

Mise en évidence de déformations en faille inverse avec ruptures de surface coseismiques dans des dépôts colluviaux würmiens du versant nord du mont Ventoux (Provence occidentale, France)

Alain Dutour^{a,*}, Hervé Philip^b, Erwan Jaurand^b, Philippe Combes^c

^a UMR 8586 « PRODIG », universités Paris-1, Paris-4 et Paris-7, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France

^b Laboratoire de géophysique, tectonique et sédimentologie, UMR 5573, université Montpellier-2, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier cedex 05, France

^c Geoter SARL, 3, rue Jean-Monnet, 34830 Clapiers, France

Reçu le 4 mars 2002 ; accepté le 9 juillet 2002

Présenté par Jacques Angelier

Abstract – Evidence of reverse faulting and coseismic surface ruptures in Würm colluvial deposits from the Mt Ventoux northern slope (Western Provence, France). In western Provence (France), brittle deformation of Quaternary age occurring in the vicinity of the Nîmes and Durance faults has been linked to palaeoseisms of significant magnitude. Our new observations made on the southern rim of the Tertiary Malaucène Basin, in the continuation of a thrust to the north of Mt Ventoux, present evidence for reverse faulting deformation in deposits of a Würm colluvial fan. The analysis of a trench section provides clear evidence for: (1) the development of two successive surface ruptures and degradation of associated scarps during the Mid-Upper Würm, and, (2) the continuation of the reverse fault within the Oligocene basement. These tectonic events were associated with earthquakes of at least 6 in magnitude. *To cite this article: A. Dutour et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 849–856.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

colluvial deposits / Würm / neotectonics / morphotectonics / palaeoearthquake / western Provence / France

Résumé – En Provence occidentale, au voisinage des failles de Nîmes et de la Durance, des déformations cassantes quaternaires ont été associées à des paléoséismes de magnitude notable. De nouvelles observations réalisées sur la bordure sud du bassin tertiaire de Malaucène, au droit d'un chevauchement au nord du mont Ventoux, ont mis en évidence des déformations en faille inverse, enregistrées par les dépôts d'un cône colluvial würmien. L'analyse d'une coupe en tranchée montre clairement : (1) deux ruptures de surface successives au cours du Würm moyen-récent, avec dégradation des escarpements associés, (2) un enracinement de la faille dans le substratum oligocène. Ces événements tectoniques sont associés à des séismes de magnitude minimale voisine de 6. *Pour citer cet article : A. Dutour et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 849–856.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

cône colluvial / Würm / néotectonique / morphotectonique / paléoséismes / Provence occidentale / France

Abridged version

1. Introduction

Western Provence is a region with moderate seismic activity; magnitudes of 5–6.5 [14] and recurrence periods of several tens of thousands of years [5, 9, 17] were

estimated for the strongest events. However, the area provides evidence for Quaternary tectonic deformation near major accidents, some of them being linked to palaeoseisms [11, 18].

The kinematics of major tectonic structures, that were active during the Miocene to Quaternary [8], is compatible with north–south compressive tectonics [8] that took place

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : dutour@univ-tours.fr (A. Dutour).

in the Upper Pleistocene–Holocene and up to Recent times [3, 5, 9, 17].

No palaeoseismic data was available so far for the east–west-thrusting structures of western Provence. Our field observations present evidence for the development of brittle deformation in the Quaternary; the most interesting deformation from a palaeoseismologic point of view was located on the southern rim of the Tertiary Malaucène Basin, within the continuation of one of the faults that fringe Mt Ventoux to the north (La Baume area, Fig. 1B).

2. Würm brittle deformation

Recent brittle deformation has been observed in a small quarry ca 2 km east of Malaucène. In this quarry are worked the superficial gravelly sequences that were deposited on the northern flank of the faulted anticline of Mt Piaud (975 m). This area represents the western ending of the Ventoux chain. A number of faults affect this series, which we date from the Würm.

2.1. Stratigraphy of deformed sequences

The deformation affects deposits of a 15 m-thick colluvial fan that was built at the outlet of a ravine that cuts through limestone. The latter is composed of two superimposed morphosedimentary units, U1 and U2, separated by a planar discontinuity. The layering is sub-horizontal in U1 and dips 20° towards the northwest in U2.

All this suggests that the fan was formed by an accumulation of cryoclastic deposits at the foot of the mountain during two main phases. These phases were separated by a period of soil deposition and rock weathering.

2.2. Faults

Several types of faults affect the colluvial deposits (Fig. 2A). Firstly, two normal faults define a N035 trending graben (Fig. 2A and B) with vertical throws of 60 cm. Then, some 20 m further south, a north-verging and N070–N080 trending reverse fault affects the gravelly sequences of unit U2 (Fig. 2A, C and D), with an offset of ca 30 cm. The deformation is sealed by a coarse gravelly layer that thickens at the front of the fault to form a new morphosedimentary unit (U3). This system recalls the process of degradation and burying of a small fault scarp. Some ten metres further north, unit U2 is affected by a south-verging knee fold (Fig. 2C).

