcissement dans la couverture, la subsidence du bassin molassique, la surrection des massifs cristallins externes, le rétrodéversement des structures en arrière de ces massifs.

Mots-clés : Coupes équilibrées, Croûte, Alpes occidentales.

ABSTRACT. — Constructing balanced cross-sections at a crustal scale as well as restoring them can be achieved following the general rules of balanced cross-sections, i.e. lengths and surfaces remain constant throughout the deformation. However, these balanced crustal sections have peculiarities: for instance it is necessary to evaluate the extent of vertical movements which are likely to occur during the deformation.

Tentative balanced cross-sections of the western Alps are built. With the balance being done for the crustal overthrust of the « massifs cristallins externes » (Burdigalian to present), they yield a crustal shortening ranging from about 10 km for a section crossing Vercors, up to about 55 km when crossing the Prealps. Their advantage is to integrate in a single model several phenomena such as: the crustal shortening, the cover shortening, the subsidence of the molasse basin, the uplift of the « massifs cristallins externes », as well as the backthrusting observed at the back of these massifs.

Key-words : Balanced cross-sections, Crust, western Alps.

La construction de coupes équilibrées à l'échelle de la croûte obéit aux mêmes principes que la construction de coupes équilibrées à l'échelle des séries sédimentaires (Dahlstrom, 1969; Elliott, 1983; Mugnier *et al.*, 1986). Toutefois la nature des données utilisées pour contraindre géométriquement les coupes crustales ainsi que le changement d'échelle des phénomènes pris en compte confèrent une spécificité à la construction de telles coupes. C'est pourquoi il nous est apparu utile de préciser en quoi la construction de coupes équilibrées crustales obéissait aux règles générales de construction des coupes équilibrées et en quoi elle s'en distinguait.

I. PRINCIPE DES COUPES ÉQUILIBRÉES.

Une coupe équilibrée crustale se définit comme une coupe d'une structure crustale actuelle construite de telle manière qu'il existe une compatibilité entre l'état déformé actuel et l'état initial présumé. Cette compatibilité se contrôle grâce à un bilan géométrique (longueurs et/ou surfaces conservées d'un état à l'autre) et au choix d'un chemin cinématique possible de la déformation globale à l'échelle de la coupe, entre les deux états (Hossack, 1979). Cette condition implique que la coupe soit construite parallèlement à la direction de raccourcissement (Goguel, 1952) (état de déformation plane).

Il faut garder à l'esprit qu'une coupe équilibrée ne représente qu'une solution possible parmi plusieurs envisageables. Si elle est géométriquement rigoureuse, elle n'est cependant pas nécessairement juste car différentes

*UA 733 CNRS-IRIGM — BP 68 38402 St-Martin d'Hères Cedex.

géométries et donc différents mécanismes de déformation peuvent exister. Cette méthode permet en revanche d'éliminer certaines solutions car si une coupe n'est pas équilibrée, elle a toutes les chances d'être fautive.

La construction d'une coupe équilibrée s'appuie sur le fait qu'il existe une relation entre la géométrie actuelle et la géométrie avant déformation, relation contrôlée d'une part par la valeur du raccourcissement (en structure compressive), d'autre part par la géométrie du ou des chevauchements.

Dans le cas des coupes équilibrées construites pour des séries sédimentaires déformées, il est souvent possible de définir la profondeur d'un possible plan de décollement au-dessus duquel se déforme la série. Celui-ci se déduit de la connaissance de la géométrie actuelle (éventuellement en s'aidant de forages ou autres données de subsurface), de la géométrie avant déformation (hypothèse possible sur la position de niveaux stratigraphiques avant déformation en se référant à des zones voisines non déformées) et de la valeur du raccourcissement. Par contre à l'échelle de la croûte, ces trois paramètres (géométrie actuelle, géométrie initiale et valeur du raccourcissement) n'étant pas beaucoup mieux contraints que la géométrie de la surface de chevauchement, il est préférable de chercher le meilleur ajustement global possible des quatre paramètres (géométrie actuelle, géométrie initiale, valeur du raccourcissement et géométrie de la surface de chevauchement).

II. CONTRAINTES SUR LES PARAMÈTRES UTILISÉS.

1. La géométrie crustale actuelle.

La croûte est limitée vers le haut par le toit du socle et vers le bas par la discontinuité de Mohorovicic (ou moho). La géométrie du toit du socle, lorsque celui-ci est proche de la surface, est déduite de la géologie de surface. La définition des grandes unités de socle et de leurs relations doit être établie à une échelle qui permet de lisser les déformations de faible longueur d'onde. La géométrie du toit du socle, lorsque celui-ci est en profondeur peut être connue par la sismologie et les sondages. La prise en compte des ensembles sédimentaires ne se justifie que dans le cas où leur déformation peut être reliée à celle d'ensembles de socle clairement définis.

La géométrie de la base de la croûte (moho) peut être connue grâce à l'utilisation conjointe de la sismologie et de la gravimétrie, cette dernière permettant d'interpoler les renseignements plus précis mais discontinus fournis par la sismologie.

Dans certains cas favorables on peut utiliser également comme marqueur supplémentaire la limite croûte supé-

rieure-croûte inférieure obtenue à partir des données sismologiques.

Il est difficilement envisageable d'obtenir des renseignements plus précis sur la structure de la croûte par les méthodes géophysiques classiques : toutefois les profils de type « ECORS » permettront peut-être de trouver des marqueurs supplémentaires au sein de la croûte (supérieure en particulier).

2 La valeur du raccourcissement crustal.

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

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

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

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

3. La géométrie des chevauchements.

Aucune méthode ne permet actuellement d'obtenir des données sur la géométrie des surfaces de chevauchement crustaux, sauf peut-être la sismique-réflexion de type ECORS. Ces surfaces doivent donc être construites par hypothèse à partir principalement de l'idée que l'on se fait de la géométrie avant déformation : en effet des discontinuités acquises lors de l'histoire antérieure de la croûte peuvent être réutilisées lors des chevauchements. C'est principalement le degré de complexité de ce prédécoupage qui est responsable de la complexité de l'état après chevauchement. Ainsi pour des chaînes de montagnes où le même mécanisme d'écaillage crustal a opéré, la structure finale peut être dans l'une assez simple si la croûte cratonique n'était pas antérieurement prédécoupée (par un

rifting préalable par exemple) et dans l'autre beaucoup plus complexe si la croûte était au contraire prédécoupée par des fractures antérieures.

Si les plans de failles sont à pendages variables (succession de plats et de rampes), il est parfois possible de situer ces variations grâce à la détermination des zones de surrection actuelle ou passée qui présenteront un maximum lors du passage à l'aplomb des rampes (la pente de la surface de chevauchement augmentant, la composante verticale du mouvement sera plus grande).

