

Modèle de déformation d'un coin crustal dans une zone de plate-forme : exemple du bloc Quercy-Grésigne (Aquitaine orientale, SW de la France)

Christian DAUCH, Jacques INGLES et Pierre VIALARD

Résumé — Le bloc crustal quercynois est limité par des décrochements convergeant, vers le Sud, dans l'anticlinal chevauchant de Grésigne. L'interprétation partielle de la déformation est proposée à partir de l'analogie avec une cellule en coin de Prandtl-Nadaï, dans un cas actif.

Deformation model of a crustal wedge in a platform zone: example of the Quercy-Gresigne block (Eastern Aquitania, Southwestern France)

Abstract — Quercy crustal block boundaries form strike-slip faults, converging southward in the Grésigne thrusting anticline. A partial interpretation of its deformation reveals a simple analogy with a wedge shaped Prandtl-Nadaï's cell, in an active case.

Abridged English Version — I. GEOLOGIC DATA. — 1. In the Quercy-Gresigne area, the northern foreland of the Pyrenees alpine range exhibits (Fig. 1) elementary thrusts associated with convergent strike-slip faults. These structures constitute an interesting and demonstrative tectonic model ([1], [2]). General geologic data ([3], [4], [5]) are completed by microstructural studies ([6], [7], [2]). Major boundary faults trending NNE (Villefranche fault, on the eastern boundary) and NNW (Accident Ouest-Quercynois, on the western one) delimit a crustal block [5] with dense basement beneath the Quercy-Gresigne Permian graben, poorly reactivated in Jurassic times. Paleogene compression, close to N-S, produces a southward relative movement of this wedge between the Rouergue and Eastern Aquitaine blocks (Figs. 1 and 4). Thus, left- or right-lateral displacement occurred along the Villefranche and Western Quercy faults, respectively. This kind of structure could be considered as a "restraining fault junction" [8]. In the southern part of the wedge (Fig. 2), the convergence zone of the main strike-slip faults, the Permian of the Gresigne dome overthrusts to the South upon Jurassic carbonates and syntectonic Paleogene conglomerates, poorly deformed. This thrust continues in a decollement which is developed in Permian pelitic beds [1].

2. *Faults*. — In the northern part of the wedge, they are almost parallel to the block boundaries. In the southern area (Gresigne massif) curved reverse faults trend transversally close to E-W. Minor faults studied in a dozen stations lead to defining shortening direction lines.

3. *Folds*. — Main folds are organized in an echelon domes with about 10 km of wavelength and kilometric amplitude. Some minor folds have a close to N-S trend. The others form a virgation indicating a gradual variation in the major shortening direction.

4. *Shortening trajectories* have a N-S direction in the axial part of the block. Laterally and to the South, they are deflected to the SW and SE. An E-W shortening direction also appears in the Gresigne area.

II. INTERPRETATION FROM A MECHANICAL MODEL: WEDGE SHAPED PRANDTL-NADAI'S CELL. —

1. *Analogy*. — A simple analogy is made between the tectonics of the Quercy crustal block

Note présentée par Michel DURAND-DELGA.

and the plastic plane horizontal strain in a wedge-shaped Prandtl-Nadai's cell for an active case ([9], [10]). Analyse of the natural situation is in good agreement with the model (Fig. 1):

— geometry: the wedge-shaped area is bounded by two converging faults (Villefranche fault and west quercynois Accident);

— rheology: the unstrained basement of the plates (alpine cycle) can be considered as rigid when compared with strained Permian-Mesozoic beds of the wedge which are assumed to be perfectly plastic (criterium of Tresca or Von Mises, in plane strain);

— kinematics: as a consequence of the Pyrenean shortening, the material moves from the large end of the wedge toward the apex. The natural compressed cell differs from Nadai's problem ([10], [11]) in one respect: the plates are considered as motionless, so that plane horizontal strain does not take place everywhere.

