



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1209–1218



Tectonique

## L'île Crémieu (Jura, France), un plateau calcaire épargné par la tectonique ?

Muriel Rocher\*, Marc Cushing, Francis Lemeille, Stéphane Baize

IRSN, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses cedex, France

Reçu le 29 septembre 2003 ; accepté après révision le 7 juin 2004

Disponible sur Internet le 25 août 2004

Présenté par Jacques Angelier

---

### Résumé

L'île Crémieu, un plateau de calcaires jurassiques situé au sud de la Bresse et au front du Jura, est généralement considérée comme non déformée. Les glaciers et cours d'eau quaternaires ont souligné et lessivé des plans de fractures NNE et NW–SE, bordant et traversant l'île Crémieu. L'analyse de profils sismiques montre l'existence de failles normales NNE et de décrochements NW–SE, affectant les couches du socle au Miocène supérieur. L'analyse microtectonique sur le terrain confirme l'existence de ces failles et permet de caractériser leurs mécanismes successifs durant les épisodes tectoniques majeurs du Cénozoïque. *Pour citer cet article : M. Rocher et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**The 'Île Crémieu' (Jura, France), a limestone plateau spared from tectonics?** The 'Île Crémieu', a plateau of Jurassic limestones located in the southern border of the Bresse and at the Jura front, is generally considered as non-deformed. Quaternary ice sheets and drainage have underlined and cleaned out some fracture planes trending NNE and NW–SE that border and crosscut the 'Île Crémieu'. The analysis of seismic profiles reveals NNE-trending normal faults and NW–SE-trending strike-slip faults, crosscutting the basement to Late Miocene layers. Microtectonic fieldwork shows that these faults exist and were activated during the main Cainozoic tectonic events. *To cite this article: M. Rocher et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* contraintes ; Jura ; Bresse ; héritage structural ; France

*Keywords:* stresses; Jura; Bresse; structural inheritance; France

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [murielrocher@wanadoo.fr](mailto:murielrocher@wanadoo.fr) (M. Rocher).

## Abridged English version

### 1. Introduction

The 'Île Crémieu' (Fig. 1), located at the southern end of the Bresse and at the southwest of the Jura front, corresponds to a 300–400-m height plateau of Jurassic limestones, gently dipping to the southeast. It is edged with fault hidden under thick Tertiary and Quaternary deposits.

To the northwest, faults trending N020–050° separate the 'Île Crémieu' from the Bas Dauphiné coal Basin (eastern end of the Saint-Étienne Stephanian Basin) [3]. To the southeast, the 'Île Crémieu' is separated from the Bas Dauphiné Molasse Basin by the N050° Vernes Fault. To the northwest, it is separated from the ENE–WSW Hercynian Vienne–Chamagnieu High [9] by N120° faults. To the northeast, it is separated from the Plateau de Chaillon–Saint Sorlin with the N120° Rhone fault zone (with the Lagnieu fault), then from the folded Jura Mountains with the N120–150° Villebois fault.

The border faults probably correspond to crustal Hercynian faults [4,6,11]. However, the 'Île Crémieu' is classically considered as an undeformed plateau since the Mesozoic [4–6,10].

The drainage network of the study area has been extracted from the IGN 1:25 000 topographic maps and supplemented with inactive and temporary channels deduced from the topography (Fig. 2a). The most important rectilinear drainage shapes were extracted from this drainage network (Fig. 2c), except those that can be attributed to human building. Some northeast (read: NE–SW-trending) anomalies can be due to the Quaternary ice erosion. Some of the northwest trends could be related to bedding dip. The others northwest lineaments and those trending NNE can be considered as related to fracturing.

These faulted valleys, presently followed by streamlines, were deeply incised and the slope were cleaned up by the Quaternary Riss and Würm ice sheets [10]. Thus, the microtectonic imprints of strain previous to Quaternary could have been erased along these fault zones. To determine the tectonic and structural evolution of the study area, structures were analysed at depth by seismic-reflection (§ 2), and microtectonic studies were done on recent outcrops showing microstructural evidences (§ 3).

### 2. Deep structures deduced by the seismic profiles

Twelve seismic profiles trending NNE and WNW were analysed in the Bas Dauphiné and in the north-western part of the 'Île Crémieu' (Figs. 1a and 2c). Ten deep drills (Fig. 2c) allowed us to identify the layers and to correlate profile double-time scales and drill depth scales. The crystalline basement to Late Miocene layers can be recognised. Numerous faults are crosscut, the half are locally syn-sedimentary faults with a normal offset, the other half, sub-vertical with minor offsets, may be strike-slip faults.

The faults showing a normal vertical offset on seismic lines, nearly perpendicularly crosscut by the WNW profiles (dips of 60–80°, Fig. 2a), are located in the 'Île Crémieu' and in the Bas Dauphiné. In the basement, these faults are sub-vertical and gathered in a unique fault, above the Ain river course. In the cover, the faults make a half-graben collapsed to the northwest. The two most important ones, which crosscut the basement up to the Late Miocene layers, shift the Jurassic layers of nearly 350 m. The thickening of some deposits in the downthrown part of faults indicates a syn-sedimentary activity during the Carboniferous (coal deposits) and the Oligocene. The thickening of the Jurassic deposits to the northwest (shown by the drills) indicates a collapse during the Late or final Jurassic. The Carboniferous basin observed on seismic lines (Fig. 2a) reaches a maximum thickness of 600 m nearly above the Ain River, and Oligocene basin reaches 300 m on the profiles but continues to thicken to the Bresse [3]. The northeastern border of the 'Île Crémieu' corresponds to a cliff retreat to the southeast of the major fault offset. The mapping of the normal faults indicates a dominant NNE trend (Fig. 2c).

