



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



C. R. Geoscience 336 (2004) 67–74



## Tectonique

# Mise en évidence d'un décrochement ductile senestre dans l'île de Porquerolles (Var, France) et ses implications sur la tectonique du massif des Maures au Paléozoïque supérieur

Jean-Philippe Bellot \*

Cerege–Europôle de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

Reçu le 25 février 2003 ; accepté le 29 septembre 2003

Présenté par Jean Aubouin

---

### Résumé

Un nouveau levé cartographique détaillé de l'île de Porquerolles montre que cet affleurement de la chaîne hercynienne est constitué de deux unités mises en contact par un décrochement d'orientation sub-méridienne : une unité occidentale à alternances schisto-gréseuses et une unité orientale essentiellement schisteuse. Le décrochement présente un mouvement ductile senestre, et est localement repris par des failles normales ductiles à fragiles. Il oblitère un contact de nappe mis en évidence par l'intensité des déformations syn-schisteuses ainsi que l'abondance des *rods* de quartz. Le pli conique est interprété comme un crochon de la foliation, associé au jeu senestre du décrochement. Plissement et décrochement témoignent de la tectonique transpressive post-nappe, reconnue dans les parties centrale et orientale du massif des Maures, et rapportée à la collision varisque du Carbonifère moyen. **Pour citer cet article : J.-P. Bellot, C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Evidence for a ductile strike-slip fault in the Porquerolles Island (Var, France) and its tectonic implications on the Upper Palaeozoic tectonics of the Variscan Maures Massif.** A new geological map of the Palaeozoic units from the Porquerolles Island provides evidence for two main units joined along a north–south-trending shear zone: a western unit of schist, sandstone and microconglomerates, an eastern unit of schist including calcareous rocks, metabasite and various types of mineralisations. The shear zone has experienced a main strike-slip, sinistral movement in a ductile regime, and a late westward normal movement from ductile to brittle regimes. It crosscuts an early thrust fault, marked by penetrative syn-metamorphic deformation and the abundance of quartz rods. According to geometrical relationships, the regional conic fold is interpreted as a large-scale dragging of foliation related to strike-slip faulting. Combined folding and wrenching point out a main transpressive tectonics related to the continental collision dated Middle Visean in the central and eastern parts of the Variscan Maures massif. **To cite this article: J.-P. Bellot, C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

**Mots-clés :** Provence ; île de Porquerolles ; chaîne Varisque ; décrochement ; pli ; Maures ; France

**Keywords:** Provencal area; Porquerolles island; Variscan belt; strike-slip fault; fold; Maures; France

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [jpbellot@wanadoo.fr](mailto:jpbellot@wanadoo.fr) (J.-P. Bellot).

## Abridged English version

### 1. Introduction

Detailed geological maps are first-order documents prerequisite to our understanding about regional geology. Since ten years, new geological mapping have been made in the Variscan Maures massif in order to better understand its tectonic history [8]. Accordingly, we have mapped in depth the Porquerolles Island, a geological area corresponding to a southward prolongation of the western Maures massif [5,11,16,19]. The presented map (Fig. 1) derived from a fieldwork on 520 sites, the report of individual data on a GIS software, and their interpretation by aerial photographs. The analysis of this new map, associated with a structural analysis on the field, allows us (1) to precise the lithostratigraphy of epizonal units from the Variscan basement of southeastern France, previously described in northern part of the massif [9,18], (2) to describe a main strike-slip fault in the Porquerolles Island, and (3) to precise the tectonic evolution of the Maures Massif.

### 2. Lithostratigraphy

Palaeozoic formations make up the main part of the study area. They are essentially metasedimentary, terrigenous rocks of low metamorphic grade, overlain by Quaternary tuffs along the beaches and by Quaternary conglomerates in plain [16,17]. Two main units, separated by a north–south-trending shear zone, are recognized and can be related to the Fenouillet and Maurettes groups previously defined in the Maures massif [11].

The *Fenouillet Unit* occurs in the western and central island. It is made of layered schist-felsic sandstone, minor quartzite and microconglomeratic sandstone, which preserve sedimentary features including graded-bedding (Fig. 3 a et b), slumps (Fig. 3c) and load-casts (Fig. 3d).

The *Maurettes Unit* occurs in the eastern island and constituted of seven members described eastward, as follows.