2. *Interpretation.* — In the open part of the wedge, north of the region studied, the deformation proceeds by plane horizontal strain; the calculated slip-lines field agrees with the strike-slip faulting pattern and principal stress trajectories agree with the trajectories of the maximum shortening axes determined from field measurements (Fig. 2).

3. *Perturbations of the model.* — The immobility of the rigid plates causes a gradual thickening of the plastic material near them and especially in the apex of the wedge. Consequently, thrust faulting takes place in Permian-Mesozoic beds (Fig. 2).

The curved pattern of the thrust faults, symmetrically arranged with respect to the axe of the wedge, can be explained by change in orientation of the σ_1 - σ_3 plane, which is vertical in the southern area.

Furthermore, the unstrained, or poorly-deformed area observed at the extremity of the wedge is analogous to the rigid kernel ("dead" zone) developed at the contact of a rigid plate squeezing a plastic mass [11].

III. CONCLUSION. — The deformation of the Quercy crustal block (strike-slip faulting and trajectories of shortening) can be interpreted, as a whole, from an analogy with the plastic plane strain in a wedge-shaped Prandtl-Nadai's cell, for an active case. At the apex, the immobility of the rigid plates causes crustal thickening leading to thrust faulting, linked to a *decollement* structure in Permian pelitic beds.

I. DONNÉES GÉOLOGIQUES. — 1. Dans l'avant-pays d'une chaîne alpine, la recherche de modèles structuraux élémentaires associant décrochements et chevauchements nous a conduits ([1], [2]) vers l'analyse structurale du bloc Quercy-Grésigne, sur la bordure sud-ouest du Massif Central (fig. 1). Cette unité fournit un exemple intéressant sur lequel on dispose à la fois de données tectoniques d'ensemble ([3], [4], [5]) et microstructurales ([6], [7], [2]). Elle correspond à un coin crustal [5] limité par deux décrochements (faille de Villefranche de Rouergue et faille ouest-quercynoise) convergeant au Sud du massif de Grésigne où du Permien chevauche du Mésozoïque et du Paléogène peu déformés. Un tel dispositif structural serait de type "restraining fault junction" [8].

Les deux accidents majeurs délimitent une zone de socle « lourd » (amphibolites?) affaissée entre deux blocs où le socle est granitisé : le Rouergue à l'Est et l'Aquitaine orientale à l'Ouest (fig. 1 et 4). Le jeu tardi-hercynien de ces accidents est à l'origine d'un important fossé permien (fossé de Quercy-Grésigne) où se sont accumulés 3 000 à 4 000 m de sédiments détritiques. Le fossé a été faiblement réactivé au Jurassique, puis inversé au Paléogène : au cours de celui-ci se produit un mouvement relatif, vers le Sud,

du bloc quercynois avec déformation compressive suivant cette direction subméridienne. Dans la couverture, il en est résulté un plissement et chevauchement vers le Sud, liés à des décollements dans les pélites permienes [1]. Le chevauchement sud-grésignol observé en surface ne correspondrait donc pas à l'émergence d'un accident du socle ([1], [2]), ce qui est en accord avec les données de subsurface (sismique et sondage GR 1).

2. *Les failles.* — Les fractures majeures affectant le coin crustal sont soit subparallèles aux failles limites (essentiellement dans la partie nord du Quercy) soit transverses et proches de E-W. Dans ce dernier cas, les plus méridionales sont inverses et courbes (concaves vers le Nord). L'accident le plus méridional correspond au chevauchement sud-grésignol qui se raccorde de part et d'autre aux décrochements latéraux majeurs. Les failles mineures ont été étudiées dans une douzaine de stations. Les décrochements dextres ou sénestres permettent d'y définir les directions principales du raccourcissement.

3. *Plissements.* — Les grands plis correspondent à une suite de dômes de grande longueur d'onde (d'ordre décakilométrique) et de relativement faible amplitude (d'ordre kilométrique). L'anticlinorium de Grésigne a été considéré comme de direction N 60. En fait, les divers dômes qui le composent présentent des axes courbes, décalés en échelon vers l'extrémité sud, « en queue de cheval », de la faille de Villefranche.