Some other faults with tenuous offsets are sub-vertical along the NNE profiles and with various dips along the WNW profiles (Fig. 2b). They crosscut the basement to Late Miocene layers. These faults may have played with a ruling strike-slip mechanism. Their mapping (Fig. 2c) indicates N110–170° faults of several-kilometre length with unknown horizontal offsets. The most important strike-slip structure, with 2-km width, is located at the northern end of the north-west Rhone valley fault zone.

The mapping of NNE normal faults deduced from drill analyses by Mandier [10] is quite similar to the

one deduced from this geophysical analysis, but he had not detected any NW–SE fault.

### 3. Microtectonic analysis

Structural and microtectonic measurements (joints, stylolitic peaks, striated planes, fold axes and tension gashes) were made in 24 recent outcrops (Fig. 1a). Palaeostress tensors were reconstructed using the fault slip inverse methods from Angelier (e.g., [1]).

The joints (Fig. 3a) are mainly trending NNE and northwest, as the fractures deduced from the drainage network (Fig. 1c). Stylolitic peaks are vertical, or horizontal with ENE trend; sub-vertical tension gashes strike ENE, northwest and north–south.

Along the northwestern border (Figs. 1a, 3b), a decametric fold with axis trending NNE, associated with calcite filling and vertical motion along the NNE joints (site 2), could be a drag fold of normal fault. An outcropping pounded zone with angular elements (site 5) may be a fault breccia. At several places, minor northwest reverse to right-lateral strike-slip faults (sites 3, 4), and minor NNE normal faults (sites 2, 3, 4) are reactivated with reverse to left-lateral strike-slip motion (site 4). Thus, the NNE normal faults observed on the seismic profiles are recognised on field with a polyphase tectonic history.

The east of the 'Île Crémieu', near the Jura front (Figs. 1a and 3c), is locally highly fractured (sites 17, 18, 19). The sub-vertical Villebois fault (western side downthrown, BRGM 1:50 000 geological map, Belley sheet) is recognised at site 16 by a stratigraphic contact between the Bajocian limestones and the Lias mudstones. It is observed at site 15 where metric folds with axis trending N110–120° belongs to a more important fold (drag fold of normal fault or tightening related to Alpine collision), and can be deduced from the fallen rocks in a few other sites [13,22].

At the west of this fault, in the Rhone valley, other structures have the same trend. Highly deformed rocks (sites 17, 18) suggest that a fault runs along the D19 road. Three northwest-trending faults, with vertical offsets of 10 m (eastern-side downthrown) were recognised in the Sault–Brénaz quarry (left side of the Rhone River, site 19) (Fig. 3c). Along a major N110–170°, 80°E fault mirror, stylolitic striae with reverse to left-lateral strike-slip sense crosscut major normal 'dip-slip' striae. At few kilometres at the south end-

ing of this fault zone (site 20), two northwest-trending syn-sedimentary normal faults are suspected. Near these faults, the NNE joints show left-lateral strike-slip striae, later reactivated with right-lateral motion. Finally, in several sites [13,17,20], some reverse to left-lateral strike-slip striae were measured along northwest planes.

Thus, the vertical northwest Rhone valley fault zone deduced from seismic analyses is also observed at field. These faults have probably early played as normal faults (Jurassic), inducing a graben with 2-km length, and have been reactivated, at least once with reverse to left-lateral motion.

Inside the 'Île Crémieu' (Figs. 1a and 3d), striated planes exist along some NNE and NW valleys (Fig. 1a). The northwest planes show early normal slip (sites 9, 10, 11, 13) and various strike-slip reactivations (sites 9, 13). Some NNE planes dipping 50–60° have played as normal faults (sites 10, 13), some sub-vertical ones have played as left-lateral then right-lateral strike-slip faults (site 9).

These observations reveal a polyphase tectonic history, with several reactivations of NNE and northwest faults that limit poorly deformed blocs.

### 4. Conclusions

These geophysical and geological studies show that the 'Île Crémieu' has not been spared from the Mesozoic–Cainozoic tectonics. Several successive tectonic phases have reactivated basement faults of several kilometres length. A structural sketch evolution can be proposed (Fig. 4).

The Jurassic deposits have lain upon pre-existing structures, as shown by the Carboniferous basin bordered by NNE faults, and the absence of Triassic deposits in the 'Île Crémieu' (thick in the Bas Dauphiné Basin). A NE–SW extension (Fig. 4a) has generated a graben with northwest normal faults at the present position of the Rhone valley near the Jura front. The NNE faults may have been reactivated as left-lateral normal faults (Fig. 4a), taking into account both their flower structure in the basement on the seismic profiles and the thickening of Jurassic layers to the northwest (Fig. 2b).

At Oligocene times, the NNE normal faults (Fig. 4b) have induced a basin (superposed to the coal basin),

continuing to the north with the Bresse graben. Some of the northwest faults were reactivated.

The Jura formation during the Late Miocene [7,12] is probably responsible for the ENE–WSW compression (Fig. 4d), which reactivated the northwest Rhone faults with a reverse to left-lateral motion and the NNE faults with a reverse to right-lateral motion.

The few observed left-lateral striae on the NNE fault planes and right-lateral striae on the NW fault planes, associated with a north–south compression (Fig. 4c) and dated as occurring prior to the ENE–WSW compression (sites 9, 20, Fig. 2) and later than the NE–SW extension (site 15), could be attributed to the so-called ‘Pyrenean’ compression during the Late Eocene [2].

The tectonic history of the ‘Île Crémieu’ follows the classic Meso-Cainozoic sketch evolution of the West European Platform [2,8]. Its platform structural style, with block motions limited by NNE and northwest deep structures, is contrasting with the fold-and-thrust style of the Jura Mountains that affect the allochthonous cover slipping on the Upper Triassic. The thrusting to the west may have been stopped by both the decrease of thickness of Triassic layers [12] and their shift by the NNE Bresse faults and northwest Rhone faults (Fig. 2).

