

Analyse géométrique et cinématique d'un « duplex » issu d'un modèle analogique visualisé en 3D par tomographie aux rayons X

Bertrand Guillier, Patrice Baby, Bernard Colletta, Edgar Mendez,
Rodrigo Limachi, Jean Letouzey et Martin Specht

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 321, série II a,
p. 901 à 908,
1995

B. G. et P. B. : Convention YPFB-
ORSTOM, casilla 1659, Santa Cruz,
Bolivie ;

B. C. et J. L. : IFP Géologie-Géochimie,
BP n° 311, 92506 Rueil-Malmaison
Cedex, France ;

M. S. : Total, tour Total,
92069 Paris-La Défense, France ;

E. M. et R. L. : YPFB, casilla 1659,
Santa Cruz, Bolivie.

Résumé Nous présentons un modèle analogique ayant des propriétés mécaniques similaires à celles d'une série sédimentaire avec deux niveaux de décollement potentiel. Les expériences conduisent au développement de structures de type *duplex* caractéristiques de nombreux avant-pays de chaînes. L'étude de ces *duplexes* analogiques montre, entre autre, que la propagation des chevauchements y est toujours conforme et que le premier « horse » fonctionne en coin intracutané.

Mots-clés : Duplex, Horse, Cinématique, Modèle analogique, Tomographie aux rayons X.

Abstract **Geometry and kinematics
of an experimental duplex analysed by X-ray tomography**

Small-scaled multilayered models with the mechanical properties of a sedimentary pile including two levels of potential décollement were performed to study the kinematics and the geometry of duplex formation. The models reproduce the main features of the duplexes seen in the foreland of many mountain belts. Thrust propagation in the duplex is always in a forward sequence and the earliest horse develops as a triangle zone.

Keywords: Duplex, Horse, Kinematics, Sandbox model, X-ray tomography.

**Abridged
English
Version**

INTRODUCTION

IN a compressional regime a duplex is defined by two décollements or thrusts, a basal "floor thrust" and a "roof thrust" at the top, which bound a set of "horses". Horses are in turn bounded by subsidiary thrust faults curved asymptotically to merge the floor and roof thrusts (Dahlstrom, 1970 ; Boyer and Elliot, 1982 ; Mitra and Boyer, 1986). Boyer and Elliot (1982) classified the duplexes according to the ratio (u/s) where (u) is the displacement and (s) the horse size (fig. 1 A). A series of four multilayered models, producing duplex analogues, has been performed at the Institut Français du Pétrole. Each experiment was carried out in a normal gravity field with a shortening velocity of 30 mm . h⁻¹. The

models were composed of sand interlayered with silicone putty which simulated a weak viscous layer and the roof décollement. Glass microbeads at the base of the sand cake simulated the floor décollement (fig. 1 B). Computerized X-ray tomography (Colletta *et al.*, 1991) was used to visualise cross-sections during deformation and a complete 3D image of the final deformed model. Four or five sections have been scanned in each model every 4 mm (1.7 %) of shortening, with a total shortening of 55 mm (22 %).

GEOMETRICAL ANALYSIS AND NATURAL EXAMPLE

The horizontal cross-sections obtained thanks to X-ray tomography, show that the

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote : B* 9536 Ex : 1

Note

présentée par
Jean Dercourt.

remise le 28 novembre 1994,
acceptée après révision
le 12 mai 1995.

901

Fonds Documentaire ORSTOM



010009536

width of the duplex is constant throughout the model, with a variation of the number (2 to 5) and the size of horses (fig. 2 A). The more representative section (fig. 2 B) shows a hinterland dipping duplex (Boyer and Elliot, 1982) with a floor thrust located in the glass microbeads and the roof thrust within the silicone layer. At the top of the duplex, the upper sand layer is deformed (1) by the development of an antiformal stack induced by the underlying growing duplex and (2) by three thrusts that nucleated in the interbedded silicone décollement layer.

The simulated duplex is comparable to those developed in front of the mountain belts. For instance, there is a real analogy between the resulting model (fig. 2 B) and the deformation front of the southern subandean belt of Bolivia (fig. 2 C; Baby *et al.*, 1992).