In order to gain further information on the north-verging reverse fault, a north–south-oriented section was excavated using a mechanical shovel. Our aims were (1) to follow the deformation at depth, (2) to check the continuation of the accident in the Oligocene basement, and (3) to constrain its geometry. Observations made on the western wall of the digging clearly show evidence for (Fig. 3A):

- the change in geometry of the fault with depth, where it becomes sub-vertical;
- the continuation of the fault within the Oligocene greenish marl and the offset of about 60 cm of the base of U1;
- the non-constant vertical throw that is twice at the base (58 cm) of unit U2 than at its top (ca 30 cm); this

variation suggests that two events occurred; each event was responsible for both the development of original scarps and their degradation;

- the significant variation in thickness of the lower level of unit U2 on both sides of the accident; it is indeed thicker in the overthrust compartment;
- the clear cut-and-fill discontinuity between U1 and U2.

The continuation of the fault within the Oligocene substratum has been cleared. The fault plane oriented N072 and dipping 85–88 to the south presents thin striations dipping to the west (80°), which indicate a reverse kinematics with a slight sinistral strike-slip component (Fig. 3B). On both side of the main fault, many secondary fault planes are present, whose orientations vary from N50 to N150 [12]. More often, the direction of movement is not obvious. The main fault kinematics is consistent with the north–south compression widely known in Provence and southern Alps during the Quaternary [8].

2.3. Age of deformation

We date the deformed deposits from the Würm, because of their cryoclastic origin and morphologic position. Available archaeological data confirm this age. Indeed, during the archaeological study of 1996, some 50 lithic tools of Mousterian make [4] were excavated from the layers of black clay; they can be connected to lower unit U1. According to prehistorian P.-J. Texier (in *litteris*), this Mousterian tool set could be contemporaneous with or slightly younger than the suite from the deposit of Bérigoule (Vaucluse Plateau, Murs region), which was found in red palaeosoil. The age of this palaeosoil was given by 16 TL dates of between 88 and 102 ka BP (isotopic stage 5c) obtained on burnt silex (Max-Planck Institute, Heidelberg, Germany). Unit U1 could therefore represent the Lower Würm.

Consequently, upper units U2 and U3 could be attributed to the Mid-Upper Würm, provided that the gravelly layer with a red clay matrix (base of U2) is linked to the Mesowürm intermediate stage, dated at ca 30 ka BP. Indeed, this intermediate stage is often recorded as a slightly reworked, red palaeosoil in the Würm deposits of Lower Provence [1, 2, 13]. Considering these chronological constraints, the faults observed in the site of La Baume could have been active during the Upper Pleistocene, later than the Lower Würm and very likely during the Mid–Upper Würm.

3. Discussion and conclusions

Although the deformation observed at the front of the La Baume quarry is well exposed, its interpretation was problematic, which led us to dig a trench in this area. Indeed, it was necessary to consider the hypothesis of gravitational movements, since reverse and normal faults coexist over a short distance. However, the site topography does not show any characteristic signature of sliding. Moreover, the trench that we made within one of the reverse faults showed unambiguously that the accident continues down into the basement. Consequently,

we propose that the deformation observed at the site of La Baume has a tectonic origin. The tectonic origin of these deformations is supported by their localisation on the prolongation of a regional fault (Fig. 1B). The steep dipping of the fault plane is consistent with that of other faults that affect the northern boundary of the western end of the Ventoux anticline. These faults correspond to Oligocene normal faults that have been reactivated since Miocene as reverse faults [7]. These could explain the inversion of dipping (to the south) in the shallow part of the fault. As surface ruptures are associated to large earthquakes in regions characterised by compressive tectonics (El Asnam earthquake, Algeria, in 1980, for example), we interpret the normal faults located south of the reverse faults as secondary accidents that accompanied deformation in the overthrusting compartment.

Therefore, proof is given that compressive tectonic activity has occurred here during the latest glacial period,

probably during the Mid- to Upper Würm. Our observations thus show that the reactivation of overthrusting accidents that took place from the Miocene lasted up to the Quaternary in the Ventoux Mounts.

Data gathered from both the site and the trench allows us proposing the following morphotectonic scenario: (1) formation of a colluvial fan (perhaps Lower Würm), (2) period of pedogenesis and/or alteration (intermediate stage at ca 30 ka BP), (3) first tectonic event associated with surface rupture, (4) erosion phase and emplacement of a second colluvial unit (Mid- to Upper Würm), (5) tectonic event with surface rupture, degradation and scarp burying.

Therefore, the recent tectonic deformation, which is clearly related to surface ruptures, has a coseismic origin, and presents evidence for two palaeoearthquakes. Taking into account the throws observed along the north-verging reverse fault, these palaeoearthquakes would have had a minimum magnitude of ca 6 [20].