Les petits plis du massif de Grésigne s'organisent, pour la plupart, en une virgation, concave vers le Nord. En effet, ils passent progressivement d'une direction WNW-ESE près de la faille de la Vère, à l'Ouest, à une direction WSW-ENE à l'Est du massif. Cependant dans ce dernier secteur, près de la faille de Villefranche, existent des plis de direction WNW-ESE ou subméridiens. La disposition en virgation indiquerait qu'il s'agit de plis formés au cours d'une même grande phase. Les plis subméridiens pourraient, eux, correspondre à un stade tardif de cette déformation.

4. *Les trajectoires de raccourcissement*, tracées en fonction de l'analyse des petits plis et fractures, paraissent indiquer deux directions croisées. Cependant, l'organisation des petits plis en virgation incline à penser que ces directions varieraient progressivement du NE-SW au NW-SE ([1], [2]). Ainsi on peut admettre qu'elles divergeraient à partir d'une direction subméridienne dans la partie centrale de la région grésignole. En outre, une autre direction de raccourcissement proche d'E-W est caractérisée à proximité des fractures limites.

II. INTERPRÉTATION A L'AIDE D'UN MODÈLE THÉORIQUE : CELLULE EN COIN DE PRANDTL-NADAÏ. — 1. *Analogie.* — Nous proposons une interprétation d'ensemble du mécanisme de déformation du bloc crustal quercynois à partir d'une cellule en coin de Prandtl-Nadaï ([9], [10]) dans un état actif en déformation plane horizontale (*fig. 1*). Pour développer cette analogie, il faut s'assurer du réalisme d'une similitude géométrique, rhéologique et cinématique entre le dispositif géologique étudié et le modèle mécanique proposé :

— géométrie : comme dans la cellule en coin de Nadaï, on observe deux plateaux convergents, limités par la faille de Villefranche et l'Accident ouest-quercynois, définissant un secteur approximativement triangulaire d'axe Nord-Sud, à pointe dirigée vers le Sud, d'angle au sommet d'environ 45° et de quelques dizaines de kilomètres de rayon (60 km environ);

— rhéologie des matériaux : les plateaux sont constitués d'un socle granité très peu déformé lors du cycle alpin, pouvant être considéré comme rigide par rapport au matériau déformé de la cellule (terrains permo-mésozoïques). Dans le modèle mécanique, les

