



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



C. R. Geoscience 335 (2003) 969–979



Tectonique

## Imagerie sismique de la zone de collision hercynienne dans le Sud-Est du Massif armoricain (projet Armor 2/programme GéoFrance 3D)

Adnand Bitri<sup>a,\*</sup>, Michel Ballèvre<sup>b</sup>, Jean-Pierre Brun<sup>b</sup>, Jean Chantraine<sup>a</sup>,  
Denis Gapais<sup>b</sup>, Paul Guennoc<sup>a</sup>, Charles Gumiaux<sup>b</sup>, Catherine Truffert<sup>a</sup>

<sup>a</sup> BRGM, CDG/MA, 3, av. Claude-Guillemin, BP 6009, Orléans cedex 2, France

<sup>b</sup> Géosciences Rennes, UMR, 6118 CNRS, campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

Reçu le 6 janvier 2003 ; accepté le 1<sup>er</sup> septembre 2003

Présenté par Jean Dercourt

---

### Résumé

La structure de la zone de collision hercynienne dans le Sud-Est du Massif armoricain est illustrée par un profil sismique en écoute longue de 70 km de long, acquis en septembre 2000. Le profil met en évidence une structure chevauchante à vergence nord, inconnue jusqu'à présent, qui fait chevaucher, pendant le Carbonifère, le domaine de Champtoceaux sur le domaine Centre-Armoricain. Les déplacements décrochants dextres le long du cisaillement Sud-Armoricain, recoupé à sa base par le chevauchement, sont au moins en partie synchrones des mouvements chevauchants vers le nord. Une discontinuité majeure, oblitérée par le front du chevauchement, est mise en évidence entre le domaine de Champtoceaux et le domaine Centre-Armoricain. Ces données nouvelles conduisent à une profonde ré-interprétation structurale et cinématique de cette portion de la collision hercynienne. *Pour citer cet article : A. Bitri et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

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

### Abstract

**Seismic imaging of the Hercynian collision zone in the south-eastern Armorican Massif (Armor 2 project/GéoFrance 3D Program).** The structure of the Hercynian collision zone in the southeast of the Armorican Massif is illustrated by a 70-km long deep seismic profile acquired in September 2000. The profile images a previously unknown south-dipping thrust that brought the Champtoceaux Domain on top of the Central Armorican Domain during Carboniferous times. Dextral strike-slip motions along the South Armorican Shear Zone, which is downward cut by the thrust zone, are partly coeval with northward thrusting. A major discontinuity, hidden by the thrust front, is also imaged in the lower crust between the Champtoceaux area and the Central Armorican Domain. These new data lead to a structural and kinematic re-interpretation of this part of the Hercynian collision zone. *To cite this article: A. Bitri et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

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

*Mots-clés :* collision hercynienne ; sismique profonde ; Massif armoricain ; France

*Keywords:* Hercynian collision; deep seismic; Armorican Massif; France

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [a.bitri@brgm.fr](mailto:a.bitri@brgm.fr) (A. Bitri).

## Abridged English version

### 1. Introduction

The Hercynian belt of Brittany shows three main types of units (Fig. 1): (1) low-grade units moderately deformed during the Carboniferous, (2) high-pressure units, defining a suture zone, intensely deformed during Devonian thrusting and exhumed during the Early Carboniferous and (3) Barrovian-type metamorphic units related to Devonian–Carboniferous crustal thickening and syn-convergence Carboniferous extension. Three regional-scale faults displace these units, giving three major tectonic domains (Fig. 1): (1) the Central Armorican Domain, which represents the upper crust during the whole Hercynian evolution, (2) the Champtoceaux Domain, which is constituted by an upper crust section to the east and by HP metamorphic units to the west and (3) the South Armorican Domain, which is dominantly composed of metamorphic units, strongly affected by syn-convergence extension. The South Armorican Shear Zone (CSA), a major strike slip fault of Carboniferous age, juxtaposes the Central and South Armorican Domains to the west, and the South Armorican and Champtoceaux Domains, to the east. The contact between Central Armorican and Champtoceaux Domains corresponds to the Nort-sur-Erdre Fault, a brittle fault with limited amount of displacement, which does not readily, explains the important difference in geological history between these two domains.

The seismic profile presented here (Armor 2 Project/Géofrance 3D Program BRGM/INSU–CNRS) cuts through the three Hercynian domains of the Armorican Massif (Fig. 1). It reveals the occurrence of a crustal-scale thrust zone affecting the South Armorican and Champtoceaux Domains and crosscutting at depth the South Armorican Shear Zone. This discovery claims for significant reappraisal of the geometry and kinematics of the Hercynian collision in the area.

### 2. The seismic profile

#### 2.1. Geological setting

The chosen profile is 70 km long and strikes about north–south, at high angle to the regional structural

trend. It starts just south of the northern branch of the CSA, and ends at about 20 km south of the southern branch of the CSA. From north to south, the main geological units found along the profile are as follows (Fig. 1).

The *Central Armorican Domain* is mainly made of Upper-Proterozoic to Lower-Devonian sediments affected by low-grade metamorphism [20]. The overall ductile deformation of the area results from dextral strike-slip of Carboniferous age [13,23]. Associated structures are (1) east–west-striking upright folds, (2) east–west-striking subvertical slaty cleavage, and (3) sub-horizontal stretching lineations [13,20]. Along the northern branch of the CSA, and south of it, folds tend to become asymmetric as a result of some northward thrusting components, locally marked by minor thrusts [11,20,22]. The northern part of the profile cuts across this zone.

The *Champtoceaux Domain* shows a piling up of strongly deformed eclogite-bearing gneisses and micaschists [1,5]. After their exhumation in Early-Carboniferous times [5], these units were affected by dextral shearing along the CSA, which produced a kilometre-scale antiformal structure with a steeply dipping axial plane and a steeply eastward-plunging axis. During exhumation, the high-pressure units were thrust onto lower-grade units (Mauves unit). To the north and the east, the top of the high-pressure units is marked by a normal fault zone folded by the antiform. The hanging wall of this fault zone consists of low-grade upper-crustal sediments (Ancenis basin and Mauges units). The profile cuts across the western part of the antiform, where only the northern limb is observed.