1. Introduction

La Provence occidentale, région où l'activité sismique est modérée (magnitudes estimées entre 5 et 6,5 pour les séismes les plus forts) [14], recèle, au voisinage du tracé d'accidents majeurs, des indices de déformations tectoniques quaternaires, associés pour certains à des paléoséismes (i.e. les failles de Nîmes et de la Durance) [11, 18]. Les magnitudes estimées sont proches de 6,5 pour les paléoséismes les plus forts, avec des périodes de retour de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'années [5, 9, 17] (Fig. 1A). Par ailleurs, les vitesses de déplacement évaluées par la modélisation du signal topographique sont comprises entre 0,1 et 0,6 mm an⁻¹ et les magnitudes calculées par l'étude de la segmentation des failles ont des valeurs maximales comprises entre 6,5 et 6,9, avec des temps de récurrence allant de 5000 à 15 000 ans [3]. L'activité sismique montre une très bonne juxtaposition des foyers des séismes avec les structures tectoniques majeures de la région. Celles-ci, dont l'activité miocène à quaternaire pour certaines a été démontrée [8], correspondent, soit à des accidents décrochants NE–SW et nord–sud (faille de la Moyenne Durance, faille de Salon–Cavaillon, terminaison nord-est de la faille de Nîmes), soit à des chevauchements est–ouest à vergence sud (chaînes des Costes, de la Trévaresse, du Lubéron) ou à vergence nord (Mont Ventoux–Montagne de Lure). La cinématique de ces accidents est compatible avec une tectonique compressive nord–sud [8], qui se poursuit au Pléistocène supérieur–Holocène et jusqu'à l'Actuel [3, 5, 9, 17].

Aucune donnée paléosismologique n'avait été obtenue sur les structures chevauchantes est–ouest de

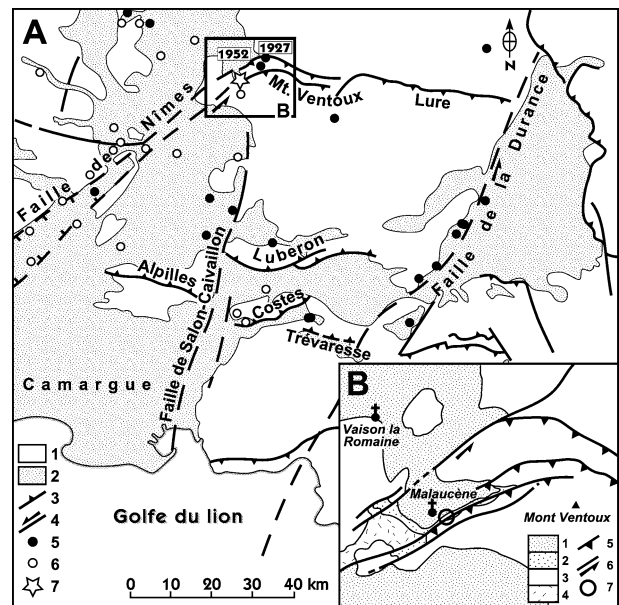


Figure 1. A. Cadre sismotectonique. 1 : Terrains anté-néogènes ; 2 : bassins néogènes à quaternaires ; 3 : failles inverses et chevauchements ; 4 : décrochements ; 5 : séismes de magnitude supérieure à 4, bien localisés [14] ; 6 : séismes de magnitude supérieure à 4 de localisation incertaine [14] ; 7 : site de La Baume. **B.** Carte géologique simplifiée du bassin de Malaucène et du mont Ventoux. 1 : Néogène à Quaternaire ; 2 : Oligocène ; 3 : Mésozoïque ; 4 : Trias ; 5 : failles inverses et chevauchements ; 6 : décrochements ; 7 : site de La Baume.

Figure 1. A. Seismotectonic background. 1: Pre-Neogene terrain; 2: Neogene to Quaternary basin; 3: reverse faults and thrusts; 4: strike-slip faults; 5: Well localised earthquakes with magnitude larger than 4 [14]; 6: Poorly localised earthquakes with magnitude larger than 4 [14]; 7: La Baume site. **B.** Simplified geological map of the Malaucène Basin and Mont Ventoux area: 1: Neogene to Quaternary; 2: Oligocene; 3: Mesozoic; 4: Trias; 5: reverse faults and thrusts; 6: strike-slip faults; 7: La Baume site.

la Provence occidentale. Nous avons focalisé nos recherches sur la bordure nord de l'anticlinal du Ventoux, un des reliefs majeurs de la Provence occidentale (1910 m), en particulier dans le secteur de Malaucène (Fig. 1A), qui a connu au cours du XX^e siècle deux séismes d'intensité VII, en 1927 et en 1952 (catalogue Sirene, IPSN/EDF/BRGM). Nos investigations de terrain nous ont permis de mettre en évidence des indices de déformations cassantes quaternaires, dont les plus intéressantes sur le plan paléosismologique sont localisées sur la bordure sud du bassin tertiaire de Malaucène, au droit de l'un des accidents qui bordent au nord le mont Ventoux (site de La Baume; Fig. 1B).

2. Structuration néogène et évolution morphologique de la bordure sud du bassin de Malaucène

Le bassin de Malaucène (Fig. 1B) est l'élément méridional du bassin molassique péri-alpin du comtat Venaissin [6]. Il se superpose à un graben oligocène, qui s'étendait depuis le massif de Montmirail jusqu'à la terminaison orientale du Ventoux [15]. Sa structure est celle d'un synclinal affectant des formations continentales oligocènes et des molasses marines miocènes. Sa bordure sud est en contact par faille (de direction N060–N070) avec les calcaires crétacés de l'anticlinal du Ventoux (faille du Groseau) [7, 15].