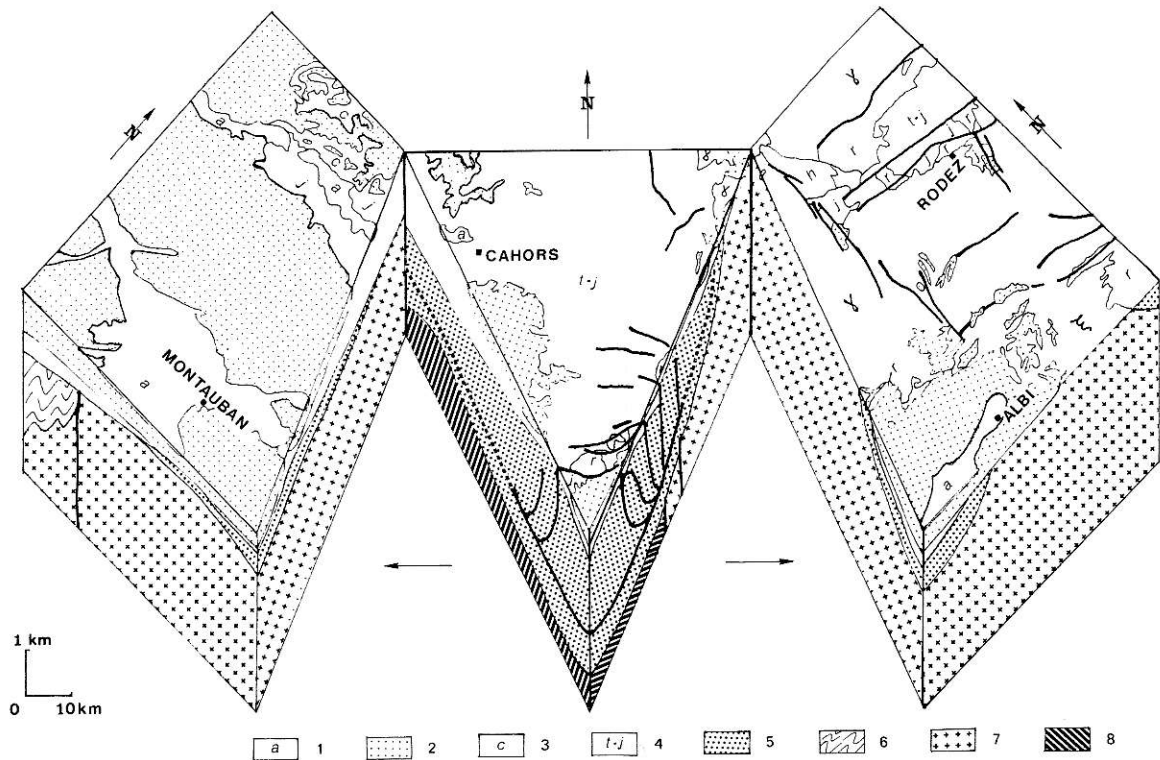


Fig. 4. — Bloc diagramme du dispositif structural Quercy-Grésigne. 1, Quaternaire (a); 2, Tertiaire (molasses); 3, Crétacé supérieur (c); 4, Trias-Jurassique (t-j); 5, Permien (r); 6, Carbonifère (h); 7, socle « léger » indifférencié (γ : granites; ξ : séries métamorphiques); 8, socle « lourd ».

Fig. 4. — Block diagram of the Quercy-Grésigne area. 1, Quaternary (a); 2, Tertiary (molasses); 3, Upper Cretaceous (c); 4, Triassic and Jurassic (t-j); 5, Permian (r); 6, Carboniferous (h); 7, undifferentiated "light" basement (γ : granites; ξ : metamorphic series); 8, dense basement.

plateaux sont rigides et le matériau de la cellule a un comportement parfaitement plastique (critère de Tresca ou Von Mises en déformation plane : le glissement se produit lorsque la contrainte de cisaillement atteint une valeur limite indépendante des contraintes principales);

— cinématique : le sens général du mouvement du matériau de la cellule lié à la compression pyrénéenne est Nord-Sud, ce qui se traduit par des décrochements, sénestre sur la faille de Villefranche et dextre sur l'Accident ouest-quercynois.

Ces éléments montrent la bonne correspondance du dispositif géologique avec une cellule en coin de Prandtl-Nadai dans un état actif. La différence importante par rapport au modèle est d'ordre cinématique : en effet, dans ce dernier, pour un état actif, les plateaux sont animés d'un mouvement vers l'extérieur de la cellule [11] alors que, dans le dispositif géologique étudié, les plateaux sont considérés comme immobiles et donc, localement, l'hypothèse de déformation plane horizontale n'est plus acceptable.

2. *Interprétation.* — Dans la partie ouverte du coin, loin des plateaux (Nord de la zone étudiée), l'analogie avec le modèle semble tout à fait applicable. La déformation peut être considérée comme plane, horizontale avec des décrochements offrant une bonne similitude avec les lignes de glissement théoriques (fig. 1) : accidents dextres orientés globalement NW-SE et sénestres NE-SW. La contrainte verticale correspond alors à la

contrainte principale intermédiaire ($\sigma_v = \sigma_2$) et les directions de σ_1 et σ_3 , situées dans le plan horizontal, sont symétriques par rapport à l'axe du coin (fig. 3) :

— celle de σ_1 est, dans la partie centrale, parallèle à l'axe du coin, c'est-à-dire Nord-Sud; en se rapprochant des plateaux, elle s'infléchit vers ces derniers et les intersecte à 45° ; ainsi, la direction de σ_1 tourne vers le SW dans la partie occidentale et vers le SE dans la partie orientale;

— celle de σ_3 présente une forme courbe, de direction moyenne voisine de Est-Ouest.