## 1. Introduction

L’île Crémieu (Fig. 1), située au sud de la Bresse et au sud-ouest du Jura plissé, est un plateau du Jura tabulaire de 300 à 400 m d’altitude, constitué de calcaires d’âge Bajocien à Kimméridgien, inclinés de quelques degrés vers le sud-est. Ce plateau est bordé par des zones probablement faillées, mal connues, car cachées sous d’épais dépôts quaternaires fluviaux et glaciaires. Il est situé dans le prolongement oriental du seuil de Vienne–Chamagnieu, orienté ENE–WSW, correspondant à un horst d’âge Hercynien [9].

Au nord-ouest, l’île Crémieu est séparée du bassin houiller du bas Dauphiné (prolongement oriental du bassin stéphanois) par des failles orientées N020–050°. Ce bassin constitue la terminaison méridionale du fossé bressan [3]. Au sud-est, l’île Crémieu est séparée du bassin molassique du bas Dauphiné par

la Faille de Vernes, orientée N050°. Au sud-ouest, elle est séparée du Seuil de Vienne par des failles N120°. Au nord-est, la zone de failles du Rhône, notamment la Faille de Lagnieu orientée N120°, sépare l’île Crémieu du Plateau de Chaillon–Saint-Sorlin ; cet ensemble appartenant au Jura tabulaire est séparé du Jura plissé par la faille de Villebois, orientée N120–150° (Fig. 1a).

L’ensemble des failles bordières correspond probablement à des accidents crustaux d’âge Hercynien [4,6,11]. Cependant, l’île Crémieu est classiquement considérée comme un plateau épargné par la tectonique cénozoïque [4,5,10]. D’après Enay [6], elle serait structuralement désolidarisée du Jura depuis le Crétacé.

Le réseau de drainage a été extrait des cartes topographiques IGN 1:25 000 de l’île Crémieu et de ses bordures et complété avec les cours d’eau temporaires et les bras morts déduits de la topographie (Fig. 1b). Les anomalies rectilinéaires les plus importantes ont été extraites de ce réseau de drainage (Fig. 1c). Les anomalies attribuables à la construction humaine ont été ôtées. Les anomalies restantes sont orientées NNE à nord-est (lire NNE–WSW à NE–SW) et nord-ouest (rosace sur la Fig. 1c). Certaines des anomalies nord-ouest pourraient être attribuées à l’inclinaison des couches sur l’île Crémieu, quoique la plupart des cours d’eau s’écoulent dans la direction opposée à cette inclinaison (Fig. 1b). Des anomalies orientées nord-est correspondent à la direction de creusement des glaciers quaternaires dans le bas Dauphiné [10]. Les anomalies NNE et une partie des anomalies nord-ouest peuvent être attribuées aux failles.

Sur l’île Crémieu, ces failles, actuellement suivies par les cours d’eau, sont profondément incisées et les bordures lessivées ou érodées, probablement par le passage actuel des eaux, mais aussi par les glaciers du Riss et du Würm, qui ont l’absence de marqueurs microtectoniques dans ces zones de failles érodées. Afin de caractériser l’histoire structurale et tectonique de cette région, il était donc nécessaire d’analyser les structures en profondeur par la géophysique (partie 2), et d’effectuer des études microtectoniques sur des affleurements « frais », en carrières (partie 3).