L'histoire tectonique cénozoïque du secteur est bien documentée [4, 7, 10, 15, 19]. Après la phase de compression pyrénéo-provençale, qui conduit à l'esquisse de l'anticlinal de direction est–ouest du chaînon Ventoux–Lure, le *rifting* oligocène et la tectonique distensive associée entraînent la formation d'un graben de direction N060–N070 au nord de ce chaînon. Au Langhien, les premiers effets du serrage alpin se font sentir, mais ce n'est qu'à partir du Serravallien supérieur qu'intervient un *continuum* de déformation, lié à un régime compressif proche de nord–sud, entraînant une surrection des reliefs préalpins. Les accidents de direction N060–N070, ayant joué en failles normales à pendage vers le nord au cours de l'Oligocène, ont rejoué en failles inverses à partir du Miocène supérieur [7].

Etant donné l'absence de formations corrélatives, l'évolution morphologique pliocène du secteur reste mal contrainte. Au cours du Quaternaire, comme dans toute la Provence subalpine, on assiste à l'enfoncement du réseau hydrographique, au dégagement de formes structurales dérivées [16] et à l'élaboration de modelés auxquels sont fréquemment associées diverses formations superficielles corrélatives (terrasses et glacis-cônes alluviaux, cônes de déjec-

tion, cônes et tabliers d'éboulis cryoclastiques, cônes colluviaux). Si l'évolution morphologique quaternaire paraît contrôlée principalement par les variations climatiques, l'intervention de la tectonique récente n'est pas à exclure, ainsi que le suggèrent l'encaissement accentué du réseau hydrographique et la profonde dissection du flanc nord de l'anticlinal du Ventoux.

3. Les déformations cassantes würmiennes

Ces déformations récentes, de type cassant, ont été observées à environ 2 km à l'est de Malaucène, dans une petite carrière exploitant les formations superficielles caillouteuses qui s'appuient sur le versant sud de la dépression monoclinale de La Baume, au pied de la Montagne de Piaud (975 m), anticlinal faillé constituant la terminaison occidentale du chaînon du Ventoux. Une série de failles affecte ces formations, que nous rapportons au Würm.

3.1. Stratigraphie des formations affectées

Les déformations affectent les dépôts d'un cône colluvial construit au débouché d'un ravin entaillant les calcaires urgoniens, à fort pendage vers le nord-ouest. Sur le front principal de la carrière, les formations colluviales atteignent une quinzaine de mètres d'épaisseur et montrent deux unités morphosédimentaires superposées, U1 et U2, séparées par une discontinuité plane, soulignée à la base de U2 par un mince niveau caillouteux à matrice argileuse rouge. L'unité U2 est localement consolidée en brèche. Le litage est subhorizontal dans U1 et incliné de 20° vers le nord-ouest dans U2. Sur la paroi ouest de la carrière, les cailloutis de l'unité supérieure U2 s'enrichissent vers l'aval en matrice argileuse brune, présentent des lentilles allongées d'argiles brun foncé, puis s'organisent en lits conglomératiques horizontaux, fréquemment consolidés et à base ravinante. Par ailleurs, dans une petite carrière, située à 150 m à l'ouest de la précédente, on observe des couches d'argiles noires, intercalées dans des cailloutis rattachés à l'unité U1 et renfermant quelques silex taillés.

L'ensemble de ces faits suggère la construction d'un cône par accumulation de dépôts cryoclastiques au pied de la montagne, en deux phases séparées d'une période pendant laquelle se sont formés des sols et/ou des altérites. Un changement de géométrie du cône expliquerait les variations observées dans le litage des deux unités. Vers l'aval, les dépôts colluviaux venaient se fondre dans les apports torrentiels d'un petit cours d'eau drainant la dépression.

3.2. Les failles

Plusieurs failles de natures différentes affectent les dépôts colluviaux (Fig. 2A). On observe tout d'abord deux failles normales délimitant un graben (Fig. 2A et B), de direction N035 et dont les rejets verticaux sont de 60 cm.

À une vingtaine de mètres au sud de ces déformations, une faille inverse à vergence nord, nettement soulignée par la torsion de deux lentilles argileuses brun foncé appartenant à l'unité U2, affecte les niveaux caillouteux (Fig. 2A, C et D), avec un décalage d'une trentaine de centimètres. Cette déformation est scellée par un niveau caillouteux grossier, s'épaississant à l'aval de l'accident et constituant une nouvelle unité morphosédimentaire (U3), à matrice argileuse jaunâtre et d'extension limitée à quelques mètres. Ce dispositif évoque la dégradation et l'enfouissement d'un petit escarpement de faille.

L'absence de blocs ou de cailloux fracturés et d'un miroir avec stries ne permet pas de caractériser davantage la cinématique de l'accident à jeu apparent inverse, de direction estimée à N070–N080, étant donné l'impossibilité de dégager un plan de faille. À une dizaine de mètres au nord de la déformation précédente, l'unité U2 est affectée par un pli en genou que nous considérons comme l'expression d'une faille inverse antithétique, c'est-à-dire à vergence sud (Fig. 2D).