Banded schist and microconglomeratic sandstone occur in regular layers. They include minor layered calcareous rocks (down to 15 m thick), and eastward, a

meter-thick level of meta-pelite, with quartz rods and centimetre-scale biotite and iron sulphides.

Black quartzite and schist occur along the western boundary of the Mèdes quartzite. They include numerous quartz veins and underline a high strain zone in a ductile regime.

The Mèdes quartzite (100 m thick) included several meter-thick levels of graphitic black schist [16], in which graptolites similar to the Hyères ones have been recognised [12,13,20]. This observation allows us to relate the Mèdes quartzite to the Lower Silurian ( $\sim 430$  Ma, [15]).

Banded schists display numerous white micas and, next to the Mèdes quartzite, have numerous quartz veins refolded by a post-metamorphic tectonic phase.

Other schist included meter-thick levels of quartzite and grey sandstone.

Quartz-bearing schist included metabasite with  $S > L$  fabric and 3- to 6-mm-long, acicular amphibole, a 10-m-thick level of calc-schist, numerous quartz-siderite veins and sulphur mineralisations incorporated in quartz veins [17].

Monotonous bottle green schist, that includes numerous quartz veins, occurs in the easternmost island and in all parts of the Grand Sarranier and Petit Sarranier islands.

### 3. Structures

#### 3.1. Phases 1 & 2

Metamorphic rocks of the Porquerolles Island show two superimposed foliations [1], low dipping northward to northwestward (Fig. 2), and carrying a composite lineation that variously trends. The trace of the regional  $S_{1-2}$  foliation, which also corresponds to the trace of lithological boundaries, indicates that the island did not correspond to the conic folding of one unit [6,7]. Geometrical relationships argue for a main north–south-trending fault separating the two units. According to fieldwork and structural analyses, a shear zone is identified along this fault zone and described as follow.

#### 3.2. Phase 3

A 500-m-thick, ductile strain deforms the western Maurettes Unit and is well expressed in the black schist located next to the Mèdes quartzite (Fig. 4a). Deformation is partitioning into folding and shearing

in the core and the rim of the shear zone, respectively. Post-metamorphic folds and *boudins* deform the regional  $S_{1-2}$  foliation; both have horizontal axes that trend north–south. Mylonites show a vertical to steep foliation that trends north–south and a horizontal lineation (Fig. 4b). In section parallel to the  $XZ$  plane of the finite strain ellipsoid, shear bands and sigmoid-shaped quartz argue for a sinistral movement along the strike-slip shear zone (Fig. 4c).

### 3.3. Phase 4

Westward, normal faulting from ductile to brittle regimes is superimposed on the main strike-slip shearing. Ductile normal faults deform sericite-bearing schist, having high-dipping foliation and dip-line lineation. Brittle normal faults include breccia and gouges, and striae fault planes (Fig. 4d). Normal faulting testifies to the progressive exhumation of the shear zone during the transition from ductile to brittle regimes.

## 4. Discussion–conclusion

The Porquerolles Island does not correspond to the conic folding of one unit, but results from the juxtaposition of two units along a left-lateral strike-slip fault, as suggested by previous field work in the western Maures [9]. This strike-slip fault is related to the continental collision dated Middle Visean ( $\sim 340$ – $330$  Ma) in the central [2,4] and eastern [21] Maures massif. The reworking of the shear zone by normal faulting is related to the syn-orogenic extensional tectonics, observed [3] and dated Namurian ( $\sim 320$  Ma, [14]) in the central Maures, with a finite-strain field similar to the Massif Central's one [10]. Geometrical relationships suggest to interpret the conic fold as a large-scale dragging of the foliation related to strike-slip shearing. Coeval folding and strike-slip shearing argue for a main collision-related wrench tectonic in this Variscan range.

## 1. Introduction

La carte géologique reste un document fondamental pour progresser dans la connaissance de l'histoire géologique régionale. Le massif des Maures, fragment varisque peu connu, fait depuis plusieurs années l'objet de levés cartographiques détaillés qui devraient per-

mettre d'appréhender son histoire géologique sous un angle nouveau [8]. C'est dans ce but qu'un nouveau levé de l'île de Porquerolles, équivalent insulaire des Maures occidentales [5,11,16,19], a été réalisé (Figs. 1 et 2). Le travail comprend une étude de terrain sur 520 sites d'observations, le report des données ponctuelles sur un SIG de type Map Info et leur interprétation à l'appui de photos aériennes ainsi que de l'étude détaillée des côtes méridionales de l'île par bateau. L'analyse de cette carte, couplée à une analyse structurale de terrain, permet (1) de préciser la lithostratigraphie des unités épizonales des Maures, décrites jusqu'à présent dans les chaînes de la Sauvette [18] et de la Verne [9], (2) de décrire un décrochement majeur séparant ces deux unités épizonales, et (3) de préciser l'évolution tectonique des Maures au Paléozoïque supérieur.