Ces résultats théoriques sont en accord avec les données obtenues sur le terrain, notamment pour ce qui concerne l'allure des trajectoires de raccourcissement (fig. 2).

3. *Perturbations du modèle.* — L'immobilité des plateaux rigides provoque près de ces derniers et surtout dans la pointe du coin un épaissement progressif du matériau plastique et la déformation ne peut plus être considérée comme isoaire. Ce blocage latéral du matériau plastique par les plateaux rigides et fixes provoque alors une permutation des contraintes principales : la contrainte horizontale d'orientation générale Est-Ouest croît et devient contrainte intermédiaire, alors que la contrainte verticale devient contrainte mineure (fig. 3). Cet état de contrainte où le plan σ_1 - σ_3 est vertical conduit à la formation de failles inverses éventuellement orientées par les structures antérieures ayant affecté les sédiments permien.

Cette différence des conditions cinématiques aux limites par rapport au modèle mécanique modifie localement le classement des contraintes principales σ_2 et σ_3 mais ne doit pas affecter leur orientation, particulièrement celle de σ_1 , ce qui permettrait d'expliquer :

— d'une part la bonne coïncidence, même dans la pointe du coin et près des plateaux, entre trajectoires de raccourcissement (fig. 2) et celles des contraintes (fig. 3); — d'autre part l'allure courbe des accidents inverses (fig. 2); en effet, le plan vertical σ_1 - σ_3 tourne suivant la direction de σ_1 , vers l'Est dans la partie orientale, vers l'Ouest dans la partie occidentale, ce qui cadre avec la forme courbe, sensiblement symétrique par rapport à l'axe du coin, de la trace en surface des failles inverses. Au niveau où les failles inverses rejoignent les décrochements tangents aux plateaux rigides (faille de Villefranche-Marnaves et faille de la Vère), s'observe localement la superposition de mouvements inverses et en décrochement (fig. 3). Enfin, dans l'extrémité en pointe du coin (partie en avant du chevauchement sud-grésignol) il apparaît, au contact des plateaux rigides et fixes (fig. 3), une zone non déformée qui doit être analogue au noyau rigide (en « équilibre surabondant ») observé sous un plateau rigide enfoncé dans un matériau plastique [12]. La forme de cette dernière zone peut aussi contribuer à expliquer l'allure courbe présentée en surface par les accidents inverses.

III. CONCLUSIONS. — La déformation alpine du bloc crustal quercynois [5] peut être globalement interprétée à partir d'une analogie avec la déformation plastique dans une cellule en coin de Prandtl-Nadaï dans un état actif.

Au Nord, dans la partie ouverte du coin, la déformation peut être considérée comme plane et horizontale avec des décrochements et des trajectoires de raccourcissement analogues aux lignes de glissement et aux directions de contraintes principales du modèle.

Au Sud, dans la pointe du coin, l'immobilité des « plateaux rigides » modifie les conditions cinématiques aux limites du modèle. Il en résulte un blocage latéral des terrains décollés permo-mésozoïques, provoquant leur épaissement structural, avec surélévation, et une permutation des contraintes principales qui conduirait à un système de failles inverses et de chevauchements pouvant être orientés par des phénomènes d'interfaces.