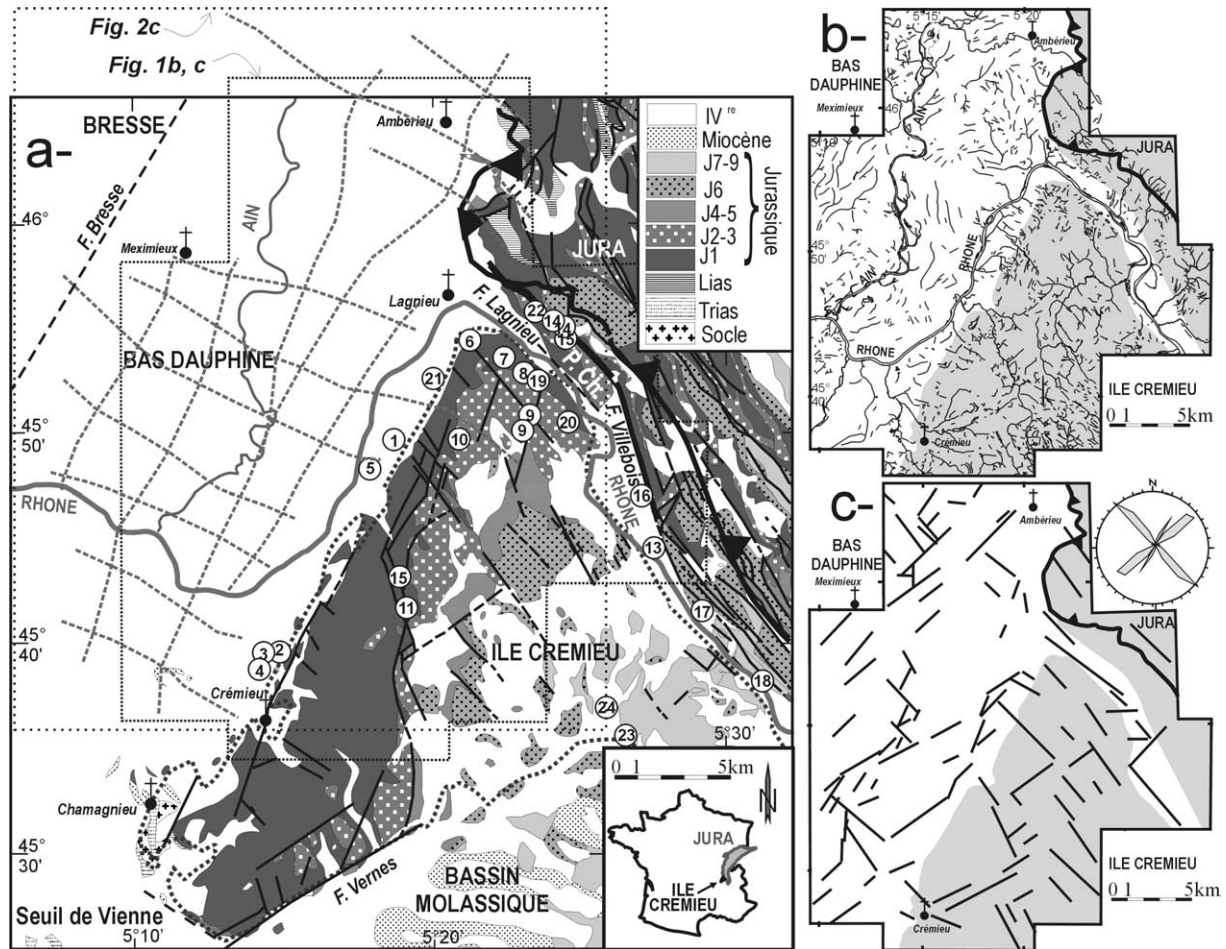


Fig. 1. (a) Contexte géologique régional de l'île Crémieu. Trait pointillé épais : bordure de l'île Crémieu ; traits pleins : failles. Numéros : sites d'analyse microtectonique. Traits gris : lignes sismiques interprétées. P.Ch. : Plateau de Chaillon. (b) Réseau de drainage (voir texte). Position sur Fig. 1a. L'île Crémieu et le Jura sont à l'arrière-plan en gris. (c) Anomalies rectilinéaires du réseau de drainage, avec rosace de fréquence des azimuts.

Fig. 1. (a) Regional geological setting of the 'Île Crémieu'. Thick dotted line: edges of the 'Île Crémieu'; full lines: faults. Numbers: sites of tectonic analyses. Grey lines: interpreted seismic lines. P. Ch.: Chaillon Plateau. (b) Drainage network (see text). Position in Fig. 1a. 'Île Crémieu' and Jura as grey background. (c) Rectilinear anomalies of the drainage network, with frequency rose diagram of azimuths.

## 2. Structures profondes déduites des profils sismiques

Douze profils sismiques orientés NNE et WNW, situés au nord-ouest de l'île Crémieu dans le bas Dauphiné (respectivement, parallèles et perpendiculaires à la bordure du plateau) ont été analysés entre les villes d'Ambérieu et Crémieu (Figs. 1a et 2c). Dans l'ensemble, les réflecteurs superficiels (Miocène) comme

profonds (socle cristallin) sont aisément suivis. Dix sondages profonds (Fig. 2c) se terminant dans l'Oligocène, dans le houiller ou le socle cristallin ont permis de caler les réflecteurs des profils sismiques. Un profil synthétique réalisé sur le sondage de Cormoz 1 a permis d'établir une relation approximative entre les échelles en temps double sur les profils (Fig. 2a et b) et en profondeur dans les puits. Enfin, ont été utilisées à des fins de calage en profondeur, les cartes sché-