## 2. Lithologie

L'île de Porquerolles est constituée par un socle métamorphique d'âge probable Protérozoïque supérieur à Paléozoïque inférieur, recouvert en discordance par des sédiments détritiques d'âge Quaternaire le long des plages de la côte septentrionale et dans les plaines. Le socle est constitué de deux unités correspondant aux groupes du Fenouillet (unité du Fenouillet) et des Maurettes (unité des Maurettes) définis par Gueirard [11] sur le continent.

### 2.1. L'unité du Fenouillet

Les deux tiers méridionaux de l'île sont constitués de schistes et de quartzites en alternance, qui incluent de nombreux niveaux de grès microconglomératiques, dont les éléments grossiers atteignent plusieurs centimètres. Ces grès présentent des figures sédimentaires : granoclasements, stratifications obliques (Fig. 3 a et b), *slumps* (Fig. 3c) et *load-coasts* (Fig. 3d). Ces figures indiquent une polarité normale ou inverse selon les secteurs, sans qu'aucune logique ne se dégage à l'échelle de l'île.

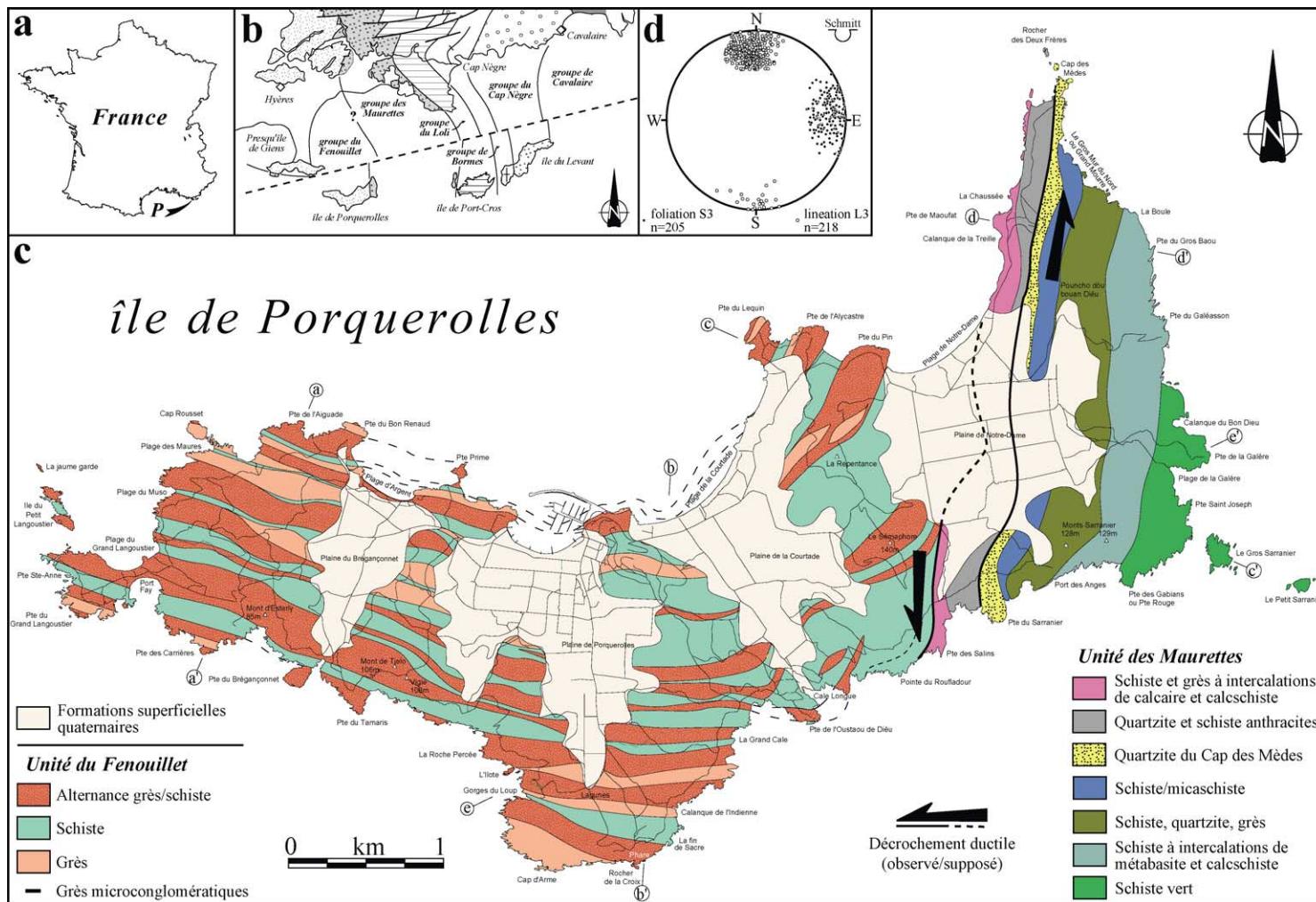


Fig. 1. Carte géologique de l'île de Porquerolles. (a–b) Situation générale de la zone d'étude. (c) Position des coupes de la Fig. 2. (d) Données sur le décrochement ductile.

Fig. 1. Geological map of the Porquerolles Island. (a–b) General location. (c) Location of cross-sections of Fig. 2. (d) Data available on the strike-slip shear zone.