Pour obtenir plus d'informations sur la faille inverse à vergence nord, nous avons fait réaliser à la pelle mécanique une tranchée de direction nord–sud. Cette investigation avait pour but de suivre en profondeur la déformation, de vérifier l'enracinement de l'accident dans le substratum oligocène et de contraindre sa géométrie. Les observations réalisées sur la paroi ouest de la tranchée montrent clairement (Fig. 3) :

- le changement de géométrie de l'accident en profondeur, celui-ci devenant subvertical ;
- l'enracinement de l'accident dans les marnes verdâtres oligocènes et un décalage de la base de U1 d'une soixantaine de centimètres ;
- un rejet vertical non constant, celui-ci étant, à la base, d'environ le double (58 cm) de celui mesuré au sommet (environ 30 cm) dans les lentilles d'argiles de U2 ; cette variation des rejets verticaux suggère l'intervention de deux événements successifs, ayant entraîné la formation d'escarpements originels, dégradés par la suite ;
- une variation d'épaisseur significative du niveau basal de U2 de part et d'autre de l'accident, celui-ci étant plus épais dans le compartiment chevauché ;
- une nette discontinuité de ravinement entre U1 et U2.

Le prolongement de la faille dans les argiles oligocènes a été dégagé. La faille présente un plan fi-

nement strié orienté N072, avec un très fort pendage vers le sud (85° à 88°S). Les stries sont fortement inclinées vers l'ouest, indiquant qu'il s'agit d'une faille inverse avec une légère composante décrochante sénestre (85°W) (Fig. 3B). De part et d'autre du plan principal, sur un mètre d'épaisseur environ, on observe de nombreux plans secondaires striés, dont les directions varient entre N50 et N110 [12], mais dont la cinématique n'est pas toujours clairement lisible. On peut remarquer que le fonctionnement de la faille principale est compatible avec la compression nord–sud, qui est connue par ailleurs en Provence occidentale et dans les Alpes du Sud au Quaternaire [8].

Par ailleurs, une excavation de reconnaissance (3 m de profondeur) a été pratiquée dans la petite carrière située à environ 150 m à l'ouest de la précédente, dans le prolongement de l'accident inverse à vergence nord. La paroi est de l'excavation a révélé un pli en genou affectant les couches d'argile noire de l'unité U1. Considérant cette déformation comme l'expression d'une faille inverse à vergence nord, cette observation est cohérente avec les données recueillies au niveau de la carrière principale.

3.3. Âge des déformations

Étant donné leur faciès (matériel anguleux d'origine cryoclastique) et leur position morphologique (unité inférieure proche du niveau du talweg actuel), nous rapportons les dépôts affectés au Würm. Les données archéologiques sont en accord avec cette attribution chronologique. En effet, les couches d'argile noire rattachées à l'unité inférieure U1 ont fait l'objet en 1996 d'un sondage archéologique, qui a livré une cinquantaine de pièces lithiques de facture moustérienne (restes de taille et éclats retouchés en racloirs) [16]. Selon le préhistorien P.-J. Texier (in litteris), cet ensemble moustérien relativement modeste pourrait être contemporain ou un peu plus récent que les séries du gisement de Bérigoule (plateau du Vaucluse, région de Murs), récoltées dans des paléosols rouges dont les âges, fournis par 16 datations TL sur silex brûlés (institut Max-Planck, Heidelberg), sont compris entre 88 et 102 ka BP (stade isotopique 5c). L'unité U1 pourrait donc représenter le Würm ancien.

Quant aux unités supérieures U2 et U3, elles pourraient être rattachées au Würm moyen à récent, si on attribue le niveau caillouteux à matrice argileuse rouge (base de U2) à un interstade mésowürmien, situé autour de 30 ka BP, fréquemment enregistré dans les dépôts würmiens de basse Provence sous forme de paléosols rouges plus ou moins remaniés [1, 2, 13]. Avec ces attributions chronologiques, les failles observées sur le site de La Baume auraient joué au cours du Pléistocène supérieur, après le Würm ancien, probablement au Würm moyen à récent.