The *South Armorican Domain* shows a complex structural pattern. Upper units are marked by high-pressure metamorphic histories [4,15,21]. In Vendée, these units are thrust onto low-grade Palaeozoic sediments [18]. At regional scale, they show intense shearing deformations, with a flat-lying to gently-dipping pervasive foliation, and a dominantly east–west to NNW–SSE-striking stretching lineation [6, 12]. Rocks below the thrust zone show Barrovian metamorphic conditions associated with large ductile deformations accumulated during crustal thickening [9,18] followed by pervasive syn-convergence extension of Late-Carboniferous age [8,12,14].

## 2.2. Seismic acquisition and processing

The seismic profile has been acquired and processed in September 2000 by the ‘Compagnie générale de géophysique’. The source consisted in five vibrators, 12.5-m spaced, with a 16-s sweep. One vibrated point comprised the sum of 9 linear sweeps with a 10 to 40-Hz frequency. Reflected waves were recorded by 240, 50-m-spaced traces (24 geophones per trace). Shot points were located in the middle of the system, each 100 m along the profile, leading to a theoretical coverage of 60. At each shot point, the signal was recorded during 14 s, with sampling steps of 4 ms. Data processing comprised in particular statistical corrections, velocity analyses, dip corrections, summation, filtering, and time migration using wave equations.

## 2.3. Profile description

The profile shows an overall strong reflectivity throughout the entire crust (Fig. 2). In the upper crust, many reflections can be correlated with mapped faults and unit boundaries.

Below the Central Armorican Domain, the *lower crust* shows a moderate reflectivity, marked by horizontal reflections between 20 and 32 km. In contrast, it is strongly reflective and rather thick below the Champtoceaux Domain, between 18 and 22 km. Below the South Armorican Domain, the lower crust remains strongly reflective, but appears substantially thinner and cut by south-dipping reflections. The Moho is slightly deeper below Champtoceaux and the northern domain (32 km) than in the southern part of the profile (31 km). The transition is marked by a flexure below the southern part of the Champtoceaux Domain. Below the Nort-sur-Erdre fault zone (FNE), the reflectivity of the lower crust is interrupted (minor reflections observed in the zone are post-migration diffractions).

The *upper crust* shows three seismically different patterns that correspond to the main geological domains defined at the surface. In the Central Armorican Domain, the crust shows only few south-dipping reflections between 13 and 20 km. This image is comparable to that observed in the northern part of the Central Armorican Domain (Armor 1 profile [3]).

In the Champtoceaux Domain, the crust is strongly reflective, with numerous groups of north-dipping reflections that correlate toward the surface with the

overall attitude of metamorphic layering and foliations in the Mauves and Champtoceaux units. In the first ten kilometres, a set of localised south-dipping reflections offsets the north-dipping set. Some of them clearly correspond to faulted unit boundaries. From these, we infer that a set of south-dipping thrusts, with limited individual displacements, cut across the Champtoceaux units and the northernmost units of St Georges-sur-Loire and Saint-Mars-la-Jaille. At depth, these thrusts join a group of south-dipping reflections that interrupt the flat reflectors of the lower crust. The aeromagnetic profile along the seismic section shows an anomaly of more than 700 nT located on the mafic eclogitic units of Champtoceaux. The short wavelength and the asymmetry of the anomaly is consistent with the interpreted geometry of these units in the upper 10 km, i.e. steeply northward-dipping units, as a result of thrust induced superpositions. A magnetic modelling of the area further confirms this interpretation [10]. On the other hand, the large wavelength of the gravimetric anomaly associated with the Champtoceaux Domain cannot be explained by local dense sources within the upper 10 km. It fits better with the occurrence of heavy bodies within the middle crust. This suggests that imbricate thrust structures involving mafic Champtoceaux units probably occur down to at least 20 km depth.

In the South Armorican Domain, between 2 and 12 km, reflexions image an antiformal structure bounded by normal faults. These could correspond to the migmatite dome observed further west, in the Loire Estuary (see Fig. 1), and exhumed during Late-Carboniferous extension [12]. Deeper in the crust, between 15 and 20 km, a large group of north-dipping reflections is observed. It could correspond to metamorphic units known further south, in the Sables d’Olonne area [6,18].

## 3. Discussion

The most striking structure revealed by the profile is a connected set of south-dipping faults in the upper crust and shear zones in the lower crust that we interpret as crustal-scale thrust system. This discovery has several important implications.

(1) The Champtoceaux Domain is allochthonous and thrust over the southern part of the Central Armorican Domain. The thrusting event post-dates the

exhumation of the High-Pressure rocks, and thus post-dates the Early Carboniferous [5].

(2) An attempt of pre-thrusting restoration of the High-Pressure units of the Champtoceaux Domain suggests an overall thrust displacement of at least 20 km (Fig. 3). The thrusting motion was most probably combined with strike-slip as shown by restoration of deformation at regional scale [16,17]. Indeed, according to surface data, the direction of the thrust zone must be about east–west, parallel to unit boundaries and to the northern branch of the CSA (Fig. 1) where transpression is documented [20].

(3) The subvertical CSA is of course not imaged by the seismics; but the continuation at depth from its surface location corresponds to a change in seismic signature in the upper crust. Deeper, at about 20 km, this vertical continuation is interrupted against the thrust zone. This geometry could suggest that thrusting post-dates the CSA. However, both structures are of Carboniferous age. Furthermore, the CSA is marked by the occurrence of (a) relatively late synkinematic granites (Upper Carboniferous) [2], and (b) late brittle shear structures [19]. The amount of horizontal displacement along the thrust zone (Fig. 3) indicates that if the CSA affects the lithospheric mantle, its downward prolongation should be located just south of the profile.

(4) The major seismic discontinuity observed in the lower crust and the Moho, between the Champtoceaux Domain and the Central Brittany Domain, is hidden by the thrust front. This discontinuity corresponds probably to the early sinistral wrench zone that contributed to the exhumation of the high-pressure rocks [7].