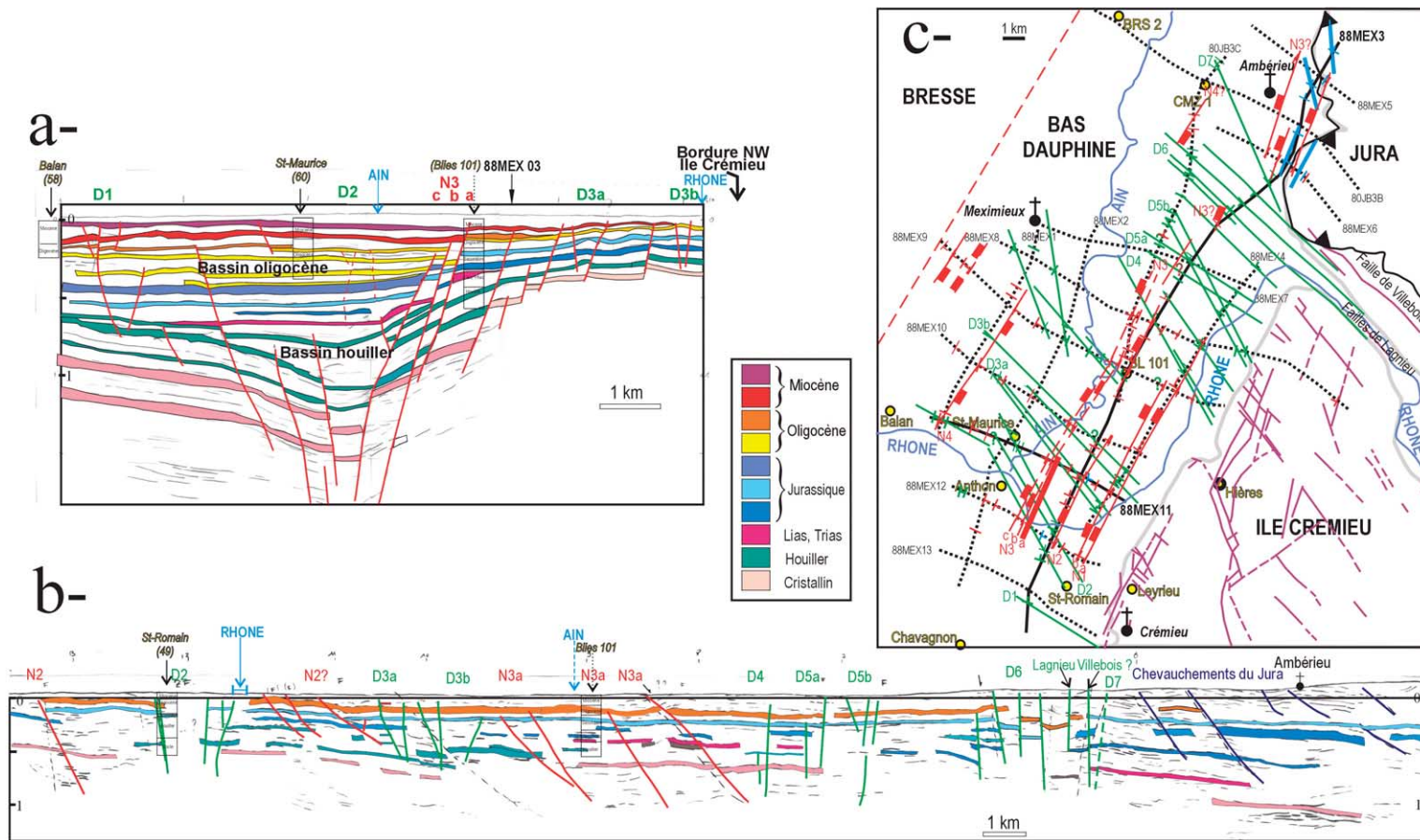


Fig. 2. (a) Exemple de profil sismique migré NNE (88MEX11). (b) Exemple de profil sismique migré WNW (88MEX03). Échelles verticales en temps double. (c) Position des profils sismiques et interprétation en carte des failles recoupées. Cercles jaunes : forages. Traits noirs : lignes sismiques (exemples : Fig. 2a et b en trait plein). Les « T » indiquent les failles recoupées sur ces profils. Autres traits : failles (rouges : normales, bleus : inverses, verts : présumées décrochantes). L'épaisseur des traits croît avec le rejet observé.

Fig. 2. (a) One NNE-trending migrated seismic profile (88MEX11). (b) One WNW-trending migrated seismic profile (88MEX03). Double-time vertical scale. (c) Position of the seismic profiles and map interpretation of the crosscut faults. Yellow circles: drills. Black lines: seismic lines (examples of Fig. 2b and c in full line). Other lines: faults (red: normal, blue: reverse, green: strike-slip faults). The thickness of the lines increases with the observed offset.

matiques en courbes de niveau du substratum anté-hercynien (contact socle cristallin/houiller) et du toit du houiller, réalisées par le BRGM [5].

Deux types de failles sont observés sur les profils : des failles modérément inclinées, présentant un rejet vertical normal localement syn-sédimentaire, et des failles en réseau, sub-verticales et à rejet ténu.

Les failles présentant un rejet vertical normal sont recoupées probablement perpendiculairement par les profils orientés WNW, car fortement inclinées (Fig. 2a), et plus obliquement par les profils orientés NNE, car d'inclinaison faible (Fig. 2b). En carte, les accidents répertoriés sur chaque profil révèlent des orientations N020–030° (Fig. 2c). En profondeur, ces failles normales deviennent sub-verticales et se regroupent dans le socle cristallin en une seule structure majeure. Dans la couverture, elles forment un hémigraben effondré vers le nord-ouest (Fig. 2a). Les deux failles normales les plus importantes (en terme de rejet) vont du socle cristallin au Miocène supérieur, et décalent le Jurassique d'environ 350 m. L'épaississement systématique des dépôts du Houiller (Carbonifère) et de l'Oligocène du côté affaissé des failles traduit deux périodes d'activité syn-sédimentaire de ces failles. L'épaississement des couches d'âge Jurassique vers le nord-ouest, comme en témoignent les forages (Cormoz 1, Blies 101, Hières, Leyrieu), atteste un effondrement vers le nord-ouest au Jurassique supérieur ou terminal. Les bassins houiller et oligocène ainsi créés atteignent respectivement environ 600 et 300 m d'épaisseur. Le bassin houiller est plus profond au centre des profils WNW, presque en dessous du cours de l'Ain ; l'épaisseur du bassin oligocène augmente vers la plaine lyonnaise et la Bresse [3]. Des failles normales sont également détectées à l'intérieur de l'île Crémieu, mais aucune faille majeure ne constitue l'escarpement de la bordure nord-ouest, qui pourrait être due au retrait de la falaise induite par le rejet des deux failles majeures.

À des positions variables selon les profils, on met également en évidence des zones bruitées bordées par des failles sub-verticales, à rejet ténu. Cet agencement apparenté à des structures en fleur (Fig. 2b) permet de supposer qu'il s'agit de failles à composante décrochante dominante. Leur agencement dans l'espace révèle des accidents pluri-kilométriques supposés décrochants dont le rejet horizontal n'est pas quantifiable : les accidents répertoriés sur chaque profil se

connectent selon des directions N110–170° (Fig. 3b). Ces orientations sont compatibles avec l'inclinaison apparente de ces failles, plus importante sur les profils NNE que sur les profils WNW. Les failles affectent des couches allant du Jurassique au Miocène supérieur. Les rejets, de quelques dizaines de mètres, sont parfois normaux, plus souvent inverses. Une de ces structures, nettement plus importante que les précédentes, est située dans le prolongement de la faille de Lagnieu, orientée nord-ouest ; la largeur de la zone affectée (effondrée) par ces failles est d'environ 2 km.

La cartographie des failles normales NNE déduite de cette analyse géophysique est assez similaire à celle qu'avait déduite Mandier [10] de l'analyse des forages. En revanche, il n'avait pas mis en évidence les failles nord-ouest, probablement décrochantes.

### 3. Analyse microtectonique

Vingt-quatre affleurements récents ont fait l'objet d'observations et de mesures structurales et microtectoniques, telles que joints, pics stylolitiques, plans striés, axes de plis et fentes de tension (Figs. 1a et 3). L'inversion des jeux de failles par les méthodes d'Angelier (par exemple, [1]) a permis de reconstituer les tenseurs des contraintes, lorsque les données étaient en quantité suffisante.