KINEMATIC ANALYSIS

Kinematics of duplexes is difficult to constrain in natural examples. The term "horse" was not relevant enough to describe the development of the simulated duplex. We propose to call "subhorse" the volume of rock characterized by the apparition of its frontal ramp beneath the already existing duplex, behind its front and to use the term "horse" only when emergence of the frontal ramp occurs in front of the duplex (fig. 4). In the studied model (fig. 3 a, a'), the first ramp crosses the whole thickness of the sand cake from the glass microbeads (floor thrust) to the model surface (fig. 3 b, b'). At about 1.5 cm of shortening (4 %) the silicone layer induces a decoupling of the upper and lower sand layers. Because of this decoupling (fig. 3 b, b' to c, c') a triangle zone develops first (proto-horse) : there is backthrusting within the silicone putty while both thrusts in the sand have a forward movement (fig. 4). Thrust emergences in the upper level (fig. 3 c, c') result from the propagation of the roof thrust in the silicone putty (Ballard *et al.*, 1987, Boyer and Elliot, 1982). Increasing shortening (fig. 3 d, d' to g'), produces a forward propagation of the thrusts in the basal sand level with an emergence in the silicone putty. The first thrust, evolving in backthrust, accommodates in the roof sequence some of

the excess of shortening accumulated in the duplex (Banks and Warburton, 1986). Notice that the apparition of a new thrust in the duplex does not completely lock older thrusts at the rear. At about 50 mm of shortening (14 %) stacking of the horses induces folding of the first thrust in the upper sand level and the ramp anticline is progressively deformed by the underlying growing duplex.

THE RATIO (u/s)

Figure 4 shows two successive stages of the same section in model n° 2897, with a ratio (u/s) of 0.944 for the earlier stage (fig. 4 A) and of 0.47 for the next stage (fig. 4 B). This final ratio corresponds to that of a "hinterland dipping duplex" although graphically the structure tends to be an "antiformal stack". The variations of (u/s) is due to the variations of size and displacement of each horse as shortening increases:

- during the emergence of a thrust, (s) increases abruptly whilst (u) is almost nil ; hence (u/s) is very low;
- during the activation of a new thrust, (u) increases progressively while (s) is kept constant, hence producing an increase of (u/s).

The ratio (u/s) calculated by Mitra and Boyer (1986) appears as insufficient in the case of incremental deformation studies, because :

- this ratio is calculated for theoretical examples where the size and the displacement of each horse is constant during the shortening; this is a rare case in the nature (Hossack, 1983 ; Banks and Warburton, 1986 ; Eisenstadt and De Paor, 1987) ;
- Mitra and Boyer (1986) consider that the emergence of a new thrust locks the oldest thrusts at the rear (hinterland dipping duplex) or at the front (foreland dipping duplex) of the system. In the analogue experiments two or several thrusts may be active simultaneously, and for instance, folding of the duplex by the growth of an underlying horse (or subhorse) induces the reactivation of oldest thrusts, and the ratio (u/s) may change.

CONCLUSION

From the analysis of sandbox experiments, it is possible to propose some general

remarks about the formation and development of duplexes :

- we have a good analogy between the simulated duplexes and those in front of mountain belt ;

- the width of the duplex developed perpendicularly to the shortening is directly related to the thickness of the brittle layer between the roof and floor décollements ;

- at the beginning of shortening, the proto-horse works as a triangle zone ;

- the thrust propagation into the duplex is in a forward sequence and several thrusts can be active simultaneously ;

- the roof thrust is divided into a frontal flat with frontal emergences, which is really the roof thrust as defined by Boyer and Elliot (1982), and a foreland dipping passive back-thrust above the duplex ;

- the ratio (u/s) which defines the final geometry of a duplex (Mitra and Boyer, 1986) is not sufficient to characterize the progressive deformation analysis.

INTRODUCTION

Un *duplex* chevauchant est une structure limitée par un chevauchement de base (*floor thrust*) et un chevauchement de toit (*roof thrust*) (Dahlstrom, 1970 ; Boyer et Elliot, 1982 ; Mitra et Boyer, 1986). Ces deux chevauchements majeurs, qui correspondent généralement à des décollements, sont réunis par plusieurs rampes qui délimitent des volumes de roche indépendants, constitutifs du *duplex* et nommés *horses* (Boyer et Elliot, 1982 ; Hossack, 1983 ; Ramsay et Huber, 1985 ; Mitra et Boyer, 1986). La classification donnée par Mitra et Boyer à partir d'exemples théoriques présente 3 classes de

duplex en fonction du rapport entre le déplacement (u) et la taille (s) du(des) *horse(s)* :