(5) The entire South Armorican Domain imaged by the profile is part of the hanging wall of the thrust system. In this domain, thickening led to the piling up of metamorphic units with different tectonic histories. Thrust contacts between these units are offset by normal faults of Late-Carboniferous age. As the offset along the CSA is of the order of 100 km, structures imaged in the South Armorican Domain are not in continuity with those of the Champtoceaux Domain, although north-dipping reflections occur on both sides of the CSA. The South Armorican Domain underwent important vertical uplift during Late-Carboniferous extension, and this was probably partly coeval with wrenching along the CSA and thrusting

of the Champtoceaux Domain. This complex 3D kinematics remains to be quantified.

## 1. Introduction

La chaîne hercynienne armoricaine est marquée par trois types d'unités géologiques (Fig. 1) : (1) des unités anchizontales à épizonales, en général peu à modérément déformées pendant le Carbonifère, (2) des unités métamorphiques de haute pression, intensément déformées par une tectonique chevauchante d'âge probablement Dévonien, témoins d'une suture, puis exhumées au début du Carbonifère, et (3) des unités métamorphiques de pression intermédiaire ou basse pression–haute température, témoins d'un épaississement crustal Dévonien à Carbonifère inférieur et d'une extension syn-convergence au Carbonifère supérieur. Trois grandes failles d'échelle crustale et d'extension régionale découpent et déplacent ces unités tectono-métamorphiques, aboutissant à trois domaines majeurs (Fig. 1) : (1) le domaine Centre-Armoricain, en position supra-crustale pendant toute l'évolution hercynienne, (2) le domaine de Champtoceaux, qui est constitué à l'est d'une portion de croûte supérieure et à l'ouest des unités métamorphiques de haute pression, et (3) le domaine Sud-Armoricain, fortement marqué par l'extension syn-convergence d'âge Carbonifère. Le cisaillement Sud-Armoricain (CSA), décrochement dextre d'âge Carbonifère, juxtapose en surface les domaines Centre et Sud-Armoricains, à l'ouest, et les domaines Sud-Armoricain et de Champtoceaux, à l'est. Le contact entre les domaines de Champtoceaux et Centre-Armoricain correspond en surface à la faille de Nort-sur-Erdre (FNE), rupture fragile ne témoignant pas de déplacements majeurs et n'expliquant donc pas l'énorme contraste d'histoire tectonique des domaines qu'elle sépare.

Le profil de sismique profonde présenté ici (projet Armor 2 du programme GéoFrance 3D BRGM/INSU-CNRS), qui recoupe ces trois domaines caractéristiques de la tectonique hercynienne du Massif armoricain (Fig. 1), met en évidence, pour la première fois, une structure chevauchante d'échelle crustale affectant les domaines Sud-Armoricain et de Champtoceaux et recoupant en profondeur le cisaillement Sud-Armoricain. Cette découverte conduit à modifier significativement les conceptions antérieures de la géomé-

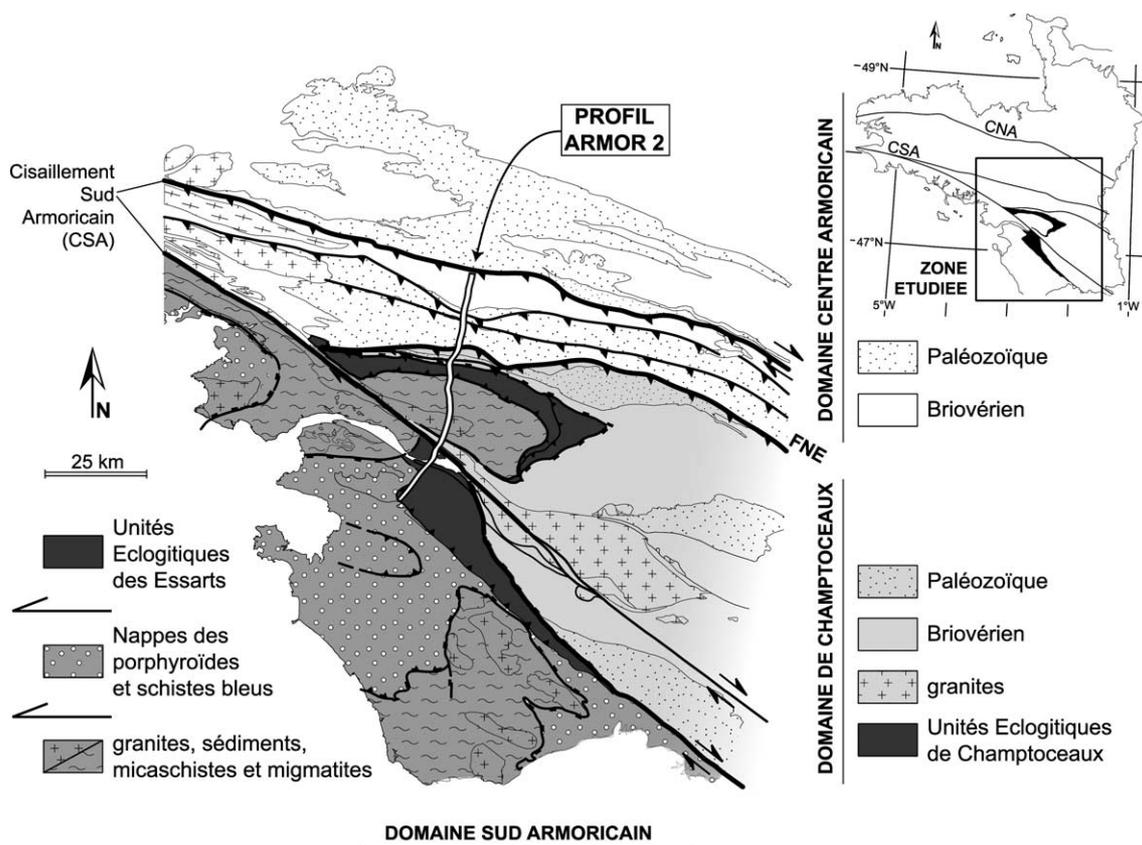


Fig. 1. Carte géologique simplifiée de la zone d'implantation du profil sismique.