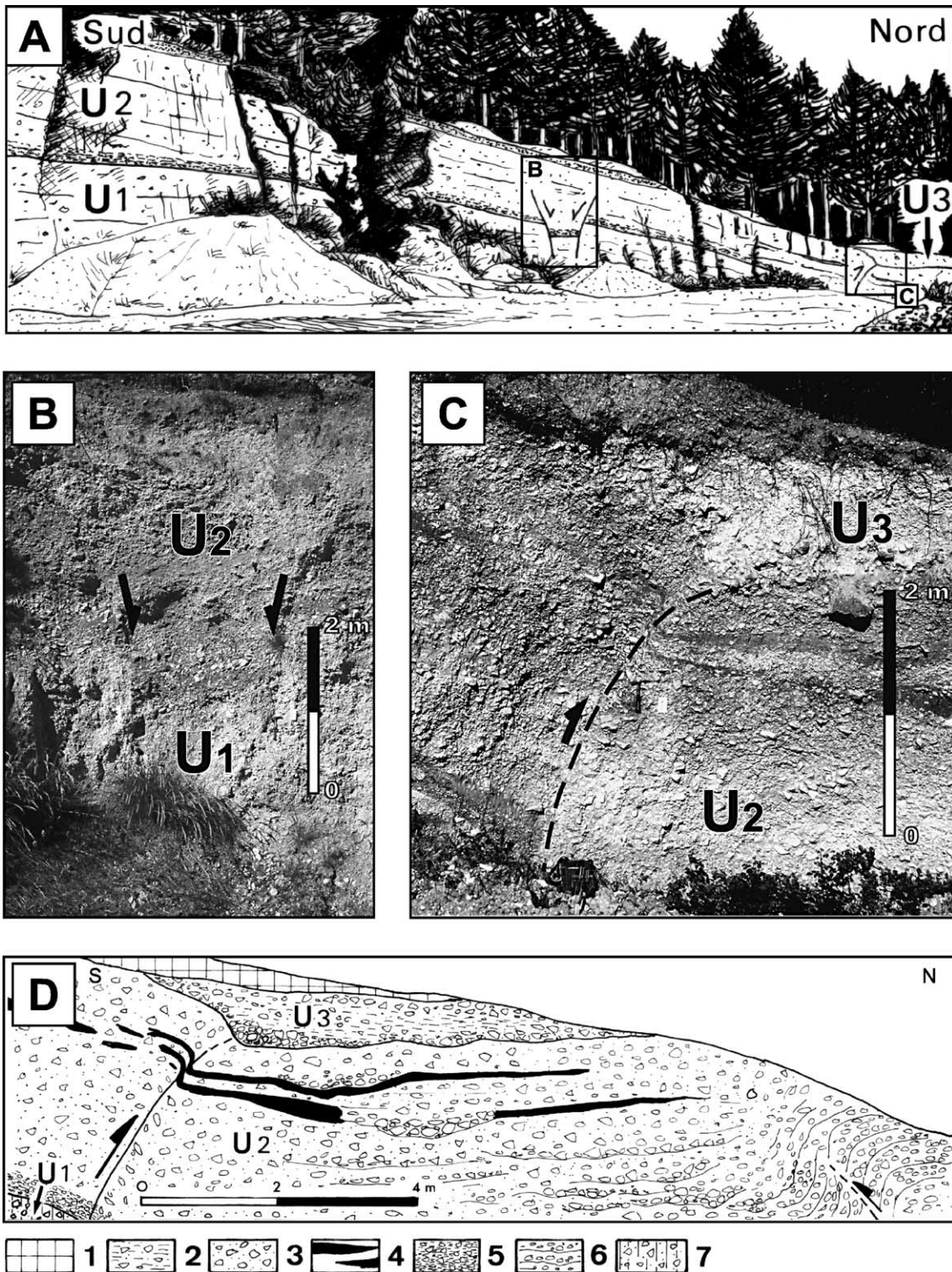


Figure 2. Déformations cassantes affectant les dépôts colluviaux würmiens du site de La Baume. **A** : Vue d'ensemble des failles sur le front ouest de la carrière (d'après photographie). **B** : Failles normales et graben associé. **C** : Faille inverse à vergence nord. **D** : Faille inverse à vergence nord et faille inverse antithétique ; 1 : déblais ; 2 : cailloutis à matrice jaunâtre (U3) ; 3 : cailloutis à matrice argileuse brune (U2) ; 4 : lentilles d'argile brun foncé (U2) ; 5 : cailloutis à matrice argileuse brun-rouge foncé (base de U2) ; 6 : conglomérats à litage horizontal et passées (U2) ; 7 : cailloutis consolidés (U1).

Figure 2. Brittle deformation affecting Würm colluvial deposits at the site of La Baume. **A** : General view of the faults on the western front of the quarry (according to photographs). **B** : Normal faults and associated graben. **C** : North-verging reverse fault. **D** : North-verging reverse fault and antithetic reverse fault ; 1 : cuttings ; 2 : gravel with yellowish matrix (U3) ; 3 : gravel with brown clay matrix (U2) ; 4 : dark brown clay lenses (U2) ; 5 : gravel with brown to dark red clay matrix (base of U2) ; 6 : conglomerate with horizontal layering and (U2) lenses ; 7 : consolidated gravel (U1).