- les *hinterland dipping duplexes* : *duplexes* où les *horses* sont inclinés vers l'arrière-pays, le déplacement de chaque *horse* est inférieur à sa longueur; la propagation des chevauchements se fait au front du *duplex*, $u/s < 1$ (fig. 1 A) ;

- les *antiformal stacks* : *duplexes* où les *horses* sont superposés, le déplacement de chaque *horse* est égal à sa longueur; la propagation des chevauchements se fait au niveau du point le plus frontal du *duplex*, $u/s = 1$ (fig. 1 A) ;

- les *foreland dipping duplexes* : *duplexes* où les *horses* sont inclinés vers l'avant-pays, le déplacement de chaque *horse* est supérieur à sa longueur, la propagation des chevauche-

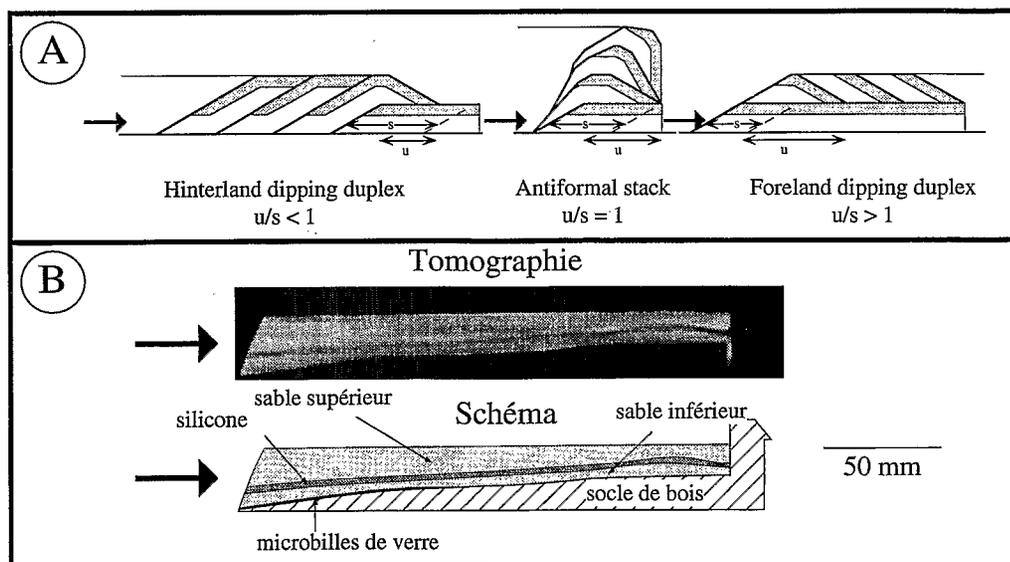


Fig. 1 A : Les trois types de *duplexes* (d'après Mitra et Boyer, 1986).
B : Coupe verticale (tomographie par rayons X) et schéma d'un modèle avant raccourcissement.

A: Duplex terminology (Mitra and Boyer, 1986).

B: Vertical cross-section (computerized X-ray tomography) and sketch of an initial stage. The sand is failing according to the Navier-Coulomb criterion, with no cohesion and $\Psi = 30^\circ$, the silicone putty has a linear dependence of stress upon strain rate (Cobbold, 1975 ; Dixon and Summers, 1985, 1986 ; Ballard et al., 1987 ; Treagus, 1993).

ments se fait en dessous du *duplex* déjà existant, $u/s > 1$ (fig. 1 A) ;

On propose ici, de présenter les résultats principaux d'une série de modélisations analogiques permettant de mieux comprendre les mécanismes de déformation d'un *duplex*. Cette étude est illustrée par la visualisation de la déformation du *duplex* le plus représentatif de nos résultats expérimentaux et par son analogie avec le front orogénique des Andes Centrales.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Les modèles analogiques, réalisés dans la boîte à raccourcissement « Structurator » mise au point par l'Institut Français du Pétrole, ont été visualisés par l'intermédiaire de coupes transverses obtenues par tomographie aux rayons X (Colletta *et al.*, 1991). L'acquisition des coupes s'est faite tous les 4 mm (1,7 %) de raccourcissement au cours de la déformation. Une tomographie 3D de l'ensemble du modèle a également été obtenue à l'état final de la déformation 55 mm (22 % de raccourcissement), grâce à un ensemble de coupes sériées espacées de 3 mm. La vitesse de raccourcissement lors des modélisations était de 30 mm h⁻¹. Le *duplex* présenté ici a été obtenu à partir d'un modèle multicouche, sous des conditions de gravité normales. L'épaisseur (et les variations d'épaisseur) de chaque couche a été calculée (1) pour simuler la colonne stratigraphique du Subandin Sud de Bolivie (incluant ses niveaux de décollement) et (2) pour conserver la géométrie de ce bassin (Baby *et al.*, 1992). Ce modèle était constitué de bas en haut par (fig. 1 B) :