Fig. 1. Simplified geological map of the seismic profile location zone.

trie et de la cinématique de la tectonique hercynienne dans le Massif armoricain.

## 2. Le profil sismique

### 2.1. Cadre géologique

Le profil a été localisé de manière à recouper orthogonalement la bordure sud du domaine Centre-Armoricain, le domaine de Champtoceaux, et la partie nord du domaine Sud-Armoricain. Il débute immédiatement au sud de la branche nord du CSA et s'arrête à une vingtaine de kilomètres au sud du CSA proprement dit. On peut schématiser les principales unités tectoniques recoupées comme suit.

Le *domaine Centre-Armoricain* est principalement constitué de formations sédimentaires briovériennes et

paléozoïques affectées par un métamorphisme anchi-zonal à épizonal, localement associé à des intrusions leucogranitiques [20]. Pendant le Carbonifère, l'ensemble est affecté par une déformation ductile en cisaillement dextre, donnant naissance à des plis droits associés à une schistosité de flux verticale, d'orientation est-ouest, et à un étirement subhorizontal [13,20,23]. Dans le Sud, à partir de la branche nord du CSA, les plis se déversent vers le nord et sont associés à de petits chevauchements [11,20,22]. Le profil sismique débute à la bordure sud du domaine des plis droits et recoupe toute la zone des plis déversés vers le nord.

Le *domaine de Champtoceaux* montre, dans sa partie occidentale, un empilement de gneiss et mica-schistes intensément déformés, contenant des reliques éclogitiques (15–25 kbar, [1]), affectés par un anticlinal d'ampleur déca-kilométrique, à plan axial raide et à axe plongeant fortement vers l'est. Cette structure

d'âge Carbonifère, cinématiquement associée au fonctionnement du décrochement Sud-Armoricain, plisse des chevauchements à vergence ouest postérieurs au métamorphisme de haute pression daté aux environs de 360 Ma [5]. Cette pile métamorphique de haute pression repose sur les schistes de Mauves, localisés au cœur de l'anticlinal, et plonge, vers le nord et l'est, sous des formations sédimentaires épizonales d'âge Paléozoïque (bassin d'Ancenis) et Protérozoïque (série des Mauges). Une faille normale, également déformée par l'anticlinal, sépare ces unités faiblement métamorphiques des gneiss et micaschistes de haute pression. Elle est associée à l'exhumation des unités métamorphiques au Carbonifère inférieur [5]. Le profil recoupe l'anticlinal dans sa partie ouest, où il est réduit à son flanc nord.

Le *domaine Sud-Armoricain* est un édifice complexe, dont le sommet est constitué par des formations sédimentaires, plutoniques et volcaniques ayant subi un métamorphisme de haute pression (éclogites des Essarts, 15–20 kbar, 650–700 °C [15]; schistes bleus du bois de Céné et de Groix, 15–20 kbar, 500–550 °C [4]; schistes de Saint-Gilles et porphyroïdes de Vendée et Bretagne sud, 8–10 kbar, 350–400 °C [21]). Ces unités de haute pression, qui chevauchent en Vendée des formations paléozoïques peu métamorphiques [18], ont subi une déformation cisailante très intense donnant aux schistes bleus et aux porphyroïdes une foliation à faible pendage et une linéation d'étirement d'orientation dominante NNW–SSE [6,12]. Sous les unités chevauchantes de haute pression, les unités para-autochtones ont subi un métamorphisme Barrovien, synchrone d'une déformation ductile d'abord en épaissement [9,18], puis en extension syn-convergence pendant le Carbonifère [8,12, 14].

## 2.2. Paramètres d'acquisition

Le profil, d'une longueur totale de 70 km et d'orientation générale nord–sud, a été implanté en tenant compte de l'orientation sub-équatoriale des structures, de la largeur des unités géologiques et des contraintes liées à l'occupation du sol. La Compagnie générale de géophysique, sélectionnée par appel d'offre, a assuré l'acquisition des données en septembre 2000, ainsi que leur traitement.

La source vibratoire a été retenue pour des raisons de simplicité de mise en œuvre. Cinq vibrateurs disposés en ligne et espacés de 12,5 m opéraient simultanément. La longueur du signal source (*sweep*) était de 16 s. La sommation de 9 *sweep* linéaires de fréquence de 10 à 40 Hz constitue un point vibré (PV).

Pour la réception, un dispositif de 240 traces (24 géophones par trace) espacées de 50 m a été retenu. Les tirs étaient effectués au centre du dispositif (longueur totale 12,150 m), avec une fenêtre de deux traces. Les points vibrés disposés tous les 100 m ont permis un taux de couverture théorique de 60. Le signal a été enregistré sur 14 s, avec un pas d'échantillonnage de 4 ms. Tous ces paramètres ont été établis après deux jours d'essais de terrain. L'acquisition des données a été faite par le laboratoire de dernière génération Sercel SM408 utilisé pour la première fois en France.

## 2.3. Traitement

La séquence de traitement appliquée comprend, en particulier, les corrections statiques, analyses de vitesses, corrections de pendage (DMO), corrections statiques résiduelles, sommation, filtrage en temps variable et migration temps par équation d'onde. La section présentée sur la Fig. 2 est convertie en profondeur.

## 2.4. Description du profil

La section sismique, de qualité remarquable, montre une forte réflectivité au travers de toute la croûte (Fig. 2). De nombreuses réflexions dans la croûte supérieure peuvent être corrélées aux unités géologiques connues en surface, comme le montre la coupe géologique de surface superposée au profil sismique. Afin de faciliter la lecture du profil, les groupes cohérents de réflexions ont été coloriés en fonction de leur pendage (réflexions horizontales : rouge ; à pendage sud : vert ; à pendage nord : bleu). Une forme anticlinale est colorisée en jaune au sud.