4. La géométrie avant déformation.

Si dans le cas des coupes équilibrées en séries sédimentaires on peut souvent faire des hypothèses raisonnables sur la géométrie des séries lors de la sédimentation en reconstituant le bassin initial ou en se référant à des domaines non déformés en avant de la chaîne, à l'échelle de la croûte cette démarche n'est plus possible. Dans bien des cas il y a des variations de l'épaisseur de la croûte dues à des phénomènes de rifting intracontinental ou de formation de marges passives. La référence des régions stables voisines pour estimer l'épaisseur de la croûte avant chevauchement n'est plus alors d'aucune utilité. On peut au mieux fixer ainsi une valeur maximale de l'épaisseur crustale avant déformation.

5. La cohérence régionale.

Une contrainte supplémentaire peut être introduite sur les coupes équilibrées crustales en construisant plusieurs coupes parallèles. On imposera alors une variation continue de tous les paramètres précédemment cités d'une coupe à l'autre. Cette démarche permet d'utiliser les différentes données, souvent dispersées et pas forcément concentrées sur une coupe unique. Elle oblige en outre à discerner ce qui dans le modèle reste constant d'une coupe à l'autre, ce qui varie de manière continue et ce qui peut être une particularité locale.

III. REMISE A L'ÉTAT AVANT DÉFORMATION.

A l'échelle de la croûte, il est nécessaire pour reconstituer l'état avant déformation de prendre en compte les mouvements verticaux qui traduisent le maintien en équilibre isostratique de la croûte (en toute rigueur de la lithosphère) au cours du chevauchement. Ces mouvements correspondent d'une part à un enfoncement par flexion du compartiment chevauché, d'autre part à une surrection du compartiment chevauchant. Dans l'avant-pays chevauché,

l'enfoncement de la croûte peut être suivi grâce à l'histoire de la subsidence du bassin sédimentaire. Dans le compartiment chevauchant, la surrection peut être suivie d'une part grâce à des données radiochronologiques qui datent le franchissement de certaines isothermes, d'autre part grâce à des données paléomagnétiques qui permettent de chiffrer un basculement (surrection différentielle) postérieur à la formation de certains minéraux.

Notons que toutes ces données, outre les contraintes géométriques qu'elles fournissent (contraintes sur les mouvements verticaux) fournissent également des contraintes chronologiques permettant de prendre en compte également le paramètre vitesse de déformation.

IV. APPLICATION AUX ALPES OCCIDENTALES.

Nous présentons une application de cette méthode aux Alpes occidentales avec cinq coupes (figs. 1, 4, 5, 6) équilibrées pour le chevauchement crustal des massifs cristallins externes, chevauchement le plus externe et le plus récent (Miocène-Actuel) de l'histoire tectonique alpine. Dans la remise à l'état avant déformation, seul ce chevauchement est pris en considération. Les chevauchements plus internes (et plus anciens) jouent dans ces coupes le rôle de marqueurs passifs transportés avec le compartiment chevauchant. Les parties des coupes présentées correspondant à ces chevauchements n'ont pas été équilibrées car la direction de raccourcissement n'y est plus parallèle à celle de la coupe, une composante de coulissage s'ajoutant au chevauchement. Cela est tout particulièrement vrai pour le chevauchement pennique frontal. Notons que c'est le postulat inverse qui a été pris dans les coupes équilibrées déjà publiées sur les Alpes occidentales (Beach, 1981; Butler, 1986).

A. Données utilisées.

1. Structure crustale (figure 2).

En ce qui concerne la structure de la croûte, on connaît relativement bien le moho dans les zones externes par la sismologie (Perrier, 1973; Michel, 1978; Thouvenot et Perrier, 1980) où ce moho s'enfonce vers le SE de 29 km jusque vers 35-40 km à l'aplomb des massifs cristallins externes, ce qui est en accord avec les données gravimétriques. Par contre, plus vers l'intérieur de la chaîne alors que la sismologie confirme l'enfoncement de ce moho jusque vers 45-50 km, la remontée de l'anomalie gravi-

métrique impose d'envisager la présence de corps lourds plus superficiels que ce moho. Ces corps lourds sont interprétés comme des écailles de manteau supérieur et/ou de croûte inférieure appartenant à un compartiment chevauchant de lithosphère (Ménard et Thouvenot, 1984). Les données dont nous disposons fournissent des contraintes pour les coupes I et IV.

La croûte inférieure, bien reconnue dans la zone externe n'a pas été mise en évidence de manière certaine sous les Alpes proprement dites, (Ménard, 1979; Thouvenot, 1981).

L'existence d'une zone à moindre vitesse sous les Aiguilles-Rouges a été mise en évidence par Thouvenot (1981). Toutefois l'absence d'information sur sa géométrie rend son interprétation difficile (zone de cisaillement ductile? enveloppe de blocs de socle repris en chevauchements?).

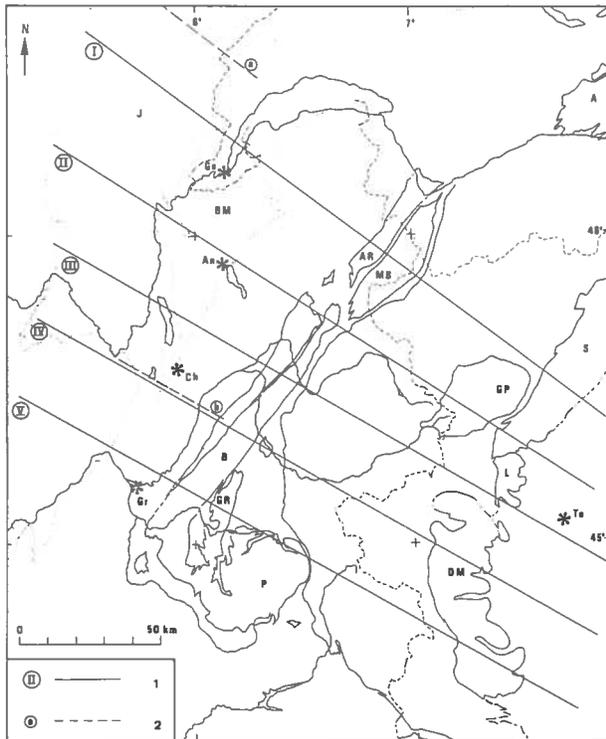


FIG. 1. — Situation des coupes

- 1) Coupes équilibrées à l'échelle de la croûte (cf. figures 4, 5 et 6).
- 2) Coupes équilibrées à l'échelle de la couverture sédimentaire (cf. figures 3a et 3b).