- un socle en bois légèrement incliné vers le piston de la boîte à raccourcissement (28,8 cm de large sur 50 cm de long) ;
- une fine couche de microbilles (épaisseur de 1 à 2 mm) simulant le niveau de décollement basal du *duplex* (Colletta *et al.*, 1991) ;
- une première couche de sable (épaisseur de 6 à 8 mm) ayant une résistance au cisaillement de type Mohr-Coulomb, une cohésion nulle et un angle de friction interne $\Psi = 30^\circ$ (Ballard *et al.*, 1987) ;

- une couche de silicone (épaisseur de 5 à 7 mm) simulant le niveau de décollement de toit du *duplex* ayant un comportement visqueux (résistance au cisaillement proportionnelle à la vitesse de déformation) (Cobbold, 1975 ; Dixon et Summers, 1985, 1986 ; Ballard *et al.*, 1987 ; Treagus, 1993) ;

- une seconde couche de sable (épaisseur de 12 à 15 mm).

ANALYSE GÉOMÉTRIQUE ET ANALOGIE

La coupe horizontale obtenue par tomographie 3D à l'état final (fig. 2 A) montre que la largeur du *duplex* est relativement constante sur l'ensemble du modèle. La coupe verticale la plus représentative, située au centre du modèle (fig. 2 B), montre que ce *duplex* est de type *hinterland dipping duplex* (cf. classification de Boyer et Elliot, 1982). Le nombre (entre 2 et 5) et la taille des *horses* peuvent varier latéralement. Le décollement de base est constitué par la fine couche de microbille, alors que son décollement de toit se situe dans la couche de silicone. Grâce à la silicone, un découplage s'est produit entre la couche de sable inférieure et la couche de sable supérieure. On peut donc parler de déformation dans le *duplex* – au-dessous de la silicone – et de déformation au toit du *duplex* – au-dessus de la silicone. Dans chacun de ces deux niveaux structuraux, on retrouve la même quantité de raccourcissement. Au toit du *duplex*, la couche de sable supérieure est déformée, d'une part, en anticlinal par l'empilement antiformal des *horses* et, d'autre part, par trois chevauchements principaux qui se branchent sur le décollement dans la silicone.

Ce type de *duplex* est très comparable à ceux que l'on trouve au front des chaînes de montagne. On a par exemple une réelle analogie entre ce modèle (fig. 2 B) et le front de déformation du Subandin Sud-bolivien (fig. 2 C, d'après Baby *et al.*, 1992), qui correspond au front orogénique des Andes Centrales. On remarque une analogie, non seulement dans la géométrie, mais aussi dans l'analyse quantitative. En effet, dans les deux cas, la quantité de raccourcissement du