La *croûte inférieure*, sous le domaine Centre-Armoricain, est moyennement réflective, matérialisée par des réflecteurs horizontaux, entre 20 et 32 km. Sous le domaine de Champtoceaux, elle est très réflective et épaisse, de 18 à 22 km. Sous le domaine Sud-Armoricain, bien que très réflective, elle se réduit

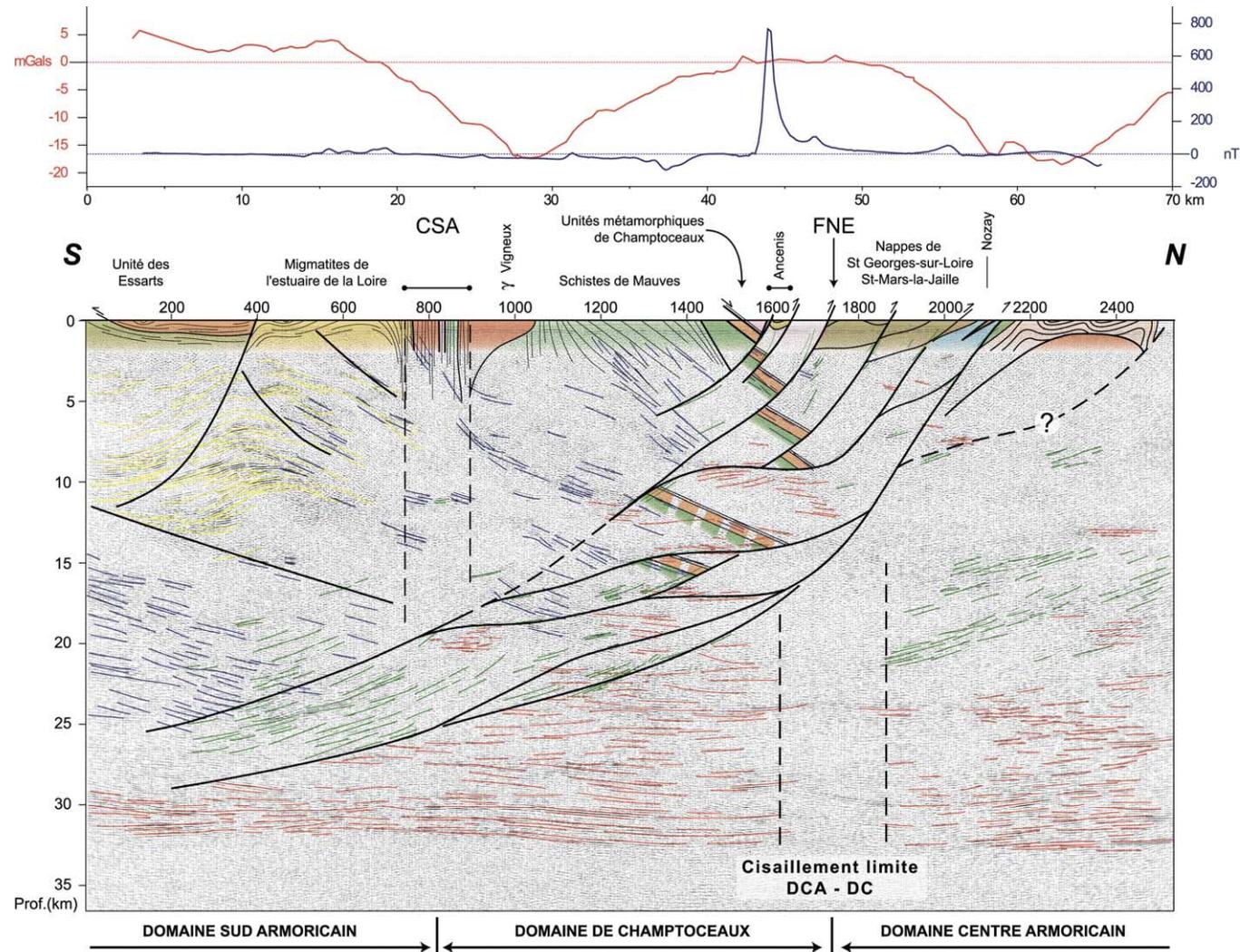


Fig. 2. Profil sismique Armor 2, converti en profondeur, avec coupe géologique réalisée à partir des données géologiques de surface et profils gravimétrique et magnétique. Les principaux groupes de réflexions ont été coloriés arbitrairement en fonction de leur pendage (rouge/horizontal, vert/pendage sud, bleu/pendage nord). Une forme anticlinale est coloriée en jaune, au sud du profil.

Fig. 2. Depth-converted Armor 2 seismic profile, with geological cross-section drawn after surface geological data and gravimetric and magnetic profiles. The main groups of reflections have been coloured arbitrarily, according to their dip (red/horizontal, green/south dipping, blue/north dipping). An anticlinal shape is coloured in yellow to the south.

fortement, recoupée par des réflexions à pendage sud. Le Moho est légèrement plus profond sous les domaines de Champtoceaux et Centre-Armoricain (32 km) que sous le domaine Sud-Armoricain (31 km). La transition s'effectue par une flexure, sous la partie sud du domaine de Champtoceaux. La réflectivité de la croûte inférieure est interrompue à l'aplomb de la FNE. Les quelques réflecteurs observés sur la section migrée (Fig. 2) sont des diffractions apparues après migration.