FIG. 1. — Position of cross-sections

- 1) Balanced cross-sections at a crustal scale (see fig. 4, 5 and 6).
- 2) Balanced cross-sections at the scale of the sedimentary cover (see fig. 3a and 3b).

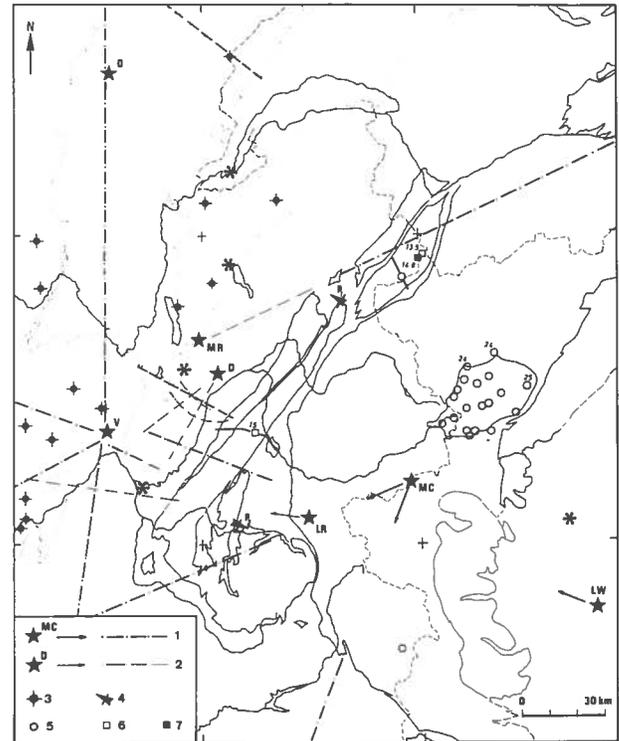


FIG. 2. — Données utilisées

- 1) Profils sismiques (données sur le moho).
- 2) Profils sismiques (données sur le remplissage sédimentaire).
- 3) Sondages ayant atteint le socle.
- 4) Données paléomagnétiques.
- 5) Ages radiométriques sur apatites par trace de fissions datant le franchissement de l'isotherme 100°C.
- 6) Ages radiométriques sur muscovites (K/Ar) datant le franchissement de l'isotherme 350°C.
- 7) Ages radiométriques sur muscovites (Rb/Sr) datant le franchissement de l'isotherme 500°C.

FIG. 2. — Data used in this study

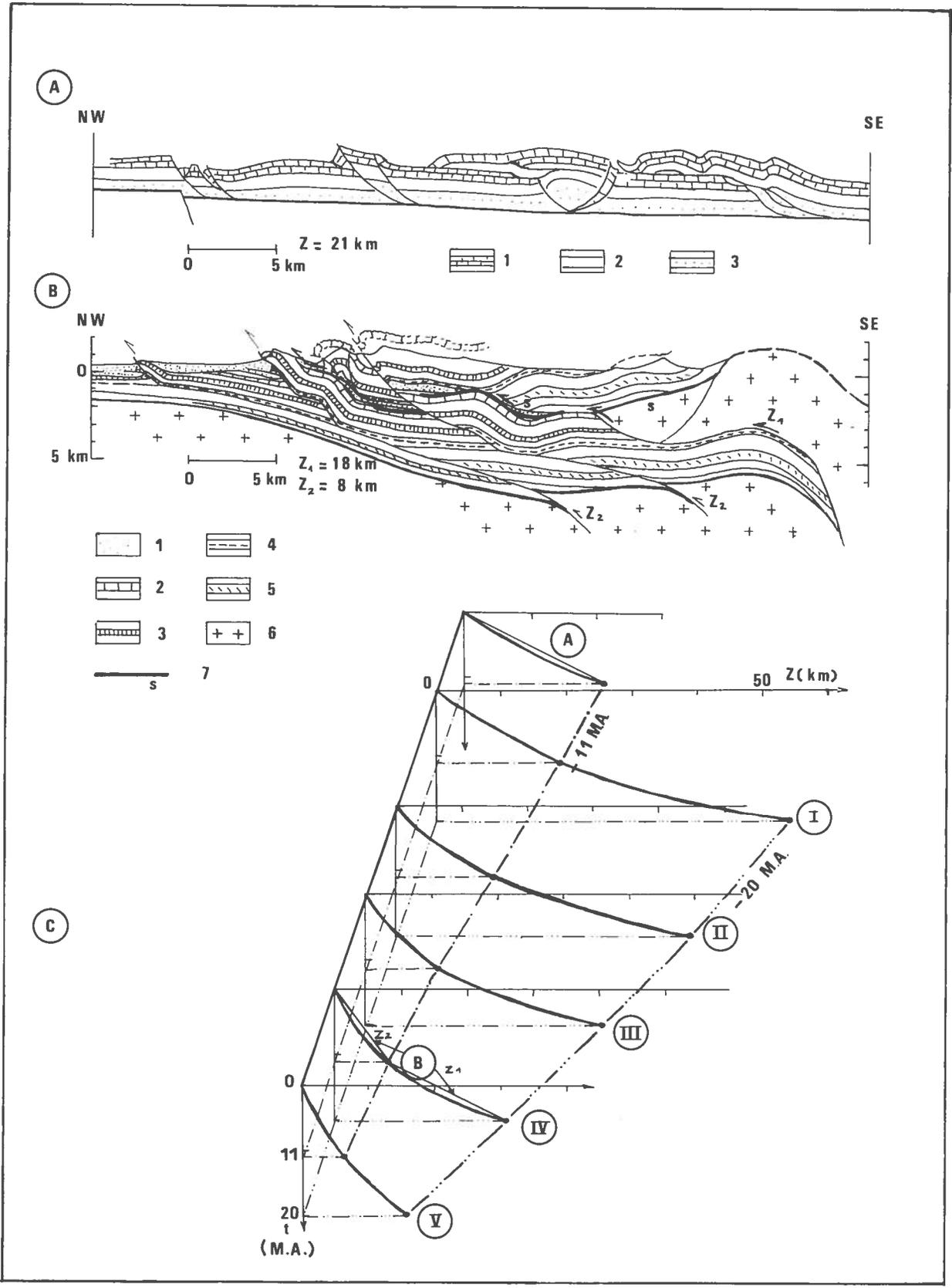
- 1) Seismic profiles (Moho mapping).
- 2) Seismic profiles (sedimentary cover).
- 3) Deep boreholes reaching the basement.
- 4) Palaeomagnetic data.
- 5) Apatites fission track ages stating when isotherm 100°C was crossed.
- 6) Radiometric datations on muscovites using K/Ar method, stating when isotherm 350°C was crossed.
- 7) Radiometric datations on muscovites using Rb/Sr method, stating when isotherm 500°C was crossed.