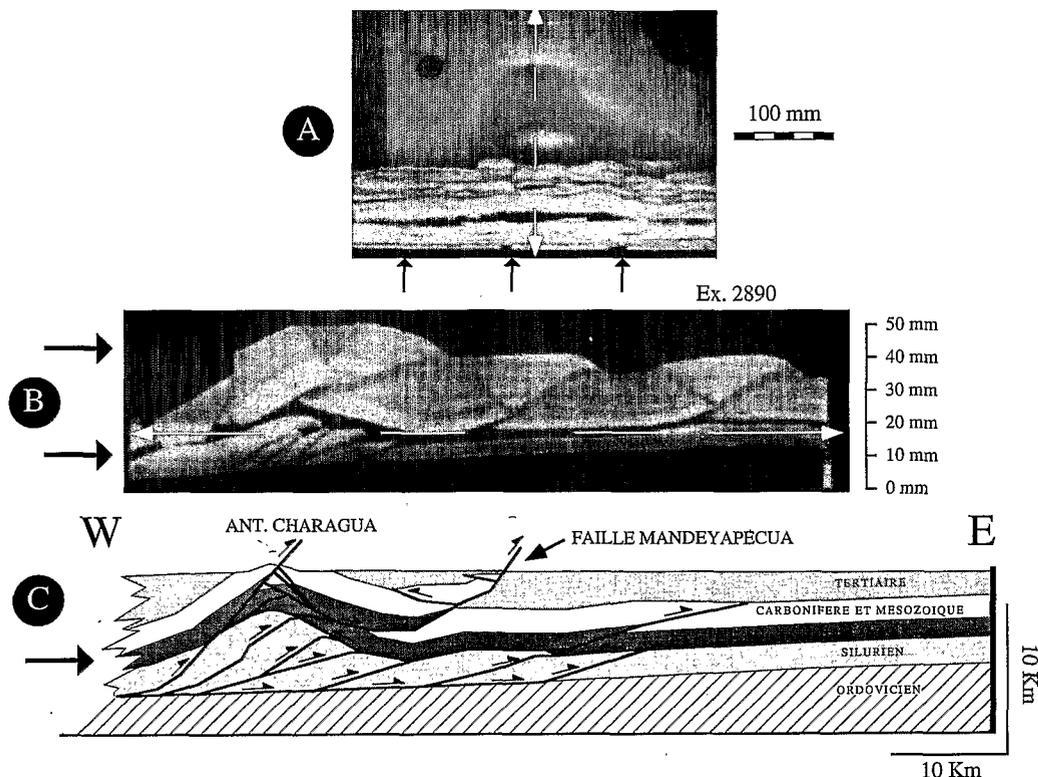


Fig. 2 Analyse géométrique, les flèches noires indiquent le sens du raccourcissement. A : coupe horizontale du modèle n° 2890 réalisée à partir de 120 coupes verticales (raccourcissement = 55 mm), la double flèche blanche localise en X et Y la coupe 2C dans le modèle ; B : coupe verticale à 55 mm de raccourcissement, la double flèche blanche indique le niveau auquel la carte 2A a été faite ; C : structure de Charagua (Subandin Sud de Bolivie ; Baby *et al.*, 1992).

Geometrical analysis, black arrows show the direction of shortening. A: horizontal cross-section of the experiment integrated from 120 vertical sections (shortening = 55 mm), the double white arrow indicates the location in X and Y of the section 2C ; B: vertical cross-section at final stage (shortening = 55 mm), the double white arrow indicates the level of the horizontal section 2C ; C: Charagua structure (southern Bolivian Subandean zone ; Baby *et al.*, 1992).

duplex est accommodée en surface par un pli anticlinal et plusieurs chevauchements.

ANALYSE CINÉMATIQUE

Dans le modèle présenté (fig. 3 a, a'), le premier chevauchement qui se développe correspond à une rampe qui traverse toute l'épaisseur du modèle (fig. 3 b, b'). La première écaïlle qui se développe dans la couche de sable inférieure n'a pas encore de décollement de toit qui permettrait de la nommer *horse* ; on l'appelle arbitrairement *proto-horse*. A partir de ce stade de la déformation, il est possible de différencier 3 grandes étapes dans le développement de cette structure :

(1) transformation du *proto-horse* en coin intracutané (Price, 1986) se propageant dans la couche de silicone (fig. 3 b, b') ;

(2) création de rampes frontales au-dessus de la silicone (fig. 3 c, c'). Cette étape marque le découplage de la déformation de part et d'autre de la couche de silicone ;

(3) développement de *horses* au sens strict (fig. 3 d, d' à g, g'). Ceci marque le passage au stade *duplex* réel, par propagation de chevauchements depuis la microbille de verre (décollement de base) jusqu'à la silicone (décollement de toit). Les chevauchements qui définissent les *horses* du *duplex* ont un sens d'apparition conforme (Graham *et al.*, 1987).

A partir des analyses cinématiques effectuées, certains termes ont dû être définis. Le terme *horse* est vague, car il ne définit qu'un élément entièrement délimité par des failles sans aucune indication sur la cinématique. Nous avons donc divisé les *horses* en : *subhorses*, caractérisés par une rampe frontale se branchant sous le *duplex* déjà existant en arrière du front de propagation et en *horses* au sens strict, lorsque l'émergence du chevauchement se fait au devant du *duplex* (fig. 4). La création d'un nouveau chevauchement au front du *duplex* ne semble pas bloquer le fonctionnement des chevauchements plus en arrière. La première faille dans le sable supé-