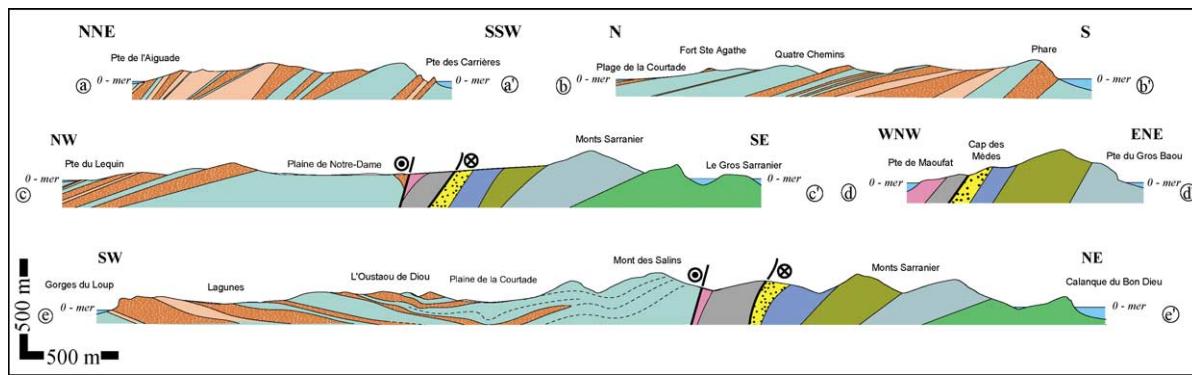


Fig. 2. Coups géologiques à travers l'île de Porquerolles (localisation sur la Fig. 1).

Fig. 2. Geological cross-sections throughout the Porquerolles Island (see Fig. 1 for location).

## 2.2. *L'unité des Maurettes*

Sept formations constituent l'unité des Maurettes, qui forme le tiers oriental de l'île.

Schistes rubanés et grès microconglomératiques affleurent en alternances rythmiques. À la pointe des Salins, quelques dizaines de mètres de calcaire-calcischiste affleurent. L'abondance du quartz dans le calcaire indique un milieu proximal de dépôt. Plus à l'est, des schistes tachetés très sériciteux, à biotite et/ou sulfures de fer, incluent des niveaux de métapélites associées à des exsudats de quartz.

Des alternances de schistes noirs et de quartzites anthracites jalonnent la bordure occidentale du quartzite des Mèdes. Les quartzites incluent de nombreux exsudats de quartz et soulignent une zone d'intense déformation ductile.

Le quartzite du cap des Mèdes est constitué d'une seule barre (~100 m d'épaisseur). Il inclut plusieurs niveaux de schistes noirs ampéliqueux à graptolites [16] identiques à ceux de la chapelle d'Hyères [12, 13, 20], permettant ainsi de rapporter ces schistes noirs au Silurien inférieur (Llandovérien supérieur-Tarannonnien inférieur), soit autour de 430 Ma selon l'échelle de Odin et Odin [15].