FIG. 3. — Contraintes sur le raccourcissement

- A) Coupe du Jura (d'après Mugnier et Vialon, 1986) : 1) Bathonien à Portlandien; 2) Carixien à Bajocien; 3) Muschelkalk à Sinémurien.
- B) Coupe du nord de la Chartreuse : 1) Molasse; 2) Urgonien; 3) Tithonique; 4) Terres Noires; 5) Dogger schisteux; 6) Socle; 7) Réflecteur sismique.
- C) Raccourcissement en fonction du temps pour chacune des coupes crustales.

FIG. 3. — Constraints on the shortening

- A) Jura cross-section (after Mugnier & Vialon, 1986); 1) Bathonian to Portlandian; 2) Carixian to Bajocian; 3) Muschelkalk to Sinemurian;
- B) Northern Chartreuse cross-section; 1) Molasse; 2) Urgonian; 3) Tithonian; 4) Black shale; 5) Shaly Dogger; 6) Basement; 7) Seismic reflector.



Le toit du socle est connu avec une précision suffisante à l'ouest des chaînes subalpines grâce à des forages pétroliers. Sous les chaînes subalpines, si son enfoncement est quasi certain, sa profondeur et sa géométrie sont mal connues.

2. Valeur du raccourcissement (figure 3).

En ce qui concerne l'estimation du raccourcissement, la confrontation au niveau de la coupe IV de la gravimétrie (Ménard et Thouvenot, 1984) (fixant le front ouest de l'écaïlle de manteau chevauchant à quelques kilomètres près) et de la sismique (donnant l'extension minimale du moho autochtone vers l'est) (Thouvenot *et al.*, 1985) fournit une valeur minimale du raccourcissement crustal de 25 km environ.

Les autres contraintes que nous nous sommes imposées sont les valeurs du raccourcissement induit dans la couverture estimées à partir de deux coupes elles-mêmes équilibrées situées dans la couverture de l'avant-pays (figure 3a et b).

La première, située dans le Jura interne (Mugnier et Vialon, 1986), fournit une valeur de raccourcissement de 21 km acquis durant la période -11 M.A./actuel : l'âge de -11 M.A., attribué de manière assez imprécise au début de la formation du Jura, correspond à l'interruption du dépôt de la molasse d'eau douce supérieure du bassin molassique suisse.

La deuxième, située au nord de la Chartreuse, s'appuie sur l'existence d'un réflecteur mis en évidence par sismique (Thouvenot *et al.*, en préparation) à faible profondeur (2-3 km) interprété comme un niveau d'Urgonien appartenant à une série chevauchée. Les contraintes de la géologie de surface (Gidon, 1964) et celle de la sismique nous conduisent à interpréter la structure de la Chartreuse comme la superposition d'un premier chevauchement (Z_1 ; -20/-11 M.A.) de grande ampleur (au moins 15 km dans l'hypothèse où le front de l'unité chevauchante correspond à l'anticlinal médian, et probablement près de 18 km si on prolonge l'Urgonien chevauché jusque sous le bord interne du Grésivaudan) repris par plusieurs chevauchements et plis plus tardifs (Z_2 ; -11 M.A./actuel). Le raccourcissement (environ 8 km) associé à ces dernières déformations est à mettre en parallèle au point de vue chronologique avec le raccourcissement de 21 km de la coupe précédemment citée. Ces deux ensembles de déformations sont l'expression du même chevauchement crustal profond ($Z = Z_1 + Z_2 = 26$ km; -20 M.A./actuel). Ce schéma rejoint dans ses grandes lignes l'hypothèse proposée par Doudoux *et al.* (1982) pour les chaînes subalpines situées plus au nord. Ces trois valeurs de raccourcissement ont servi de base à la construction de la figure 3c qui fournit les valeurs de raccourcissement au

niveau des 5 coupes crustales pour les deux intervalles de temps -20/-11 M.A. et -11 M.A./actuel. Ces trois valeurs ont été complétées par les hypothèses suivantes :

- le premier chevauchement (-20/-11 M.A.) se prolonge vers le Sud par le chevauchement du Moucherotte : une coupe au Sud du Moucherotte fournit des valeurs de raccourcissement de 3 et 5 km respectivement pour les deux intervalles de temps précédemment cités.
- vers le Nord nous avons estimé la flèche de ce premier chevauchement (-20/-11 M.A.) à 25-30 km au niveau des Bauges au vu des résultats sismiques ALP 75 (Thouvenot et Perrier, 1980) dans lesquels les premières arrivées entre 5 et 40 km avec une vitesse apparente de 5,3-5,4 km/s sont réinterprétées comme réfractées sur un horizon rapide à faible profondeur considéré comme un autochtone relatif par rapport aux Bauges entièrement charriées.

3. Hypothèses sur la géométrie des chevauchements et la géométrie initiale.

La principale hypothèse que nous faisons dans ce domaine est l'existence de blocs de socle basculés dans les 5-10 km supérieurs de la croûte, blocs hérités du rifting intracontinental du Lias. Les failles normales limitant ces blocs ont ensuite été réutilisées en failles inverses lors des chevauchements ultérieurs. Cette hypothèse se justifie d'une part par l'existence démontrée de tels blocs (Barfély *et al.*, 1979; Lemoine *et al.*, 1981) que sont les massifs cristallins externes (rameau interne de Belledonne, Grandes Rousses, Pelvoux), d'autre part par la nécessité de faire chevaucher plusieurs de ces blocs (structure en duplex (Dahlstrom, 1970)) en profondeur pour expliquer le rétrodéversement des structures en arrière des massifs cristallins externes (Mt Blanc-Belledonne). La profondeur de la base des blocs basculés est supposée comprise entre 5 et 10 km par analogie avec les marges passives non déformées.

En ce qui concerne l'épaisseur avant déformation de la croûte, nous avons fait l'hypothèse qu'elle se situait entre 20 et 25 km. Si cet ordre de grandeur nous paraît raisonnable, rien toutefois n'interdit d'envisager une épaisseur encore moindre.