Les joints (Fig. 3a) présentent deux directions largement prépondérantes, nord-sud à nord-est et nord-ouest, proches de celles des linéaments rectilinéaires sur le réseau de drainage (Fig. 1c).

Dans l'île Crémieu comme sur ses bordures, on observe des fentes de tension sub-verticales orientées nord-sud et ENE, des pics stylolitiques verticaux, et des pics stylolitiques orientés ENE. Une large moitié des pics verticaux a une forme en chevrons, typique de la compaction.

Le long de la bordure nord-ouest (Figs. 1a et 3b), un pli décimétrique d'axe NNE, auquel sont associés des mouvements verticaux et des remplissages de calcite le long des joints NNE (site 2, Fig. 3b), pourrait être un pli d'entraînement de faille normale. Une zone bréchique (quelques mètres) à éléments anguleux (site 5) peut être interprétée comme une brèche de faille. En divers points, on observe des failles dextres inverses nord-ouest (sites 3, 4), et des failles normales NNE

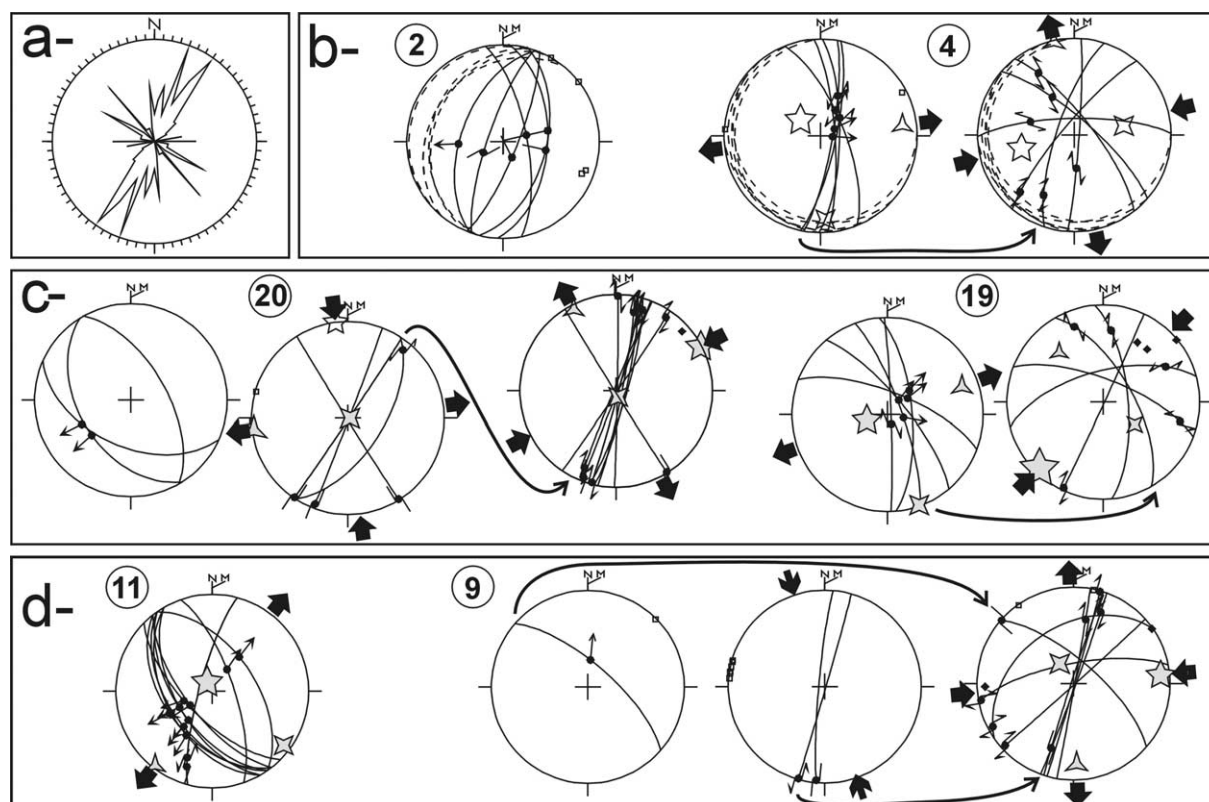


Fig. 3. (a) Rosace de fréquence des joints mesurés. (b–d) Exemples de diagrammes de jeux de failles ayant permis de calculer, par les méthodes inverses d'Angelier [1], les directions d'extension (flèches divergentes :  $\sigma_3$ ) et de compression (flèches convergentes :  $\sigma_1$ ), pour la bordure nord-ouest (b), la bordure est (c) et le centre (d) de l'île Crémieu. Les longues flèches indiquent qu'une stria est antérieure à une autre. Diagrammes de Schmidt, hémisphère inférieur. M, pôle magnétique. N, pôle géographique. Carré, pôles des fentes de tension. Losanges, pics stylolitiques. Courbes pointillées, plans stratigraphiques ( $S_0$ ). Courbes fines, plans de faille. Les points avec flèches doubles (sénestres ou dextres) ou flèches simples (centrifuges-normales ; centripètes inverses) indiquent les stries. Étoiles grises, axes du tenseur des contraintes (cinq branches :  $\sigma_1$ , quatre branches :  $\sigma_2$ , trois branches :  $\sigma_3$ ).

Fig. 3. (a) Frequency rose diagram of measured joints. (c–e) Examples of fault slip diagrams allowing to calculate, by inversion [1], the distensions (divergent arrows:  $\sigma_3$ ) and compressions (convergent arrows:  $\sigma_1$ ), along the northwestern border (b), the eastern border (c) of the 'Île Crémieu', and inside it (d). Long arrows indicate that one stria occurred prior another. Schmidt diagrams, lower hemisphere. Squares, poles to tension gashes. Lozenges, stylolitic peak. Dashed lines, bedding planes ( $S_0$ ). Thin curves, fault planes. Dots with double arrows (left- or right-lateral) or simple ones (centrifugal-normal; centripetal-reverse), slickenside lineation. Grey stars, stress axes (five points:  $\sigma_1$ , four points:  $\sigma_2$ , three points:  $\sigma_3$ ).