Les schistes/micaschistes rubanés, riches en séricite, soulignent le contact basal du quartzite des Mèdes et incluent de nombreux exsudats de quartz.

Des intercalations métriques de quartzites et de grès alternent avec des schistes bicolores.

Des schistes monotones présentent des intercalations de métabasites et de calcischistes [17]. Locale-

ment, de la sidérite ou des minéralisations à sulfures abonde(nt) dans des exsudats de quartz associés à une foliation précoce.

Les schistes de couleur vert bouteille, à nombreux exsudats de quartz, forment l'extrémité orientale de l'île. Sur le Grand Sarranier, ils sont rubanés et riches en exsudats de quartz. Sur le Petit Sarranier, ils incluent de rares bancs décimétriques de grès.

## 3. Structures

### 3.1. *Phases 1 et 2*

Les formations métamorphiques de Porquerolles présentent souvent deux foliations superposées, à faible pendage nord-ouest à nord (Fig. 2). De fait, la linéation observée est de nature composite et présente une orientation variable. Deux générations d'exsudats de quartz, replissés par une phase post-schisteuse, confirment la déformation des unités par deux tectoniques isoclinales antérieures à une tectonique plicative tardive [1]. Les trajectoires de la foliation régionale  $S_{1-2}$ , qui correspondent aux limites lithologiques, montrent que les formations les plus méridionales de l'île ne se poursuivent pas dans sa partie orientale, contrairement à ce que prévoit un modèle de simple pli conique [6, 7]. Ainsi, les relations géométriques imposent la localisation d'un contact anormal de direction sub-méridienne entre les deux unités. Sur le terrain, une zone de cisaillement polyphasée est identifiée le long de ce contact et décrite comme suit.