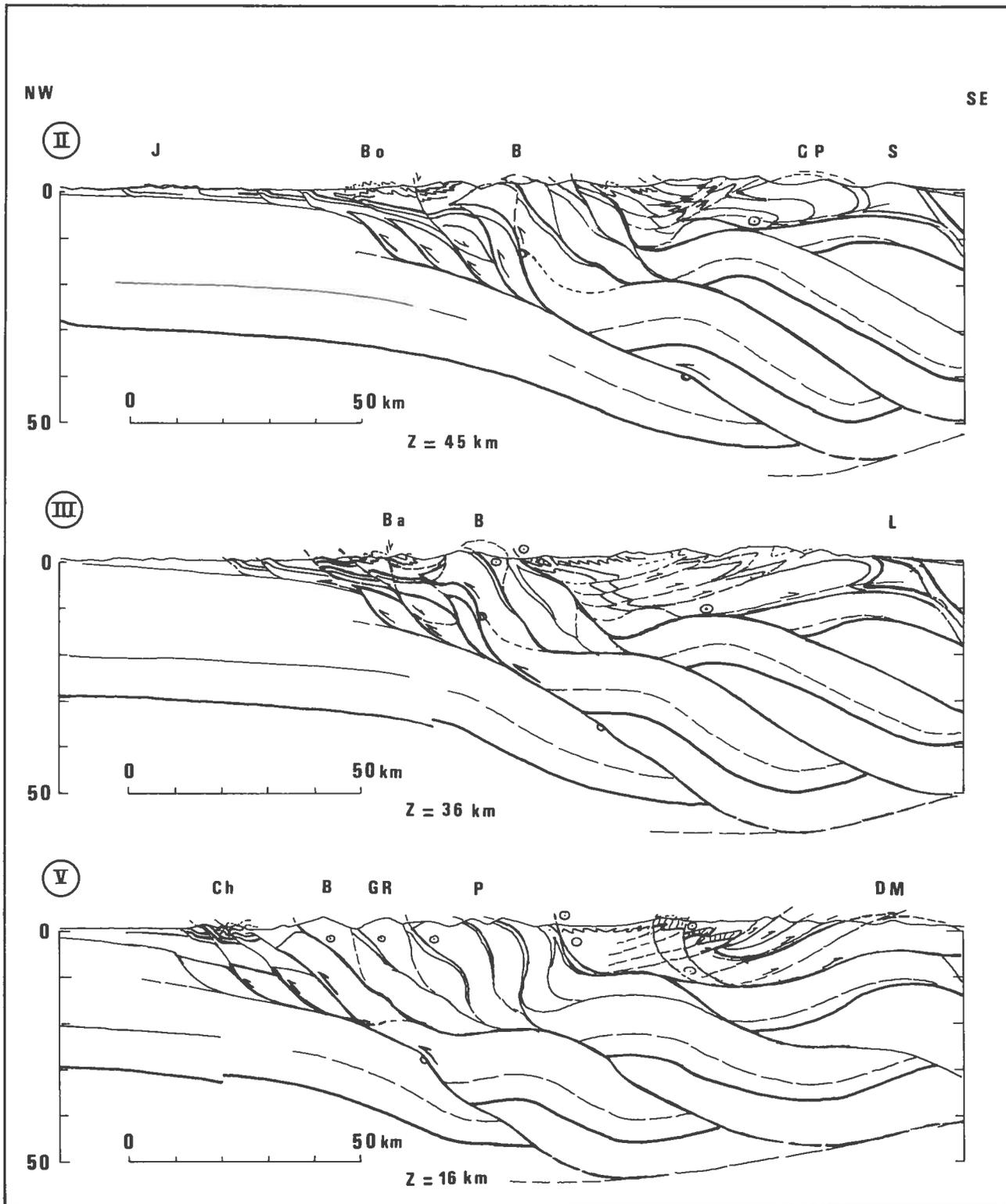
FIG. 4. — Coupes équilibrées crustales II, III et IV

Coupe II : raccourcissement depuis -20 M.A. = 45 km. Coupe III : raccourcissement depuis -20 M.A. = 36 km. Coupe IV : raccourcissement depuis -20 M.A. = 16 km.

FIG. 4. — *Balanced crustal sections (II, III & IV on the map Fig. 1)*

Section II since -20 M.A. : 45 km shortening. Section III since -20 M.A. : 36 km shortening. Section IV since -20 M.A. : 16 km shortening.

COUPES ÉQUILIBRÉES CRUSTALES



4. Données sur les mouvements verticaux.

La remise en l'état avant déformation nécessite la prise en compte des mouvements d'enfoncement et de surrection accompagnant le chevauchement crustal.

L'enfoncement de l'avant-pays peut être suivi grâce à l'histoire de la subsidence du bassin molassique. Le fait majeur concernant celle-ci est l'opposition qui existe entre l'extension du bassin au cours du dépôt de la molasse d'eau douce inférieure (Chattien-Aquitainien) et celle au

cours du dépôt de la molasse marine supérieure (Burdigalien-Helvétien). Le bassin chattien-aquitainien s'étend vers le sud jusque vers Chambéry (l'Oligocène du Bas-Dauphiné s'est déposé dans les demi-graben comme la fosse de Valence et le bassin du Royan dont la dynamique n'a rien à voir avec l'enfoncement par flexion du bassin molassique). Par contre le bassin burdigalien-helvétien s'étend jusqu'au Bas-Dauphiné, extension vers le Sud que l'on peut paralléliser à la disposition des massifs cristallins externes. Une correspondance analogue peut être démontrée au niveau de l'Aar grâce aux isopaques des dépôts