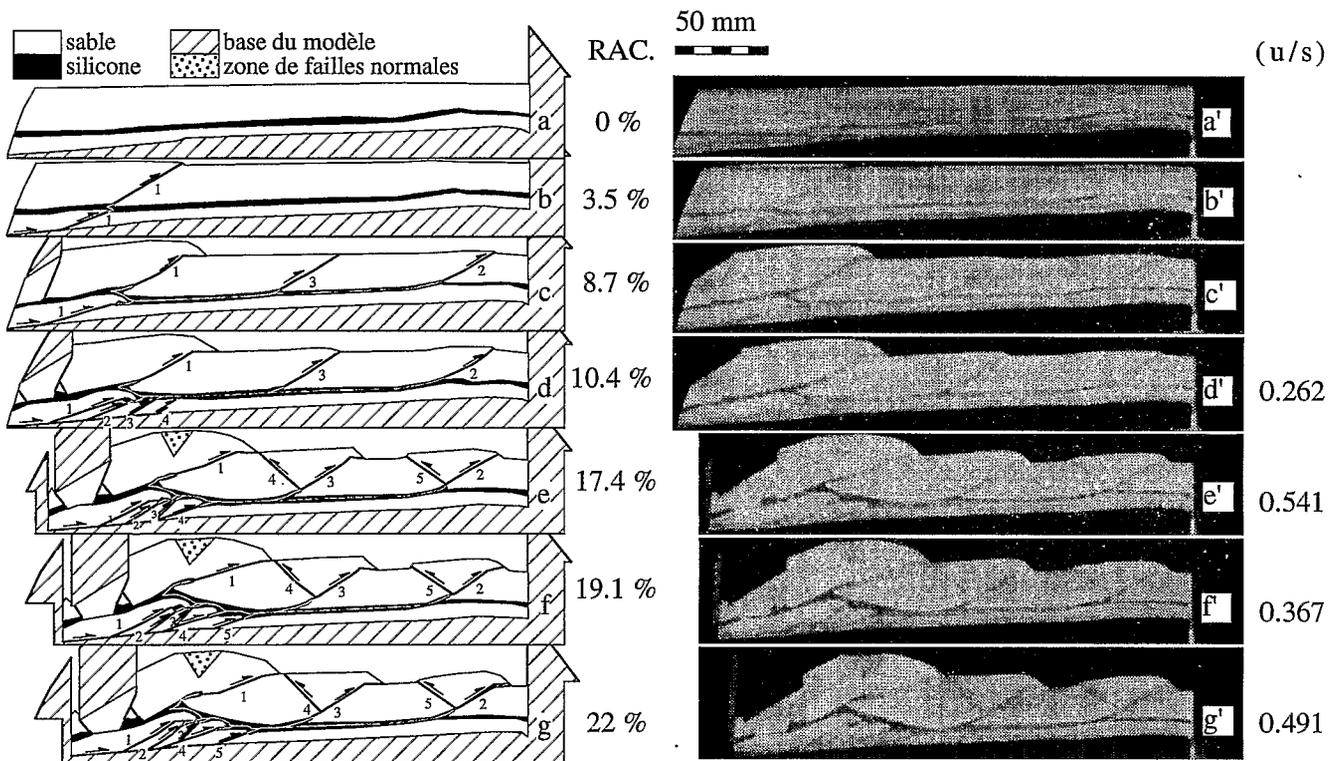


Fig. 3 Schémas et tomographies montrant l'évolution d'une coupe verticale au cours du raccourcissement (modèle 2890).

Description and chronology of deformations in model 2890, right : computerized X-ray tomographies, left : their sketches.

rier est à l'origine d'un anticlinal de rampe progressivement déformé par le *duplex* sous-jacent. Le raccourcissement dans le sable supérieur est réparti sur l'ensemble du modèle, alors qu'il est localisé au tiers postérieur dans le sable de base. Le système passe donc par 3 stades successifs :

1) le stade coin intercutané avec rétrochevauchement au toit du *duplex* au début de la déformation ;

2) le stade *duplex* actif, pour lequel les *horses* se déplacent les uns par rapport aux autres, plusieurs chevauchements du *duplex* pouvant être actifs simultanément ;

3) le stade *duplex* passif, pour lequel seul le chevauchement le plus frontal est actif, les *horses* de l'arrière du *duplex* étant transportés passivement (*piggy back*).