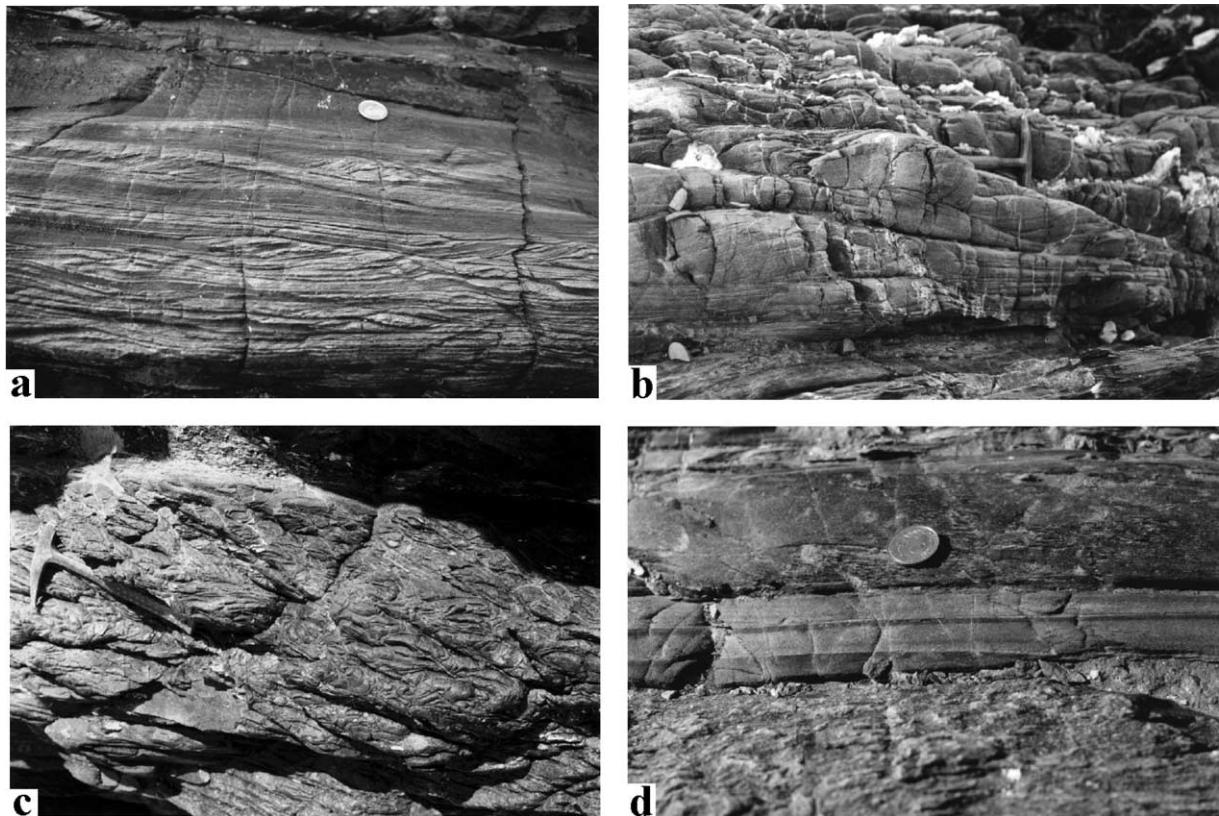


Fig. 3. Figures sédimentaires dans les grès microglomératiques. (a, b) Stratifications obliques. (c) Slumps. (d) Load-coasts.

Fig. 3. Sedimentary features in sandstone lenses. (a, b) Graded bedding. (c) Slumps. (d) Load-coasts.

### 3.2. Phase 3

Une importante zone de déformation ductile, à pendage vertical ou fort vers l'ouest, se localise sur la bordure occidentale de l'unité des Maurettes ( $\sim 500$  m de large), en particulier dans les schistes noirs de la base du quartzite des Mèdes (Fig. 4a). Au cœur de la zone de déformation, la foliation régionale  $S_{1-2}$  est replissée par des plis serrés asymétriques à axes horizontaux. Ces plis sont eux-mêmes déformés par des boudins à axes horizontaux. Cette succession de structures témoigne d'une déformation progressive au cours du cisaillement. En bordure de la zone de déformation, des mylonites ductiles portent une linéation horizontale et orientée nord-sud, marquée par l'étirement des conglomérats (Fig. 4b). Les variations de la taille du grain et de l'allongement des galets d'un banc à l'autre, mais aussi dans un même banc, témoignent

de gradients de déformation. L'étude cinématique, réalisée dans les sections parallèles au plan  $XZ$  de l'ellipsoïde de la déformation finie, révèle des bandes de cisaillements ainsi que des sigmoïdes de quartz associées à un cisaillement senestre ou haut vers le sud (Fig. 4c).

### 3.3. Phase 4

Une déformation ductile à fragile se superpose à la zone de décrochement ductile à la base du quartzite des Mèdes. Cette déformation est marquée par : (1) des failles normales ductiles, associées à des schistes très sériceux, dont la foliation pend fortement vers l'ouest et la linéation plonge dans la plus forte pente ; (2) des failles normales fragiles, jalonnées de brèches et de faciès intensément lessivés (Fig. 4d). Ces failles normales témoignent de l'exhumation progressive de