(sites 2, 3, 4) réactivées en sénestres inverses (site 4, Fig. 3b).

Ces observations sont cohérentes avec la présence des failles normales NNE observées sur les profils sismiques. Ces failles ont connu une histoire tectonique polyphasée.

Dans la dépression suivie par le Rhône à l'est de l'île Crémieu (Figs. 1a et 3c), la fracturation est localement intense (sites 17, 18, 19). La faille sub-v verticale de Villebois, effondrée du côté sud-ouest (carte géo-

logique au 1:50 000 de la France, BRGM, feuille de Belley), est reconnue au site 16 par un contact cartographique entre les calcaires durs du Bathonien (« Choin ») et les marnes tendres du Lias. Elle est approchée au site 15, où des plis métriques d'axe N110–120° illustrent des dysharmonies dans un pli plus important (crochon de la faille d'effondrement, ou serrage alpin le long de cette faille), et peut être déduite de l'emplacement des éboulis en d'autres points (sites 13, 22).



À l'ouest de cette faille, d'autres structures, de même orientation, ont été observées. Des roches fortement tectonisées suggèrent le passage d'une faille longeant la route D 19 aux sites 17 et 18. Trois failles nord-ouest, présentant chacune un décalage vertical décimétrique (effondrement côté est), ont été reconnues dans la carrière de Sault-Brénaz (rive gauche du Rhône, site 19, Fig. 3c). Sur le miroir d'une de ces failles, orienté N110–170°, 80°E, des stries normales *dip-slip* (cannelures métriques) sont recoupées par des stries stylolitiques localement inverses dextres sur les parties orientées N150–170° et plus fréquemment inverses sénestres sur les parties N110–140° (Fig. 3c). À quelques kilomètres au sud, dans le prolongement de cette zone de faille (site 20, Fig. 3c), une faille normale N135°, 50°W, a probablement joué au Jurassique (stries et cannelures de type hydroplastique), et une faille N150° présente un décalage et un crochon de faille normale (3 m), mais uniquement des stries décrochantes dextres et sénestres (jeu normal précoce). Autour de cette faille, les joints NNE présentent des stries sénestres réactivées en dextres.

Enfin, dans plusieurs sites (13, 17, 20), des stries inverses sénestres affectent des plans nord-ouest.

Ainsi, l'existence d'une zone de failles verticales nord-ouest observée en sismique-réflexion est confirmée par les observations de terrain. Ces failles auraient d'abord eu un jeu normal précoce (Jurassique, site 20), responsable de la formation d'un graben large de 2 km (Fig. 2b). Elles auraient été réactivées au moins une

fois, en failles inverses à dominante sénestre (sites 13, 17, 19, 20).

À l'intérieur de l'île Crémieu (Figs. 1a et 3d), des plans striés de taille métrique à décimétrique sont situés aux abords de certains des linéaments orientés NNE et nord-ouest. Des plans nord-ouest ont joué en faille normale (sites 9, 10, 11 et 13, Fig. 3d), avant l'induration totale des sédiments (pics stylolitiques verticaux, stries hydroplastiques), puis en failles sénestres (site 9, Fig. 3d), dextres (site 13) et/ou normales dextres (site 13). Des plans NNE inclinés de 50–60° ont joué en faille normale (sites 10 et 13), d'autres sub-verticaux ont eu un jeu sénestre, puis dextre (site 9, Fig. 3d). Ces observations révèlent donc une histoire tectonique polyphasée, caractérisée par des réactivations de failles NNE et nord-ouest limitant des blocs peu déformés.

#### 4. Conclusions

Ces analyses géophysiques et géologiques montrent que l'île Crémieu n'a pas été épargnée par la tectonique méso-cénozoïque. Plusieurs épisodes tectoniques successifs ont réactivé des failles de socle pluri-kilométriques. Une histoire structurale simplifiée peut être proposée (Fig. 4).

Au Jurassique, les couches se seraient déposées sur des structures préexistantes, le bassin houiller étant bordé par des failles NNE et le Trias présentant d'im-

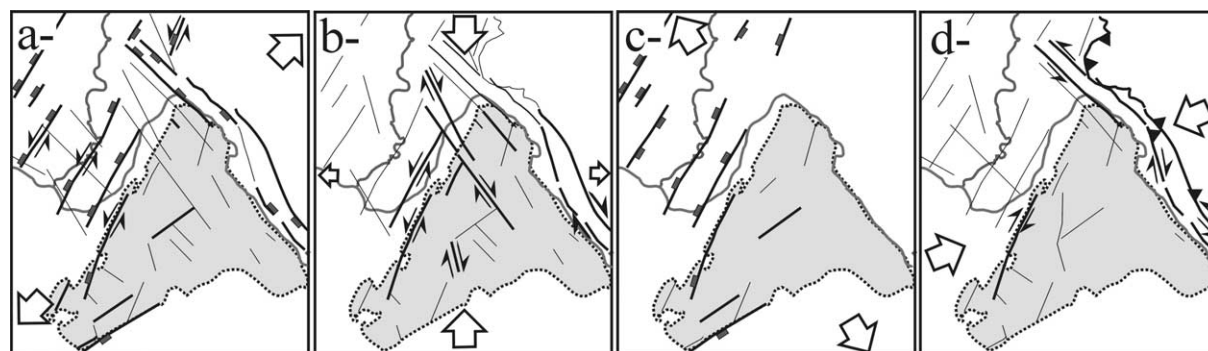


Fig. 4. Évolution structurale schématique de l'île Crémieu au Méso-Cénozoïque. (a) Extension NE–SW jurassique. (b) Compression nord–sud présumée pyrénéenne. (c) Extension NW–SE à l'Oligocène. (d) Compression ENE–WSW à la fin du Miocène. Flèches (décrochements) et rectangles (jeu normal) en trait gras : mécanismes des failles activées.