La *croûte supérieure* montre trois domaines dont les signatures sismiques sont clairement différentes et qui correspondent, en surface, aux domaines Centre-Armoricain, de Champtoceaux, et Sud-Armoricain, respectivement séparés par les accidents CSA et FNE. Dans le domaine Centre-Armoricain, la croûte supérieure est relativement transparente, avec seulement quelques réflexions inclinées vers le sud entre 13 et 20 km. Cette image s'apparente fortement à celle obtenue dans le Profil Armor 1, au nord du domaine Centre-Armoricain [3]. Dans le domaine de Champtoceaux, la croûte supérieure est très réflective, avec de nombreux groupes de réflexions pentés vers le nord, qui se corrént en surface au litage des schistes des Mauves et aux foliations des unités métamorphiques de haute pression. Dans les dix kilomètres supérieurs de la croûte, une série de réflexions localisées à pendage sud décalent les réflecteurs à pendage nord. Elles correspondent en surface à des failles juxtaposant des unités géologiques différentes. Il s'agit d'un faisceau de chevauchements, dont l'amplitude de déplacement est limitée, qui tronçonne les unités métamorphiques de Champtoceaux, ainsi que les nappes de Saint-Georges-sur-Loire/Saint-Mars-la-Jaille. Ces chevauchements superficiels se connectent en profondeur au groupe de réflexions à pendage sud, qui recoupe les réflexions de la croûte inférieure. Le profil magnétique superposé à la coupe sismique montre une anomalie de plus de 700 nT localisée à l'aplomb des unités à reliques éclogitiques de Champtoceaux. Cette anomalie est, en fait, due à la présence de serpentinites au toit des unités métamorphiques [1]. La courte longueur d'onde et la forme asymétrique de l'anomalie s'accordent bien avec le fait que ces unités à forte rémanence magnétique apparaissent, dans les 10 km supérieurs de l'image sismique, découpées en écailles par les chevauchements superficiels. Une modélisation des sources par une analyse en ondelettes confirme

cette interprétation [10]. L'anomalie gravimétrique de grande longueur d'onde, au niveau du domaine de Champtoceaux, ne peut pas s'expliquer seulement par les sources denses superficielles, clairement identifiées par la sismique jusqu'à 10 km de profondeur. Elle témoigne de l'existence d'un corps lourd à la base de la croûte supérieure. Ceci suggère donc une prolongation de ces écailles en profondeur au moins jusqu'à 20 km. Dans le domaine Sud-Armoricain, les réflexions dessinent, entre 2 et 12 km, un antiforme sous les lames chevauchantes de haute pression (orthogneiss et éclogites des Essarts [15] et schistes de Saint-Gilles et porphyroïdes [21]). Cet anticlinal, bordé par des failles normales, pourrait correspondre au dôme migmatitique qui affleure à l'ouest du profil, dans l'estuaire de la Loire. Plus profondément, entre 15 et 20 km, un puissant groupe de réflexions à pendage nord pourrait correspondre aux unités métamorphiques de Vendée (séries de Brétignolles–Les Sables-d'Olonne, [6, 18]). Ces réflexions sont recoupées vers le bas par le groupe de réflexions à pendage sud qui prolonge, dans le domaine Sud-Armoricain, la structure chevauchante identifiée dans le domaine de Champtoceaux.

### 3. Interprétation : discussion

Un trait structural important, mis en évidence par le profil sismique, est la structure chevauchante qui, de la base de la croûte au sud, s'élargit en un éventail de failles inverses dans la croûte supérieure du domaine de Champtoceaux. L'existence de cette structure chevauchante majeure, qui affecte à la fois le domaine Sud-Armoricain et le Domaine de Champtoceaux, était restée insoupçonnable à partir des seules données géologiques de surface. Sa découverte conduit à reconsidérer les relations entre les trois domaines principaux du Massif armoricain, telles qu'on pouvait les percevoir, et change donc significativement la conception que l'on pouvait avoir de la tectonique hercynienne dans cette région. Plusieurs implications majeures sont à considérer.

(1) Le complexe métamorphique de haute pression de Champtoceaux chevauche la bordure sud du domaine Centre-Armoricain. Ce chevauchement est nécessairement post-Carbonifère inférieur, dans la mesure où c'est à cette époque que sont exhumées les formations métamorphiques de haute pression [5].