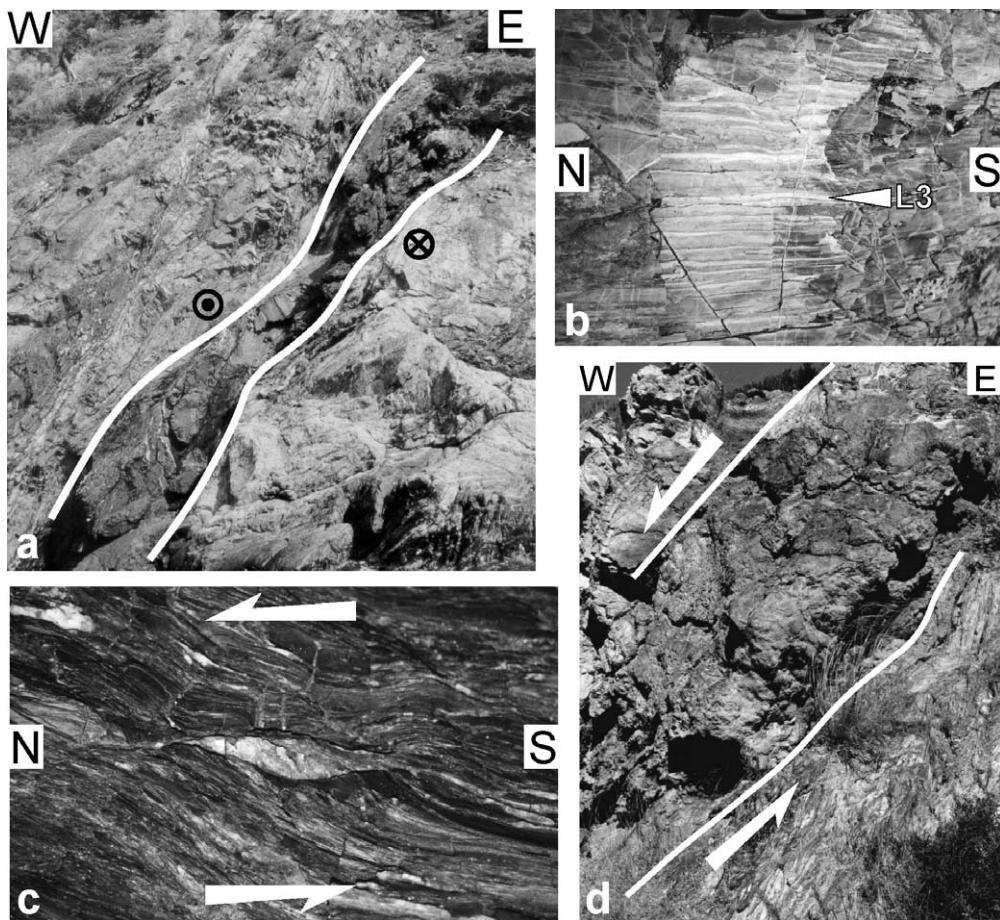


Fig. 4. Zone de cisaillement polyphasée séparant les deux unités de Porquerolles. (a) Décrochement ductile. (b) Linéation  $L_3$  horizontale et orientée nord-sud. (c) Quartz de forme sigmoïde, plan C et crochon de la foliation indiquant un sens de cisaillement senestre le long du décrochement. (d) Faille normale fragile.

Fig. 4. Field evidence for the polyphased shear zone separating the two units of Porquerolles. (a) Ductile, left-lateral strike-slip shear zone. (b) Horizontal  $L_3$  lineation trending north-south. (c) Sigmoid-shaped quartz, C-plane and drag of foliation indicating a sinistral sense of shear along the fault zone. (d) Brittle normal fault.

la zone de cisaillement lors de la transition ductile–fragile.

#### 4. Discussion–conclusion

L'île de Porquerolles ne correspond pas à un simple pli conique, mais à la juxtaposition de deux unités le long d'un décrochement qui se poursuit dans le continent [9]. Ce décrochement ductile senestre est rapporté à la collision continentale du Viséen moyen ( $\sim 340$ – $330$  Ma), connue jusqu'à présent dans les parties cen-

trales [2,4] et orientales [21] du massif des Maures. Le rejet de ce contact en faille normale est rapporté à l'extension syn-orogénique du Namurien ( $\sim 320$  Ma, [14]), reconnue dans les Maures centrales [3], et associée à un champ de déformation finie, comparable à celui du Massif central [10]. La cohérence géométrique entre le pli conique régional et le décrochement suggère d'interpréter ce pli comme un crochon de la foliation associé au jeu senestre du décrochement. Ces deux structures d'échelle régionale attestent une déformation majeure en transpression, superposée à deux phases tectoniques ductiles isoclinales, mais dont l'in-

terprétation ne sera possible qu'après avoir déplié les structures régionales de ce secteur.

## Remerciements

Le levé de cette carte a été financé par le parc national de Port-Cros, soutenu par le BRGM et initié par Georges Bronner. L'auteur remercie les membres du conservatoire national de Porquerolles pour leur accueil sur l'île, et en particulier André Royer pour sa grande disponibilité, ainsi que Patrice Pellizari et David Poncin pour leur aimable collaboration.