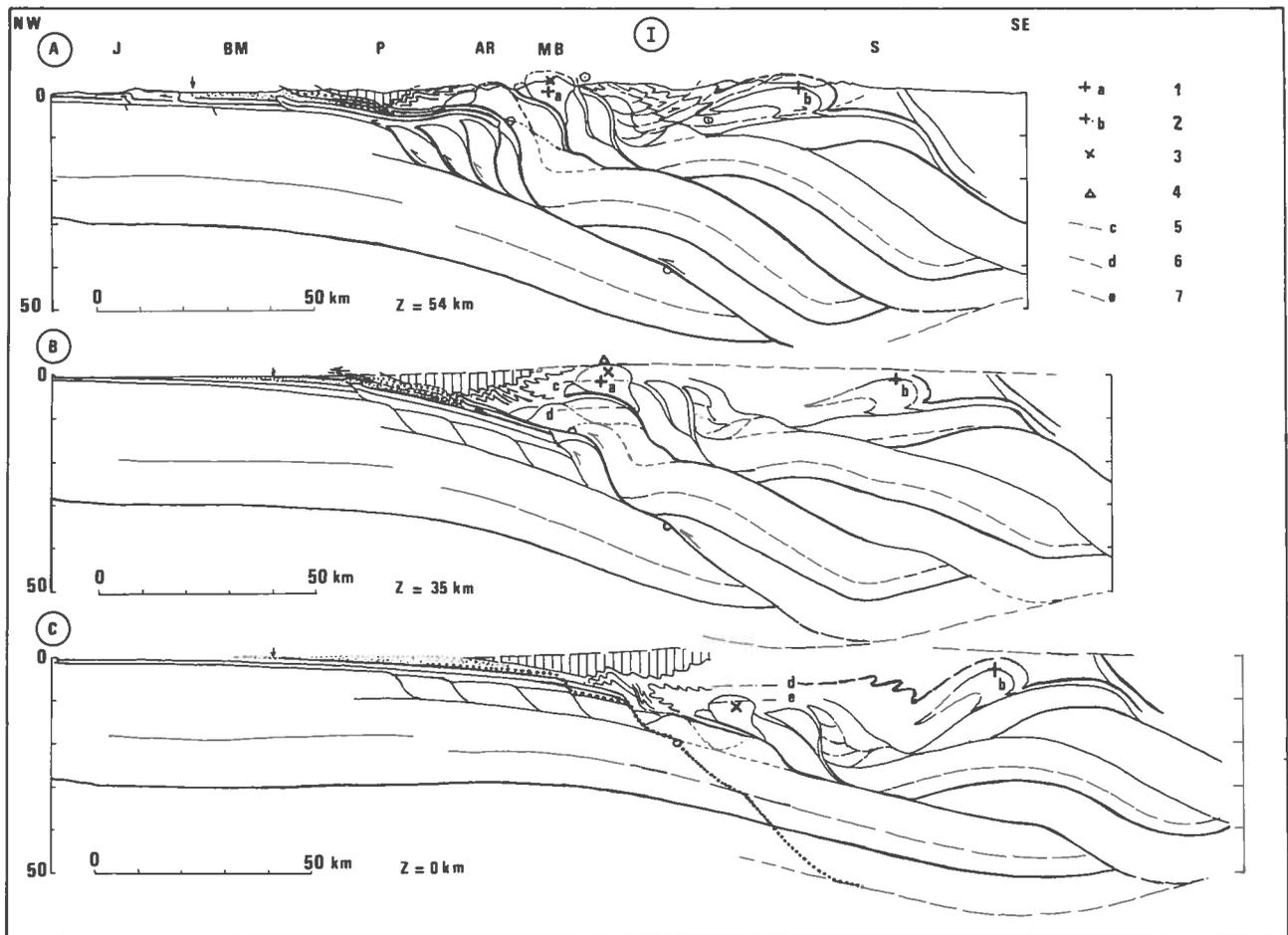


FIG. 5. — Coupe équilibrée crustale I et remise à l'état avant déformation

A) Etat actuel : raccourcissement depuis -20 M.A. = 54 km.
 B) Etat il y a 11 M.A. : raccourcissement depuis -20 M.A. = 35 km.
 C) Etat il y a 20 M.A. : 1) âge sur apatite : 11 M.A. (J. Carpéna, 1984); 2) âge sur apatite : 24 M.A. (J. Carpéna, 1984); 3) âge sur muscovite : 13.5 M.A. (J. Carpéna, 1984); 3) âge sur muscovite : 13.5 M.A. (K/Ar) (Leutwein *et al.*, 1970), 14.8 M.A. (Rb/Sr) (Leutwein *et al.*, 1970); 4) galets du Mont-Blanc dans la molasse sommitale; 5) isotherme 100°C; 6) isotherme 350°C; 7) isotherme 500°C.

FIG. 5. — *Balanced crustal section I and its restoration*

A) Present state : 54 km shortening since -20 Ma.
 B) 11 m.y. ago : 35 km shortening since -20 Ma.
 C) 20 m.y. ago : 1) Apatite datation : 11 m.y. (Carpéna, 1984); 2) Apatite datation : 24 m.y. (Carpéna, 1984); 3) Muscovite datation : 13.5 m.y. (K/Ar) (Leutwein *et al.*, 1970), 14.8 m.y. (Rb/Sr) (Leutwein *et al.*, 1970); 4) Mont-Blanc pebbles in sommital molasse; 5) 100°C isotherm; 6) 350°C isotherm; 7) 500°C isotherm.

molassiques burdigaliens (Lemcke, 1981) qui mettent très nettement en évidence l'influence de la forme du massif de l'Aar situé plus en arrière. C'est cet élément qui nous a conduit à faire débiter le chevauchement crustal des massifs cristallins externes au burdigalien (–20 M.A.) (Mugnier et Ménard, 1986). Nous considérons par ailleurs que l'épaisseur de la molasse est significative de la subsidence du bassin (dépôt à très faible profondeur) à la compaction près (10 % de sous-estimation). La surrection du compartiment chevauchant n'est malheureusement contrainte que par peu de données dans les Alpes occidentales, contrairement aux Alpes centrales (Schaer *et al.*, 1975; Wagner *et al.*, 1977).

— Au niveau de la coupe I, nous disposons des données suivantes. Age à –11 M.A. sur apatite (100 °C) dans le tunnel du Mt-Blanc et à –24 M.A. au nord du massif du Gd-Paradis (Carpena, 1984). Ages à –13,5 M.A. (K/Ar sur muscovite : 350 °C) et à –14,8 M.A. (Rb/Sr sur muscovite : 500 °C) dans le massif du Mt-Blanc (Leutwein *et al.*, 1970). Nous savons qu'il existe des galets du Mt-Blanc au sommet de la molasse au NE du Bas-Dauphiné indiquant que ce massif affleurerait vers –11 M.A. (âge imprécis).

— Au niveau de la coupe II, une donnée paléomagnétique de Rochette et Lamarche (1986) située à la limite rameau interne-rameau externe de Belledonne indique un basculement vers le NW à $7^\circ \pm 8^\circ$ post-formation de la pyrrhotite (300 °C).

— Au niveau de la coupe IV nous disposons d'un âge à –15 M.A. (K/Ar sur muscovite : 350 °C) situé dans le rameau interne de Belledonne (Gasquet, 1979).

— Au niveau de la coupe V nous disposons d'une mesure paléomagnétique (Rochette et Lamarche, 1986) située en arrière des Grandes-Rousses donnant un basculement de $17^\circ \pm 5^\circ$ vers le SE post-formation de la pyrrhotite.

Ces données radiochronologiques sont utilisées en faisant l'hypothèse qu'elles datent le franchissement d'isothermes et donc de profondeurs (nous avons considéré un gradient de 33 °C/km pour passer de l'isotherme à la profondeur). Lors de la remise à un état antérieur à x M.A., le point où il existe une donnée est positionné à la profondeur correspondant à la méthode de datation utilisée si l'âge donné est égal à x ou bien un plus profond si cet âge est légèrement inférieur à x ou enfin un peu moins profond si cet âge est légèrement supérieur à x.