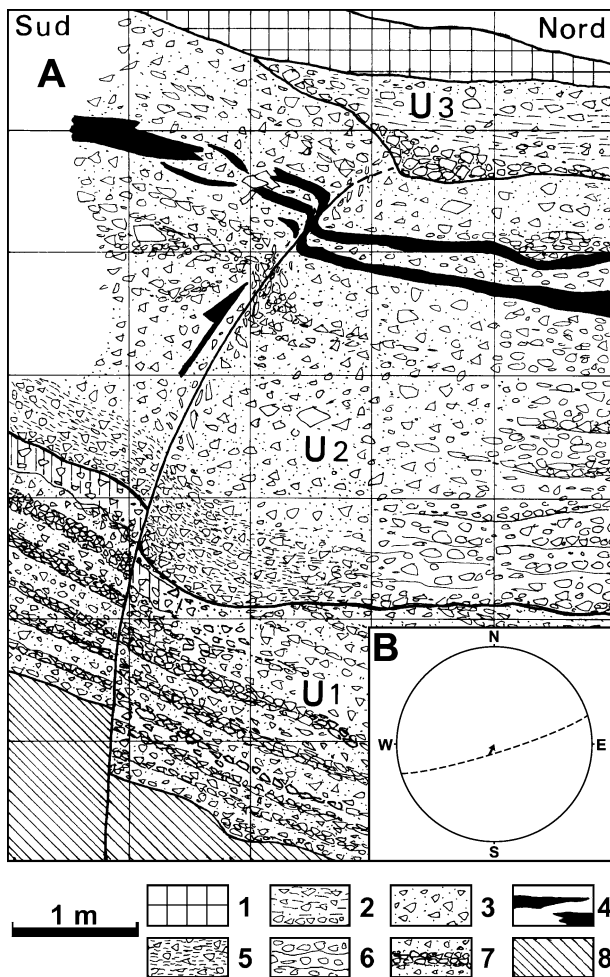


Figure 3. A. Observation en tranchée de la faille inverse à vergence nord. **1** : Déblais ; **2** : cailloutis à matrice jaunâtre (U3) ; **3** : cailloutis à matrice argileuse brune (U2) ; **4** : lentilles d'argile brun foncé (U2) ; **5** : cailloutis à matrice argileuse brun-rouge foncé (base de U2) ; **6** : conglomérats à litage horizontal et passées consolidées (épandages torrentiels de fond de vallée, U2) ; **7** : alternance de lits caillouteux à matrice argileuse et de lits criblés (U1) ; **8** : substratum, marnes verdâtres oligocènes. **B.** Strie observée sur le plan de faille principal dans le substratum oligocène (canevas hémisphère inférieur). La ligne courbe représente le plan de faille et la flèche la strie.

Figure 3. A. Trench observations of the north-verging reverse fault. **1**: Cuttings; **2**: gravel with yellowish matrix (U3); **3**: gravel with brown clay matrix (U2); **4**: dark brown clay lenses (U2); **5**: gravel with brown to dark red clay matrix (basis of U2); **6**: conglomerate with horizontal layering and consolidated lenses (torrential pouring of valley floor, U2); **7**: alternation of gravel layers with clay matrix and sorted layers (U1); **8**: basement of Oligocene greenish marl. **B.** Slickenside observed on the main fault plane in the Oligocene basement (lower hemisphere canvas). The curve and the arrow indicate the fault plane and the slickenside lineation, respectively.

4. Discussion et conclusions

Les déformations observées sur le front de carrière du site de La Baume, bien que clairement exprimées, nous ont posé, dans un premier temps, un problème d'interprétation, qui a justifié le creusement d'une

tranchée. En effet, on sait que les déformations affectant les formations superficielles peuvent relever de phénomènes mimétiques de la tectonique (glaciotectonique, gélistructures, mouvements gravitaires, etc.). Dans le cas présent, il convenait d'examiner l'hypothèse de mouvements gravitaires, puisque coexistent, sur une courte distance, des failles normales et des failles inverses. Les déformations observées pouvaient être interprétées comme des ruptures liées à un glissement de terrain (grabens dans le corps du glissement, faille inverse dans le bourrelet de poussée basal).

Cependant, la topographie du site ne révèle pas de signature morphologique caractéristique d'un glissement (niche d'arrachement, série de replats de glissement limités par des escarpements, bourrelet frontal). En outre, la tranchée réalisée au niveau d'une des failles inverses a montré sans ambiguïté, d'une part, l'enracinement de l'accident dans le substratum, d'autre part, une verticalisation progressive du plan de faille et non un aplatissement en profondeur, comme dans le cas d'une rupture liée à des glissements. Par conséquent, nous considérons que les déformations observées au site de La Baume ont une origine tectonique. Le fait que ces déformations se situent sur le prolongement d'une faille régionale cachetée ici par les cônes colluviaux würmiens accréditte également leur origine tectonique. La verticalisation du plan de faille en profondeur, qui peut paraître surprenante pour une faille inverse, est en fait un caractère assez général pour les différents accidents qui bordent au nord le mont Ventoux. Ces failles correspondent à d'anciennes failles normales oligocènes à pendage nord, qui ont joué en failles inverses à partir du Miocène supérieur [7]; ceci se traduit par une inversion des pendages (vers le sud) dans la partie la plus superficielle des plans de faille.

Quant aux failles normales situées au sud de la faille inverse, nous les interprétons comme des accidents secondaires accompagnant la déformation du compartiment chevauchant, comme cela a pu être observé au niveau des ruptures de surface associées à des séismes de forte magnitude dans des contextes compressifs (séisme d'El Asnam en Algérie en 1980).

Nous avons donc ici la preuve d'une activité tectonique compressive pendant la dernière période glaciaire, probablement au Würm moyen à récent. Nos observations montrent donc que la réactivation d'accidents chevauchants à partir du Miocène se poursuit au Quaternaire dans le chaînon du Ventoux.

Les données fournies par le site et la tranchée nous permettent d'établir le scénario morphotectonique suivant : construction d'un cône colluvial (Würm ancien), puis période de pédogenèse et/ou d'altération (interstade autour de 30 ka BP), ensuite premier événement tectonique, accompagné d'une rupture de

surface, suivi d'une phase d'érosion et de la mise en place d'une deuxième unité colluviale (Würm moyen à récent), enfin, second événement tectonique avec rupture de surface, dégradation et enfouissement de l'escarpement.