## Références

- [1] F. Arthaud, P. Matte, Contribution à l'étude des tectoniques superposées dans la chaîne hercynienne : étude microtectonique des séries métamorphiques du massif des Maures (Var), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 262 (1966) 436–439.
- [2] J.-P. Bellot, G. Bronner, C. Laverne, Analyse de la déformation finie et signification des lentilles ultramafiques des Maures occidentales (Var, France). Implications géodynamiques, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 331 (2000) 803–809.
- [3] J.-P. Bellot, G. Bronner, C. Laverne, Transcurrent strain partitioning along a suture zone in the Maures massif (France): result of eastern indenter tectonics in European Variscides?, in : J.R. Martínez Catalán, R.D. Hatcher Jr., R. Arenas, F. Díaz García (Eds.), Variscan–Appalachian Dynamics: The building of the Late Paleozoic Basement: Boulder, Colorado, GSA Spec. Pap. 364, 2002, pp. 223–237.
- [4] J.-P. Bellot, G. Bronner, J. Marchand, C. Laverne, C. Triboulet, Chevauchement et détachement dans les Maures occidentales (Var, France) : géométrie, cinématique et évolution thermobrométrique de la zone de cisaillement polyphasée de Cavalaire, *Géol. France* 1 (2002) 21–37.
- [5] P. Bordet, H. Chamley, J.-J. Blanc, A. Jeudi de Grissac, Carte géologique de la France à 1:50 000. Notice explicative de la feuille de Porquerolles–Hyères, BRGM, Orléans, France, 1976, 12 p.
- [6] G. Bronner, De schiste et d'eau, archipel d'Hyères, Cahier de découverte, parc national de Port-Cros, 8, 1986.
- [7] G. Bronner, J.-P. Lécorché, J.-B. Orsini, Un pli conique kilométrique : l'île de Porquerolles, fragment méridional du Massif hercynien des Maures (Var, France), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 272 (1971) 20–23.
- [8] F. Buscail, Contribution à la compréhension du problème géologique et géodynamique du massif des Maures : le métamorphisme régional modélisé dans le système KFMASH : analyse paragénétique, chémiographie, thermobarométrie, géochronologie Ar/Ar, thèse de spécialité, Montpellier, 2000.
- [9] P. Conti, La chaîne de la Verne (Maures, Var, France) : lithostratigraphie et pétrologie des formations cristallophylliennes, thèse de 3<sup>me</sup> cycle, Nice, 1978.
- [10] M. Faure, Late Carboniferous extension in the Variscan French Massif Central, *Tectonics* 14 (1995) 132–153.
- [11] S. Gueirard, Description pétrographique et zonéographique des schistes cristallins des Maures (Var), thèse d'État, Marseille et Ann. Fac. Sci. Marseille VI, 1960.
- [12] S. Gueirard, G. Waterlot, A. Gherzi, M. Samat, Sur l'âge Llandovérien supérieur à Tarannonnien inférieur des schistes à Graptolites du Fenouillet, massif des Maures (Var), *Bull. Soc. géol. France* 12 (1970) 195–199.
- [13] S. Gueirard, G. Waterlot, M. Samat, A. Gherzi, Nouvelles précisions sur l'âge des schistes à graptolites du Fenouillet (massif des Maures, Var), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 270 (1970) 661–662.
- [14] A.-C. Morillon, G. Féraud, M. Sosson, G. Ruffet, G. Crévol, G. Lerouge, Diachronous cooling on both side of a major strike-slip fault in the Variscan Maures massif (SE France), as deduced from a detailed  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  study, *Tectonophysics* 321 (2000) 103–126.
- [15] G.S. Odin, C. Odin, Échelle numérique des temps géologiques, *Géochronologie* 35 (1990) 12–20.
- [16] J. Olives Banos, Géologie des terrains paléozoïques dans le Sud-Ouest du massif des Maures (Var, France), thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université Aix–Marseille-III, et Trav. Lab. Sci. Terre Marseille, série B 14 (1979).
- [17] J. Olives Banos, M. Fonteilles, Les schistes à intercalations calcareuses et de roches d'origine magmatique du Fenouillet, une formation caractéristique des terrains paléozoïques du Sud-Ouest du massif des Maures (Var, France), *Bull. Soc. géol. France* 22 (1980) 399–403.
- [18] H. Schoeller, Feuille île de Porquerolles de la carte géologique à 1:50 000, BRGM, Orléans, France, 1932.
- [19] H. Schoeller, Sur la présence de Graptolites dans les schistes métamorphiques du massif des Maures, *C. R. somm. Soc. géol. France* (1937) 147–148.
- [20] M. Seyler, Pétrologie et lithostratigraphie des formations cristallophylliennes dans la chaîne de la Sauvette (Maures, Var, France), thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Nice, 1975.
- [21] A. Vauchez, M. Bufalo, Charriage crustal, anatexie et décrochements ductiles dans les Maures orientales (Var, France) au cours de l'orogenèse varisque, *Geol. Rundsch.* 77 (1988) 45–62.