Compte tenu des données disponibles, nous n'avons remis à l'état avant déformation que les coupes I et IV.

B. Présentation des coupes.

Les coupes présentées doivent être vues en gardant à l'esprit qu'elles représentent un modèle compatible avec un certain nombre de données (et non pas déduit de ces

données) et qu'à ce titre elles sont susceptibles d'évoluer au fur et à mesure que des données nouvelles viendront les contraindre.

En particulier si le schéma des blocs de socle réactivés en duplex sous les chaînes subalpines est probable, la géométrie précise de ces blocs est mal connue mais fait partie des éléments qui peuvent être considérablement précisés par de nouvelles données sismiques.

De même le schéma de l'évolution du raccourcissement crustal entre le Sud et le Nord du domaine étudié gagnerait à être contraint par des données supplémentaires : le problème de l'amortissement du chevauchement vers le Sud en particulier n'est pas résolu.

Les éléments que l'on retrouve dans toutes les coupes sont les suivants : écaillage de la lithosphère impliquant le manteau supérieur, réactivation de blocs basculés, duplex sous les massifs cristallins externes, déformation de la couverture située en avant du chevauchement crustal.

Les éléments qui évoluent d'une coupe à l'autre sont les suivants : valeur du raccourcissement crustal, importance de la réactivation des blocs basculés, degré de rétrodéversement des structures en arrière des massifs cristallins externes, valeur du raccourcissement dans la couverture.

Les éléments qui ont une valeur locale sont : le jeu en faille normale de la faille de l'Arcalod (coupes II et III); le fait qu'en Chartreuse et dans les Bauges les chevauchements tardifs recoupent les chevauchements précoces (séquence dans le désordre) alors qu'ailleurs les chevauchements les plus tardifs sont plus externes que les précoces.

CONCLUSION.

Les coupes équilibrées représentent un outil particulièrement utile pour tester la validité de certaines hypothèses tectoniques. Il faut les considérer non pas comme un moyen de générer des modèles, mais comme un support à ces modèles.

Appliqué à l'échelle de la croûte, l'équilibrage des coupes est un exercice particulièrement riche par le nombre et la variété de données qu'il nécessite de synthétiser. Il exige en outre d'arriver à une compatibilité entre les mégastructures mises en évidence par les géophysiciens et les structures de surface décrites par les géologues. Sur l'exemple des Alpes occidentales, la construction de telles coupes permet de concilier un schéma relativement simple d'écaillage dans la partie profonde de la croûte avec un schéma complexe de blocs basculés repris en chevauchements dans la partie supérieure de cette croûte.

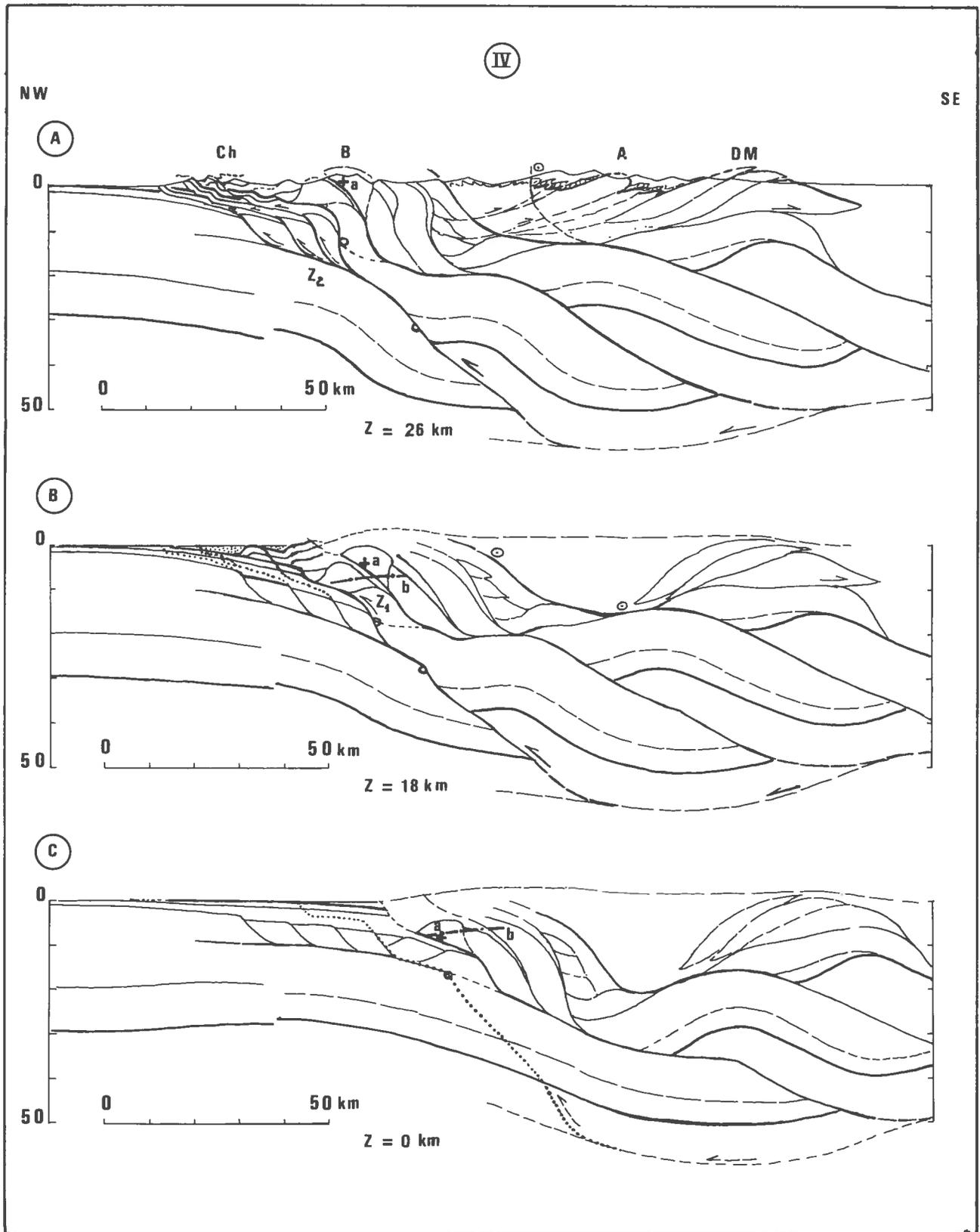


FIG. 6. — Coupe équilibrée crustale IV et remise à l'état avant déformation

- A) Etat actuel : raccourcissement depuis -20 M.A. = 26 km.
 B) Etat il y a 11 M.A. : raccourcissement depuis -20 M.A. = 18 km.
 C) Etat il y a 20 M.A. a) âge sur muscovite (K/Ar) à 15 M.A. (Gasquet, 1979). b) isotherme 350 °C.