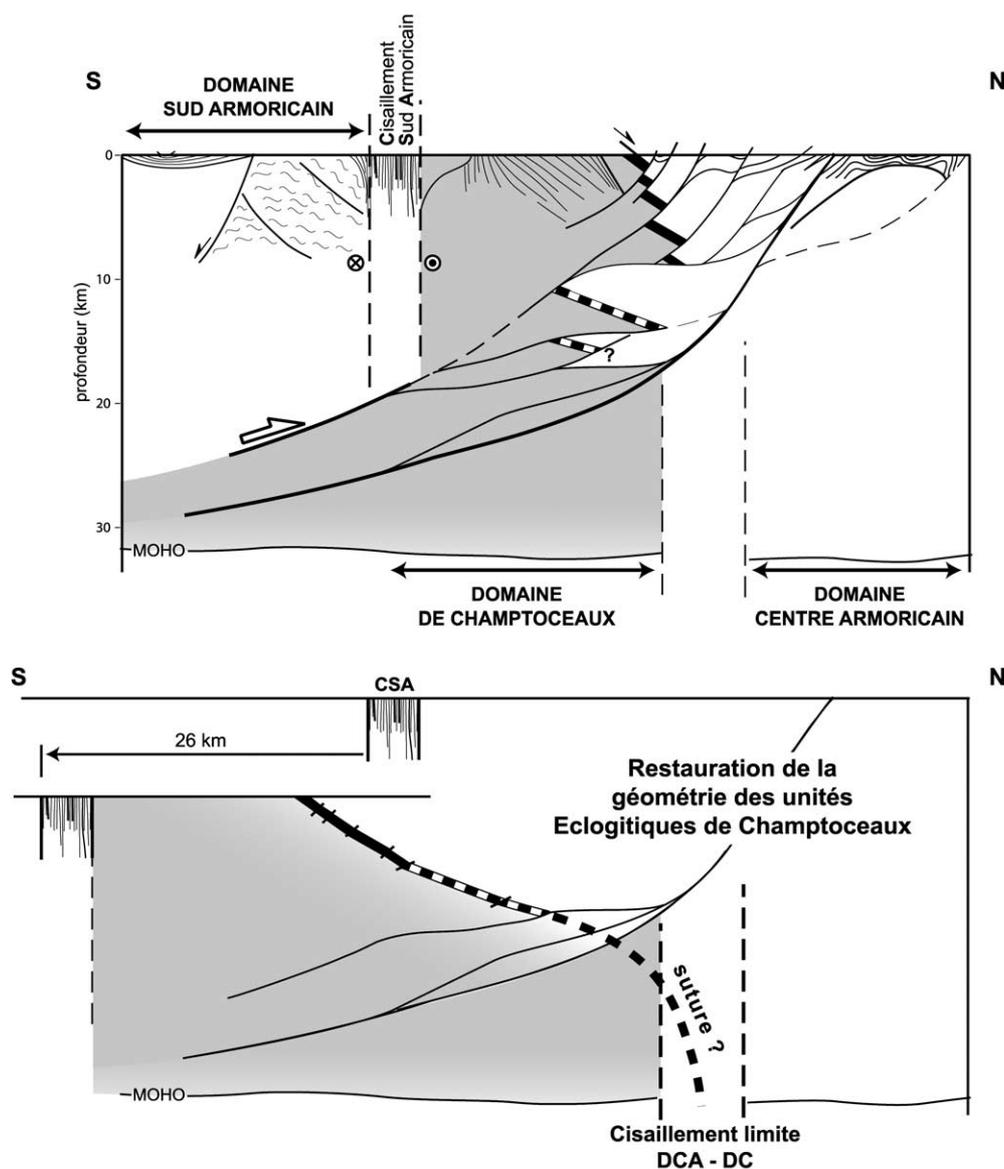


Fig. 3. Schéma tectonique interprétatif du profil et tentative de restauration des unités éclogitiques du Domaine de Champtoceaux (noir : segments reconnus en sismique et modélisés en magnétisme ; pointillé noir : segments interprétés uniquement d'après la sismique). Cette restauration ne tient pas compte des déplacements en décrochement dextre. Elle montre un déplacement d'au moins 20 km, amenant le cisaillement Sud-Armoricain à la limite sud du profil.

Fig. 3. Interpreted tectonic sketch of the profile and attempt of restoration of eclogitic units of the Champtoceaux Domain (black: segments recognised on seismics and modelled by magnetism; dotted black: segments interpreted after seismics only). The restoration does not take into account dextral strike slip motions. It shows a displacement of at least 20 km that brings the South Armoricain Shear Zone at the southern termination of the profile.

(2) La segmentation des unités métamorphiques de haute pression de Champtoceaux par le faisceau de failles affectant la croûte supérieure permet d'évaluer

la composante de raccourcissement due au chevauchement à au moins 20 km (Fig. 3). Compte tenu du fait que la direction de ces chevauchements est parallèle

à la branche nord du CSA (Fig. 1) où des structures à vergence nord sont localement observées [20], une composante décrochante dextre leur est vraisemblablement associée.

(3) Le cisaillement Sud-Armoricain en tant que structure sub-verticale n'est pas imagé par des réflexions spécifiques, mais le prolongement en profondeur de sa trace en surface correspond à un changement net de signature sismique. Ce prolongement arrive en butée sur le chevauchement à une profondeur d'environ 20 km. Cette configuration géométrique pourrait inciter à conclure que le chevauchement est postérieur au décrochement. D'un autre côté, ces structures sont toutes deux d'âge Carbonifère. De plus, la carte géologique indique que les limites d'unités dans le domaine de Champtoceaux, dont certaines coïncident avec certains des chevauchements imagés en sismique (Fig. 2), sont tronquées par le CSA (Fig. 1). Par ailleurs, les données chronologiques et structurales disponibles le long du CSA montrent l'existence (a) de granites syncinématiques tardifs, d'âge Carbonifère supérieur [2], et (b) de déformations cisailantes fragiles tardives [19]. Ainsi, un synchronisme, au moins partiel, du fonctionnement du CSA et du système chevauchant est à envisager comme l'a, par ailleurs, montré la restauration de la déformation hercynienne à l'échelle régionale [16,17]. Compte tenu des déplacements chevauchants déduits de la géométrie des structures, dans la croûte supérieure et moyenne, la position du CSA dans le manteau lithosphérique est à rechercher immédiatement au sud du profil.

(4) Les déformations extensives observées en Bretagne méridionale sont d'âge Carbonifère supérieur [12], donc synchrones des déplacements dextres le long du CSA. Les relations géométriques entre ce dernier et le système chevauchant imagé par la sismique soulignent ainsi le caractère syn-convergence de l'extension.

(5) La discontinuité majeure de la croûte inférieure et du Moho, mise en évidence entre les domaines Centre-Armoricain et de Champtoceaux, est oblitérée dans la croûte supérieure par le front du chevauchement. Cette discontinuité correspond très probablement à un décrochement précoce dans l'histoire de la collision, synchrone de l'exhumation des roches de haute pression de Champtoceaux, dont le déplacement senestre peut être estimé autour de 300 km [7]. La

restauration des unités éclogitiques (Fig. 3) suggère que ce cisaillement à la limite entre domaine Centre-Armoricain et domaine de Champtoceaux pourrait correspondre au prolongement de la suture en profondeur.

(6) La totalité du domaine Sud-Armoricain imagé par le profil constitue l'unité chevauchante. Compte tenu des corrélations qui peuvent être établies avec la géologie de surface, la structure observée résulte, sous toute vraisemblance, d'une superposition tectonique, de haut en bas, des unités métamorphiques précoces de haute pression et des unités métamorphiques de pression intermédiaire et des migmatites associées. Les contacts chevauchants entre ces unités sont décalés par des failles normales d'âge Carbonifère. Il est important de noter que, compte tenu du décrochement dextre le long du CSA, les structures imagées dans le domaine Sud-Armoricain ne sont pas en continuité directe avec celles du domaine de Champtoceaux, même si les réflexions à pendage nord observées de part et d'autres du CSA semblent le suggérer. D'autre part, le domaine Sud-Armoricain a subi un soulèvement vertical important pendant ces mouvements à composantes simultanément décrochantes et chevauchantes. Le mouvement vertical relatif de part et d'autre du CSA a au moins deux causes. D'une part, les linéations d'étirement résultant du cisaillement dextre, dans le CSA lui-même, ont le plus souvent un plongement vers l'est [19], ce qui implique un soulèvement du compartiment sud lors du mouvement décrochant. D'autre part, là où le CSA est en contact avec les unités migmatitiques du domaine Sud-Armoricain, une composante de mouvement vertical, due à l'exhumation de ces dernières, doit être prise en compte. Une quantification de cette cinématique tridimensionnelle complexe reste à réaliser.