Fig. 4. Preliminary structural evolution of the 'Île Crémieu' during the Meso-Cainozoic. (a) Jurassic NE–SW extension. (b) Presumed Pyrenean north–south compression. (c) NW–SE extension during the Oligocene. (d) ENE–WSW compression during the Late Miocene. Arrows (strike-slip motion) and rectangles (normal motion) in bold: mechanism of the activated faults.

portantes variations d'épaisseur (absent sur l'île Crémieu d'après les forages de Hières et Leyrieu, épais dans le bassin du bas Dauphiné, d'après les forages de Cormoz et Blies 101). Une extension NE–SW (Fig. 4a) serait responsable des failles normales nord-ouest formant un graben à l'emplacement de l'actuelle limite avec le Jura. Il est possible que les failles NNE aient alors joué en failles normales sénestres, ce qui expliquerait à la fois l'épaississement du Jurassique en allant vers le nord-ouest, et la structure en fleur des failles NW–SE au niveau du socle sur les profils sismiques.

À l'Oligocène, les failles NNE ont eu un jeu normal attesté par les interprétations des lignes sismiques (Fig. 2a), engendrant un bassin superposé au bassin houiller (Fig. 4b), et se poursuivant plus au nord par le fossé bressan. Certaines failles nord-ouest ont été réactivées.

C'est probablement la formation du Jura (paroxysme au Miocène terminal [7,12]) qui est responsable de la compression ENE–WSW (Fig. 4d), réactivant les failles nord-ouest de la vallée du Rhône en mouvement inverse sénestre et les failles NNE en inverse dextre.

Les rares jeux sénestres sur les failles NNE et dextres sur les failles nord-ouest, compatibles avec une compression nord–sud (Fig. 4c), sont antérieurs à la compression ENE–WSW (sites 9 et 20, Fig. 3) et postérieurs à l'extension NE–SW (site 15). Ils pourraient être liés à la phase de compression dite « pyrénéenne » (Crétacé–Oligocène, paroxysme à l'Éocène terminal [2]).

L'histoire tectonique de l'île Crémieu suit donc le schéma classique d'évolution méso-cénozoïque de la plate-forme ouest-européenne [2,8]. Sa déformation de plate-forme, avec des mouvements entre blocs parallélogrammes limités par des structures profondes NNE et nord-ouest, contraste avec le style structural de plis et chevauchements du Jura, affectant une couverture décollée sur le Trias supérieur, allochtone, décollée du socle (du moins au Miocène). L'arrêt du décollement du Jura vers l'ouest peu être lié à la diminution de l'épaisseur du Trias [12]. De même que le décollement a été bloqué par les failles NNE bordières du fossé bressan, car elles décalent la semelle

triasique [12], il a pu être stoppé par les failles de socle nord-ouest du Rhône bordant l'est de l'île Crémieu (Fig. 2).

## Remerciements

Les auteurs remercient A. Buisson (LUNDIN) pour les discussions qu'ils ont eues avec lui et la mise à disposition des lignes sismiques.

## Références

- [1] J. Angelier, Tectonic analysis of fault slip data sets, *J. Geophys. Res.* 89 (B7) (1984) 5835–5848.
- [2] F. Bergerat, Stress fields in the European platform at the time of Africa–Eurasia collision, *Tectonics* 6 (1987) 99–132.
- [3] C. Cavelier, et al., in: S. Debrand-Passard, S. Courbouloix (Eds.), Synthèse géologique du Sud-Est de la France, in: *Mém. BRGM*, vol. 125, 1984, pp. 389–468.
- [4] L. David, R. Enay, C. Mangold, Carte géologique de la France 1:50 000, Montluel, BRGM éd., Orléans, France, 1978.
- [5] S. Elmi, R. Enay, C. Mangold, N. Mongereau, Carte géologique de la France 1:50 000 Bourgoin-Jallieu, BRGM éd., Orléans, 1986.
- [6] R. Enay, L'île Crémieu : évolution morphologique et structurale, *Soc. Linnéenne Lyon* 8 (1980) 483–505.
- [7] C. Homberg, F. Bergerat, Y. Philippe, O. Lacombe, J. Angelier, Structural inheritance and Cenozoic stress fields in the Jura fold-and-thrust belt (France), *Tectonophysics* 357 (2002) 137–158.
- [8] X. Le Pichon, F. Bergerat, M.-J. Roulet, Plate kinematics and tectonics leading to the Alpine belt formation; a new analysis, *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.* 218 (1988) 111–131.
- [9] J. Malavieille, P. Guihot, S. Costa, J.-M. Lardeau, V. Gardien, Collapse of the thickened Variscan crust in the French Massif Central: Mont Pillat extensional shear zone and Saint-Étienne Late Carboniferous basin, *Tectonophysics* 177 (1990) 139–149.
- [10] P. Mandier, Le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire. Essai de synthèse paléogéographique, thèse, Lyon II, 1984, tome 1 : 654 p. ; tome 2 : 231 p. ; tome 3 : 5 pl., 1 tab., 11 cartes.
- [11] O. Maridet, Proposition of dating a Miocene Alpine tectonic event using mammal biochronology: example of the four-karst filling, *Geodin. Acta* 15 (3) (2002) 179–184.
- [12] Y. Philippe, Transfer zone in the Southern Jura Trust belt (Eastern France): geometry, development, and comparison with analogue modeling experiments, in: A. Mascle (Ed.), *Hydrocarbon and Petroleum Geology of France*, Spec. Pub. Eur. Assoc. Pet. Geosci., Springer-Verlag, Berlin, 1994, pp. 327–346.