FIG. 6. — *Balanced crustal section IV and its restoration*

- A) Present state : 26 km shortening since -20 Ma.
 B) 11 Ma ago : 18 km shortening since -20 Ma.
 C) 20 Ma ago. a) Muscovite datation (K/Ar) : 15 m.y. (Gasquet, 1979);
 b) 350°C isotherm.

Remerciements.

Nous remercions MM. P. Vialon et J.L. Mugnier pour leurs remarques concernant ce manuscrit.

RÉFÉRENCES

- BARFETY J.C., GIDON M., LEMOINE M. et MOUTERDE R. (1979). — Tectonique synsédimentaire liasique dans les massifs cristallins de la zone externe des Alpes occidentales françaises : la faille du col d'Ornon. *CR. Acad. Sc. Paris*, 289, p. 1207-1210.
- BEACH A. (1981). — Thrust tectonics and crustal shortening in the external French Alps based on a seismic cross-section. *Tectonophysics*, 79 p., T₁. T₂.
- BUTLER R.W.H. (1986). — Geometry of crustal shortening in the Western Alps Tectonic evolution of the Tethyan belt, Senghor ed Spec. Publ. NATO. Sous presse.
- CARPENA J. (1984). — Contribution de la méthode des traces de fission à l'étude des Alpes franco-italiennes : relation tectonique-métamorphisme. Thèse d'état. Université de Paris-Sud, 235 p.
- DAHLSTROM C.D.A. (1969). — Balanced cross-sections. *Can. J. Earth Sci.*, 6, p. 743-757.
- DAHLSTROM C.D.A. (1970). — Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 18, p. 332-406.
- DOUDOUX B., MERCIER B. et TARDY M. (1982). — Une interprétation nouvelle de la structure des massifs subalpins savoyards (Alpes occidentales) : nappes de charriage oligocènes et déformations superposées. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 295, p. 63-68.
- ELLIOTT D. (1983). — The construction of balanced cross-sections. *J. Struct. Geol.*, 5, p. 101.
- GASQUET D. (1979). — Étude pétrographique, géochimique et structurale des terrains cristallins de Belledonne et du Grand-Châtelard traversés par la galerie EDF Arc-Isère. Alpes françaises. Thèse 3^e cycle, Grenoble.
- GIDON M. (1964). — Nouvelle contribution à l'étude du massif de la Grande Chartreuse et de ses relations avec les régions avoisinantes. *TLGG*, t. 40, 187-205.
- GOGUEL J. (1952). — *Traité de tectonique*. Paris. Masson et C^{ie} Ed.
- HOSSACK J.R. (1979). — The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction : a review. *J. Geol. Soc. Lond.*, 136, p. 705-711.
- LEMCKE K. (1981). — Das heutige geologische Bild des deutschen Alpenvorlandes nach drei Jahrzehnten Öl-und Gasexploration. *Eclog. Geol. Helv.*, 74, p. 1-18.
- LEMOINE M., GIDON M. et BARFETY J.C. (1981). — Les massifs cristallins externes des Alpes occidentales : d'anciens blocs basculés nés au Lias lors du rifting téthysien. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 292, p. 917-920.
- LEUTWEIN F., POTY B., SONNET J. et ZIMMERMANN J.L. (1970). — Age des cavités à cristaux du granite du Mont-Blanc. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 271, p. 156-158.
- MENARD G. (1979). — Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le Sud-Est de la France. Essai d'utilisation de données géophysiques. Thèse 3^e cycle, Grenoble, 178 p.
- MENARD G. et THOUVENOT F. (1984). — Ecaillage de la lithosphère européenne sous les Alpes occidentales : arguments gravimétriques et sismiques liés à l'anomalie d'Ivrea. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XXVI, 5, p. 875-884.
- MICHEL B. (1978). — La croûte entre vallée du Rhin et vallée du Rhône : interprétation de profils sismiques et résultats structuraux. Thèse 3^e cycle, Paris.
- MUGNIER J.L. et MENARD G. (1986). — Le développement du bassin molassique suisse et l'évolution des Alpes externes : un modèle cinématique. *Bull. Centre Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine*, 10, 1, p. 167-180.
- MUGNIER J.L. et VIALON P. (1986). — Deformation and displacement of the Jura cover on its basement. *J. Struct. Geol.*, 8, p. 373-387.
- MUGNIER J.L., ARPIN R. & THOUVENOT F. (1987). — Coupes équilibrées à travers le massif subalpin de la Chartreuse. *Geodinamica Acta*, sous presse.
- PERRIER G. (1973). — Structure profonde des Alpes occidentales et du Massif Central français. Thèse d'Etat, Paris.
- ROCHETTE P. & LAMARCHE G. (1987). — Evolution des propriétés magnétiques lors des transformations minérales dans les roches : exemple du Jurassique dauphinois (Alpes françaises). *Bull. Minéral.*, sous presse.
- SCHAER J.P., REIMER G.M. et WAGNER G.A. (1975). — Actual and ancient uplift rate in the Gotthard region, Swiss Alps : a comparison between precise levelling and fission-tracks apatite age. *Tectonophysics*, 29, p. 293-300.
- THOUVENOT F. (1981). — Modélisation bidimensionnelle de la croûte terrestre en vitesse et atténuation des ondes sismiques. Implications géodynamiques pour les Alpes occidentales. Thèse D.I. Grenoble, 211 p.
- THOUVENOT F. et PERRIER G. (1980/81). — Seismic Evidence of a crustal overthrust in the western Alps. *Pure Appl. Geoph.*, 119, p. 163-184.
- THOUVENOT F., ANSORGE J. et EVA C. (1985). — Deep structure of the western Alps : new constraints from the EGT.S 1983 seismic experiment 2nd Eur. Geotraverse workshop : the southern segment, *Venice European Science Foundation*, p. 109-113.
- WAGNER G.A., REIMER G.M. et JAGER E. (1977). — Cooling ages derived by apatite fission tracks, mica Rb. SrC dating : the uplift and cooling history of the Central Alps. *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell Università di Padova*, 30, p. 1-27.

Manuscrit déposé le 30 juin 1986
 accepté le 4 janvier 1987