Note remise le 2 novembre 1988, acceptée après révision le 13 février 1989.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. DAUCH et P. VIALLARD, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 304, série II, 1987, p. 663-668.
- [2] C. DAUCH, Décrochements et chevauchements dans une zone de plate-forme : l'exemple du massif de la Grésigne (Aquitaine nord orientale), *Thèse Doct.*, Univ. Paul-Sabatier, 1988, 211 p.
- [3] F. ELLENBERGER, *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 71, 1937, p. 195-246.
- [4] B. GEZE, *Bull. Soc. géol. Fr.*, (6), IV, 1955, p. 453-466.
- [5] M. DURAND-DELGA, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 289, série D, 1979, p. 9-12.
- [6] F. ARTHAUD et P. CHOUKROUNE, *Rev. Inst. Fr. Pétr.*, XXVII, 1972, p. 715-732.
- [7] D. BONJOLY, Étude structurale et minéralisations d'une plate-forme carbonatée : Le Quercy, *Thèse Doct. 3^e cycle*, Univ. d'Orléans, 1980, 303 p. et *Doc. B.R.G.M.*, n° 26.
- [8] K. T. BIDDLE et N. CHRISTIE-BLICK, *Glossary-Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation*, in K. T. BIDDLE et N. CHRISTIE-BLICK éd. *Soc. Econom. Paleont. and Mineral.*, Spec. Publ., 1985, n° 37, p. 375-386.
- [9] L. PRANDTL, *First Internat. Cong. on Appl. Mech. Proc.*, Delft, 1924, p. 41-54.
- [10] A. NADAI, *Theory of flow and fracture of solids*, McGraw-Hill, New York, 1950, 572 p.
- [11] S. P. KANIZAY, *Geol. Survey Profess. Paper*, 414 B, 1962, 16 p.
- [12] A. M. FREUDENTHAL et H. GERINGER, *The mathematical theories of the inelastic continuum. Handbuch der Physik; Elasticity and Plasticity*, VI, 1958, p. 229-433, Berlin, Springer-Verlag.

Laboratoire de Géologie structurale et Tectonophysique,
38, rue des Trente-Six-Ponts, 31400 Toulouse.

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

- Fig. 1. — Comparaison entre le réseau de fractures dans le bloc quercynois et le modèle théorique d'une cellule en coin de Prandtl-Nadai (cas actif). 1, faille; 2, faille probable; 3, décrochement; 4, lignes de glissement.
- Fig. 1. — Comparison between faults network in the Quercy block and the slip-lines field in a wedge-shaped Prandtl-Nadai's cell. 1, fault; 2, possible fault; 3, strike-slip fault; 4, slip-lines field.
- Fig. 2. — Carte interprétative des trajectoires de raccourcissement dans le massif de la Grésigne. 1, molasse paléogène; 2, conglomérats paléogènes; 3, Trias-Jurassique; 4, Permien; 5, faille; 6, faille probable; 7, flexure; 8, décrochement; 9, faille inverse; 10, chevauchement; 11, station des microfractures; 12, station de microplis; 13, direction de raccourcissement; 14, trajectoire de raccourcissement principal; 15, trajectoire de raccourcissement secondaire.
- Fig. 2. — Interpretative sketch map of the shortening trajectories in the Gresigne massif. 1, Paleogene molasse; 2, Paleogene conglomerates; 3, Triassic and Jurassic; 4, Permian; 5, fault; 6, possible fault; 7, flexure; 8, strike-slip fault; 9, reverse fault; 10, thrust fault; 11, minor-faults station; 12, minor-folds station; 13, shortening direction; 14, main shortening trajectories; 15, secondary shortening trajectories.
- Fig. 3. — Interprétation de la déformation paléogène du bloc crustal quercynois suivant le modèle d'une cellule en coin de Prandtl-Nadai; cas actif (cf. [11]) et schémas de l'état des contraintes dans les secteurs nord et sud. 1, trajectoire de σ_1 ; 2, trajectoires de σ_3 (secteur nord) ou de σ_2 (secteur sud); 3, décrochement; 4, chevauchement; 5, mouvement relatif suivant les lignes de glissement; 6, sens de mouvement du matériau; 7, coin rigide.
- Fig. 3. — Interpretation of the Quercy block paleogene deformation from the model of a wedge shaped Prandtl-Nadai's cell; active case (cf. [11]) and corresponding states of stress in the northern and southern areas. 1, σ_1 trajectories; 2, σ_3 trajectories (northern area) or σ_2 trajectories (southern area); 3, strike-slip fault; 4, thrust fault; 5, relative movement along slip-lines; 6, material movement sense; 7, rigid kernel.