## Remerciements

Les auteurs remercient MM. Patrick Ledru et Philippe Matte, respectivement directeur de programme et président du conseil scientifique du programme Géofrance 3D (BRGM et CNRS–Insu), pour leur soutien dans la réalisation du projet Armor 2. Nos remerciements s'adressent aussi à J.-P. Burg et J.-L. Lagarde pour leurs remarques et critiques constructives.

## Références

- [1] M. Ballèvre, J.-R. Kiénaast, J.-L. Paquette, Le métamorphisme écolitique dans la nappe hercynienne de Champtoceaux (Massif armoricain), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 305 (1987) 127–131.
- [2] J. Bernard-Griffiths, J.-J. Peucat, S. Sheppard, P. Vidal, Petrogenesis of Hercynian leucogranites from the southern Armorican Massif: contribution of REE and isotopic (Sr, Nb, Pb and O) geochemical data to the study of source rock characteristics and ages, Earth Planet. Sci. Lett. 74 (1985) 235–250.
- [3] A. Bitri, J.-P. Brun, C. Truffert, P. Guennoc, Deep seismic imaging of the Cadomian thrust wedge of Northern Brittany, Tectonophysics 331 (1–2) (2001) 65–80.
- [4] V. Bosse, M. Ballèvre, O. Vidal, Ductile thrusting recorded by the garnet isograd from the blueschist-facies metapelites of the Ile de Groix, Armorican Massif, France, J. Petrol. 43 (3) (2002) 485–510.
- [5] V. Bosse, G. Feraud, G. Ruffet, M. Ballèvre, J.-J. Peucat, K. De Jong, Late Devonian subduction and early-orogenic exhumation of eclogite-facies rocks from the Champtoceaux Complex (Variscan belt, France), Geol. J. 35 (2000) 297–325.
- [6] J.-P. Brun, J.-P. Burg, Combined thrusting and wrenching in the Ibero-Armorican arc: a corner effect during continental collision, Earth Planet. Sci. Lett. 61 (1982) 319–332.
- [7] J.-P. Brun, D. Gapais, R. Capdevilla, C. Gumiaux, M. Granet, J. Chantraine, La suture sud de la collision hercynienne en France : une tentative de restauration, in : Réunion des sciences de la Terre, Nantes, 2002, p. 77.
- [8] J.-P. Burg, J. Van Den Driessche, J.-P. Brun, Syn- to post-thickening extension in the Variscan Belt of western Europe: modes and structural consequences, Géol. France 3 (1994) 33–51.
- [9] M. Cannat, J.-L. Bouchez, Linéations N–S et E–W en Vendée littorale (Massif armoricain). Épisodes tangentiels successifs éo-hercyniens en France occidentale, Bull. Soc. géol. France 2 (1986) 299–310.
- [10] J. De Poulpique, C. Gumiaux, C. Truffert, Les anomalies magnétiques associées aux nappes de Champtoceaux : traitement par transformation de Fourier et transformée en ondelettes, in : Réunion des sciences de la Terre, Nantes, 2002, p. 103.
- [11] M. Faure, C. Cartier, Déformations ductiles polyphasées dans l'antiforme orthogneissique de Saint-Clément-de-la-Place (unité de Lanvaux, Massif armoricain), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 326 (1998) 795–802.
- [12] D. Gapais, J.-L. Lagarde, C. Le Corre, C. Audren, P. Jégouzo, A. Casas Sainz, J. Van den Driessche, La zone de cisaillement de Quiberon : témoin d'extension de la chaîne varisque en Bretagne méridionale au Carbonifère, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 316 (1993) 1123–1129.
- [13] D. Gapais, C. Le Corre, Is the Hercynian belt of Brittany a major shear zone?, Nature 288 (1980) 574–576.
- [14] L. Geoffroy, Histoire de la déformation dans les métapelites de Sauveterre, Vendée littorale, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 307 (1988) 277–280.
- [15] G. Godard, Les Essarts eclogite-bearing Complex (Vendée), Géol. France « Spécial Vendée » 1–2 (2001) 19–51.
- [16] C. Gumiaux, Modélisation du cisaillement hercynien de Bretagne centrale : déformation crustale et implications lithosphériques, thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université Rennes-1, 2003.
- [17] C. Gumiaux, J.-P. Brun, D. Gapais, Strain removal within the Hercynian Shear Belt of Central Brittany (western France): methodology and tectonic implications, J. Geol. Soc. Lond. Spec. Pub., in press.
- [18] M. Iglesias, J.-P. Brun, Signification des variations et anomalies de la déformation dans un segment de la chaîne hercynienne (les séries cristallogylliennes de la Vendée littorale, Massif armoricain), Bull. Soc. géol. France 18 (1976) 1443–1452.
- [19] P. Jégouzo, The South Armorican Shear Zone, J. Struct. Geol. 2 (1–2) (1980) 39–47.
- [20] C. Le Corre, Approche quantitative des processus synschisteux. L'exemple du segment hercynien de Bretagne centrale, thèse d'État, université Rennes-1, 1978.
- [21] F. Le Hébel, O. Vidal, J.-R. Kiénaast, D. Gapais, Les « porphyroïdes » de Bretagne méridionale : une unité de HP–BT dans la chaîne hercynienne, C. R. Geoscience 334 (2002) 205–211.
- [22] P. Ledru, A. Marot, Y. Herrouin, Le synclinorium de Saint-Georges-sur-Loire : une unité ligérienne charriée sur le domaine centre-armoricain. Découverte de metabasite à glaucophane sur la bordure sud de cette unité, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 303 (10) (1986) 963–968.
- [23] M.-N. Percevault, P.-R. Cobbold, Mathematical removal of regional ductile strains in Central Brittany: evidence for wrench tectonics, Tectonophysics 82 (1982) 317–328.