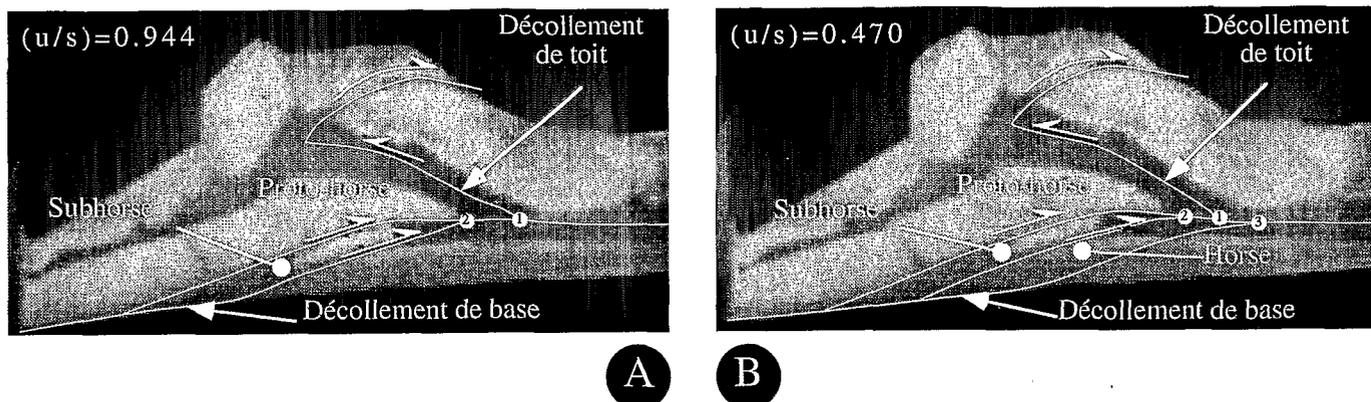
RAPPORT (u/s)

Sur la figure 4, représentant deux stades successifs du modèle 2897, le rapport (u/s) varie de 0,944 (fig. 4 A) à 0,470 lors de

l'émergence d'un chevauchement au front du *proto-horse* (fig. 4 B), ce qui classe la structure finale en « hinterland dipping duplex » alors que graphiquement la structure ressemble à un « antiformal stack ». La variation du rapport (u/s) est due aux variations, d'une part, de la taille des *horses* ou *subhorses* (s) et, d'autre part, au déplacement absorbé au pied de chaque *horse* ou *subhorse*. Si l'on considère différentes étapes du développement du *duplex* (analyse en déformation incrémentale), les modèles analogiques montrent clairement les variations de (s) et de (u) :

- lors de l'émergence d'un nouveau chevauchement, le terme (s) augmente brutalement alors que le terme (u) est presque nul, il en résulte donc un rapport (u/s) très faible;

- lors du fonctionnement de ce chevauchement, le terme (u) augmente progressivement alors que le terme (s) reste constant, d'où un rapport (u/s) qui augmente.



Le rapport (u/s) défini par Mitra et Boyer ne caractérise donc pas complètement les *duplexes* dans le cas d'une analyse où u et s varient dans le temps, car :

- ce rapport est calculé pour des exemples théoriques où la taille des *horses* est constante et où le déplacement de chaque *horse* est lui aussi constant, ce qui est rarement le cas dans les exemples naturels (Hosack, 1983 ; Banks et Warburton, 1986 ; Eisenstadt et De Paor, 1987) ;

- le simple plissement du *duplex* par la naissance d'un *horse* (ou *subhorse*) sous-jacent fait que les chevauchements déjà existants jouent pour absorber cette flexure; le rapport (u/s) est sensible à cette modification indirecte de (u) .

CONCLUSIONS

A partir des études réalisées sur des modèles réduits présentant un *duplex*, divers traits généraux ont été mis en évidence :

- le *duplex* se développe perpendiculairement au raccourcissement, avec une largeur qui est fonction de l'épaisseur du niveau fragile compris entre le décollement de toit et le décollement de base ;

- il y a de fortes similitudes (géométrie, taux de raccourcissement) entre les modèles

analogiques présentés et les fronts orogéniques tels que celui des Andes Centrales ;

- au début du raccourcissement, le *proto-horse* fonctionne comme un coin intracutané ;

- l'apparition des chevauchements définissant les *horses* ou *proto-horses* est conforme ;

- le décollement de toit se divise en une partie frontale, constituée d'un palier avec émergence par rampes frontales et d'une partie arrière où la faille est rétrochevauchante. Le rétrochevauchement permet d'accommoder au toit du *duplex* l'excès de longueur accumulé par le *duplex* (Banks et Warburton, 1986) ;

- bien que son évolution permette de caractériser la cinématique de déformation, le rapport (u/s) défini par Mitra et Boyer (1986) semble insuffisant : d'une part, car il est défini sur des structures théoriques où (u/s) est constant dans le temps, ce qui est rarement le cas pour les structures naturelles et d'autre part, parce que Mitra et Boyer (1986) considèrent que l'apparition d'un nouveau chevauchement dans le *duplex* bloque le fonctionnement des autres chevauchements antérieurs, ce qui n'est pas le cas de nos expériences.