Ainsi, ces déformations tectoniques récentes, clairement associées à des ruptures de surface, sont d'origine cosismique et fournissent l'évidence de deux paléoséismes. D'après la valeur des rejets observés sur la faille inverse à vergence nord, la magnitude mini-

male des paléoséismes serait voisine de 6 [20]. Nos résultats soulignent la nécessité de poursuivre les investigations de terrain visant à rechercher la trace de jeux de failles dans les formations quaternaires, sachant qu'en Provence occidentale, leur signature topographique a été souvent oblitérée des paysages morphologiques, en raison des longs intervalles séparant chaque événement et de taux d'érosion élevés, en particulier au cours des périodes froides du Quaternaire [16].

Remerciements. Nous remercions la municipalité de Malaucène, qui nous a autorisés à réaliser une tranchée à la pelle mécanique dans la carrière de La Baume.

Références

- [1] P. Ambert, J. Évin, P. Gabert, Datation ^{14}C d'un horizon lithochrome würmien en basse Provence occidentale, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D 278 (1974) 33–35.
- [2] P. Ambert, G. Clauzon, Morphogenèse éolienne en ambiance périglaciaire : les dépressions fermées du pourtour du golfe du Lion, Z. Geomorph. Suppl.-Bd. 84 (1992) 55–71.
- [3] E. Baroux, Tectonique active en région à sismicité modérée : le cas de la Provence (France), thèse, université Paris-Sud, Orsay, 2000, 327 p.
- [4] J. Buisson-Catil, J.-P. Texier, Malaucène Les Argiliers, Serv. Rég. Archéol. PACA, Bilan scientifique, 1996, pp. 156–157.
- [5] D. Carbon, P. Combes, M. Cushing, T. Granier, Enregistrement d'un paléoséisme dans les sédiments du Pléistocène supérieur dans la vallée du Rhône : quantification de la déformation, Géol. Alpine 69 (1993) 33–48.
- [6] L. Casagrande, Évolution tectonique mio-pliocène du bassin du comtat Venaissin (vallée du Rhône), Géol. France 3 (1989) 13–20.
- [7] L. Casagrande, J. Andrieux, J.-L. Morel, Le massif de Suzette (Vaucluse) : l'inversion tectonique d'un graben oligocène, Géol. France 3 (1989) 3–12.
- [8] P. Combes, La tectonique récente de la Provence occidentale : microtectonique, caractéristiques dynamiques et cinématiques. Méthodologie de zonation sismique et relations avec la sismicité, thèse de 3^e cycle, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1984, 182 p.
- [9] P. Combes, D. Carbon, M. Cushing, T. Granier, P. Vaskou, Mise en évidence d'un paléoséisme pléistocène supérieur dans la vallée du Rhône : implications sur la connaissance de la sismicité en France, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II (1993) 689–696.
- [10] S. Debrand-Passard, S. Courbouleix, M.-J. Lienhart, Synthèse géologique du Sud-Est de la France, Mém. BRGM 125 et 126, 1984, 615 p.
- [11] B. Grellet, P. Combes, T. Granier, H. Philip, Sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique, Mémoire H.S. Soc. géol. France, 164, LDG/CEA, 1993, vols 1–2.
- [12] E. Jaurand, Activité récente de la terminaison nord de la faille de Nîmes et de son raccordement avec le Ventoux. Mise en évidence d'un indice de déformation quaternaire dans le bassin de Malaucène, DEA, université Montpellier-2, 2000, 39 p.
- [13] M. Jorda, Les terrasses alluviales de l'arc à l'aval de Roquefavour. Étude géomorphologique et chronostratigraphique, in : P. Leveau, M. Provansal (Eds.), Archéologie et environnement : de la Sainte Victoire aux Alpilles, Travaux du centre Camille-Julian 14 (1993) 235–247.
- [14] J. Lambert, A. Levret, M. Cushing, C. Durouchoux, Mille ans de séismes en France, Ouest Éditions, Presses Académiques, Nantes, 1996, 70 p.
- [15] P. Monier, C. Cavalier, G. Truc, et al., Carte géologique au 1:50000, feuille Vaison-la-Romaine, n° 915, 1987, et notice explicative, 1991, 55 p.
- [16] J.-P. Peulvast, E. Baroux, O. Bellier, M. Sébrier, Le problème de l'activité des failles de Nîmes, de Salon-Cavaillon et de la Moyenne Durance (Sud-Est de la France) : apports de la géomorphologie structurale, Géomorphologie : relief, processus, environnement 4 (1999) 327–358.
- [17] M. Sébrier, A. Ghafiri, J.-L. Bles, Paleoseismicity in France: fault trench studies in a region of moderate seismicity, J. Geodyn. 24 (1–4) (1997) 207–217.
- [18] M. Terrier, Néotectonique de la Provence occidentale (France) : vers une analyse multicritère des déformations récentes. Application à la classification des structures sismogènes, Doc. BRGM, n° 207, 1991, 232 p.
- [19] M. Villegier, J. Andrieux, Phases tectoniques post-éocènes et structuration polyphasée du panneau de couverture nord-provençal (Alpes externes méridionales), Bull. Soc. géol. France 8 (4) (1987) 147–156.
- [20] D.L. Wells, K.J. Coppersmith, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull. Seismol. Soc. Am. 84 (4) (1994) 974–1002.