Fig. 4 Deux tomographies d'une même coupe du modèle n° 2897, séparées par un incrément de raccourcissement de 5 mm (1,7 %). Cette figure montre la chronologie relative d'apparition des failles dans la silicone (petits chiffres dans un rond blanc) et la nomenclature des différents éléments pouvant constituer un duplex. A : stade à 43 mm (15,6 % de raccourcissement) ; B : stade à 48 mm (17,4 % de raccourcissement).

Two computerized X-ray tomographies of the same section with (A) 43 mm (15.6%) and (B) 48 mm (17.4%) of shortening. This figure shows the relative chronology of the fault propagation in the duplex (white circles with number) and the nomenclature of the different possible elements in a duplex structure.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BABY, P., HÉRAIL, G., SALINAS, R. et SEMPERE, T., 1992. Geometric and kinematic evolution of passive roof duplexes deduced from cross section balancing: example from the foreland thrust system of the Southern Bolivian Subandean zone, *Tectonics*, 11, 3, p. 523-536.
- BALLARD, J. F., BRUN, J. P., VAN DEN DRIESSCHE, J. et ALLEMAND, P., 1987. Propagation des chevauchements au dessus des zones de décollements : modèles expérimentaux, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 305, série II, p. 1249-1253.
- BANKS, C. J. et WARBURTON, J., 1986. "Passive-roof" duplex geometry in the frontal structures of the Kinthar and Sulaiman mountain belts, Pakistan, *J. Struct. Geol.*, 8, p. 229-237.
- BOYER, S. E. et ELLIOT, D., 1982. Thrust systems, *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 66, p. 1196-1230.
- COBBOLD, P. R., 1975. Fold propagation in a single embedded layer, *Tectonophysics*, 27, p. 333-351.
- COLLETTA, B., LETOUZEY, J., PINEDO, R., BALLARD, J. F. et BALÉ, P., 1991. Computerized X-ray tomography analysis of sandbox models : Examples of thin-skinned thrust systems, *Geology*, 19, p. 1063-1067.
- DIXON, J. M. et SUMMERS, J. M., 1985. M. Recent development in centrifuge modelling of tectonic process : equipment, model construction techniques and rheology of model materials, *J. Struct. Geol.*, 7, p. 83-102.
- DIXON, J. M. et SUMMERS, J. M., 1986. Another word on the rheology of silicone putty : Bingham, *J. Struct. Geol.*, 8, p. 93-95.
- EISENSTADT, G. et DE PAOR, D. G., 1987. Alternative model of thrust-fault propagation, *Geology*, 15, p. 630-633.
- GRAHAM, R., HOSSACK, J. R., DERAMOND, J. et SOULA, J. C., 1987. Géométrie des surfaces de chevauchement, *Bull. Soc. géol. France*, III, 1, p. 169-181.
- HOSSACK, J. R., 1983. A cross-section through the Scandinavian Caledonides constructed with the aid of branch-line maps, *J. Struct. Geol.*, 5, p. 103-111.
- MITRA, G. et BOYER, S. E., 1986. Energy balance and deformation mechanisms of duplexes, *J. Struct. Geol.*, 8, p. 291-304.
- PRICE, R. A., 1986. The southeastern Canadian Cordillera: thrust faulting, tectonic wedging and delamination of the lithosphere. *Journal of Structural Geology*, 8, p. 239-254.
- RAMSAY, J. G. et HUBER, M. I., 1985. *The techniques of modern structural geology*, Academic Press inc. (London), 2 : *Folds and Fractures*, 1985, 391 p.
- TREAGUS, S. H., 1993. Flow variations in power-law multilayers; implications for competence contrast in rocks, in *J.G. Ramsay meeting, Zurich, J. Struct. Geol.*, 15, p. 423-434.