



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 337 (2005) 385–392



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Tectonique

Failles normales Paléocène à Lutétien en zone sud-pyrénéenne (Aragon, Espagne) et flexuration de la plaque ibérique

Yves Hervouët ^{a,*}, Nicolas Espurt ^{a,b}, Damien Dhont ^a

^a FRE2639, Imagerie géophysique, CURS-IPRA, université de Pau et des pays de l'Adour, BP 1155, 64013 Pau cedex, France

^b UMR 5563 LMTG, 14, av. Edouard-Belin, 31400 Toulouse, France

Reçu le 4 mai 2004 ; accepté après révision le 8 novembre 2004

Disponible sur Internet le 26 janvier 2005

Présenté par Michel Durand-Delga

Résumé

Situées actuellement sur le Chevauchement frontal sud-pyrénéen, des failles normales synsédimentaires se développent dans les dépôts continentaux du « Garumnien » (Maastrichtien–Paléocène), ainsi qu'au passage entre les calcaires de plate-forme d'âge Lutétien (formation Guara) et les marnes sus-jacentes de la formation Arguis (Lutétien–Priabonien). Cette tectonique en extension est responsable d'un changement dans la sédimentation carbonatée, avec le dépôt de deux séquences de calcaires laminés associés à des brèches monogéniques. Elle résulterait de la flexure de la plaque ibérique plongeant sous l'Europe. Les failles normales pourraient servir de point de départ aux mégaturbidites se resédimentant plus au nord dans le bassin turbiditique éocène. *Pour citer cet article : Y. Hervouët et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

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

Abstract

Palaeocene to Lutetian extensional faulting and bending of the Iberian plate in the South Pyrenean zone (Aragon, Spain). Close to the South Pyrenean thrust front, synsedimentary normal faults develop in the 'Garumnian' continental deposits (Maastrichtian to Palaeocene) and in the carbonate platform during the Lutetian. During the Lutetian, this deformation is accompanied by a change in the sedimentation characterized by the deposit of two series of laminated limestones associated to monogenetic breccias. These normal faults would have formed at the bending of the Iberian plate subducting under Europe. They may also be considered as the starting point for the megaturbidites that deposited further north in the Eocene turbiditic basin. *To cite this article: Y. Hervouët et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

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

Mots-clés : Failles normales synsédimentaires ; Flexuration ; Paléocène–Lutétien ; Aragon ; Pyrénées

Keywords : Synsedimentary normal faults; Bending; Palaeocene to Lutetian; Aragon; Pyrenees

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : yves.hervouet@univ-pau.fr (Y. Hervouët).

Abridged English version

1. Introduction

The South-Pyrenean foreland basin (e.g., [11,19,23]) developed in response to the continental subduction of the Iberian plate under Europe [4,5,8,17]. First compressional movements initiated in the Late Cretaceous [22], with a main compressional event in the Early Eocene to Early Oligocene [16]. In the western Pyrenees, compression prolonged until the Early Miocene and led to the formation of the South Pyrenean thrust front [18,19,26] bounding the western External Sierras (Figs. 1 and 2).

In the Early Palaeogene (Palaeocene to Lutetian), the South Pyrenean foreland basin is characterized by two main areas of sedimentation and by a progressive migration of the depocentre from north to south. To the south, continental deposits (continental red clays and lacustrine limestones) dated ‘Garumnian’ (Maastriichtian to Palaeocene, [15]) are followed by Lutetian platform limestone (Fm. Guara) (Fig. 3). To the north, the depocentre is filled by thick (more than 4000 m according to authors) terrigenous turbidites. They are associated to carbonate turbidites [10,13], whose origin is still debated, either from the north [3,12,13,21] or from the south [1,2,20]. In the Late Lutetian–Late Eocene time interval, the foreland basin was covered by marly marine formations (Pamplona Fm. to the north and Arguis Fm. to the south).

2. Evidences of extensional movements in the western External Sierras during the Palaeocene–Lutetian time interval

The External Sierras formed above the South Pyrenean thrust front (Fig. 2). Strata are highly deformed and have generally an inverted dip. In this area, synsedimentary normal faults with few centimetres of vertical offset affect the ‘Garumnian’ deposits, along the Río Gallego (San Felices unit, Fig. 4). The Guara Fm. is abnormally thin, with a maximum of 170 m along the Peña Lake, whereas it reaches 800 m a few kilometres to the east [15]. At the southern end of the Río Gallego, this formation is less than 100 m thick and is cut by a series of normal faults when it passes to the Arguis Fm. (Fig. 5). Fault throws are low (metre to few metres) and their N090°E to N130°E trend

is typically that of the Pyrenean structures (Fig. 6). Sedimentological observations show that extensional deformation occurred during the sedimentation. Close to the faults, a massive limestone bed, forming the upper part of the formation, is replaced by an alternation of very thin laminated limestones displaying ripple marks and two sequences of monogenetic breccias that originated from the carbonate platform. These series are topped by a condensed level (50 cm) rich in glauconia and iron oxides. At Fachar (Fig. 2), the thickness of both the upper part of the ‘Garumnian’ and the Guara Fm. progressively decreases when going to the WNW. The Upper ‘Garumnian’ red clay finally disappears and the 1-m-thick Guara Fm. lies directly upon the lacustrine limestones.

3. Discussion and conclusions

Our observation shows that the South Pyrenean extensional event began in the Palaeocene and stopped before the Upper Eocene, as attested by N160°E-trending synsedimentary folds that formed few kilometres to the east [14].

To the north, fault bend folds developed in the turbiditic basin (e.g., [9,13]) during the main Pyrenean compressional event [16]. The development of normal faulting during compression has been described at the outer arc of anticlines, within transtensional relays, at the crustal bending (with or without the development of a forebulge [7]) of subducting plates, or as being related to gravitational collapse of orogens. This later hypothesis can be excluded, because it supposes an important crustal thickening, which is not the case in the study area. The lack of angular unconformity during the Palaeocene to Middle Eocene does not either support the hypothesis of the development of N090°- to N130°E-trending normal faults at the extrados of anticlines striking in the same direction. The lack of synsedimentary strike-slip faults does not allow the formation of transtensional basins. However, the occurrence of a crustal bending in the Iberian plate is consistent with our observations of extensional deformations during the Lutetian. Normal faulting created slopes and currents, forming laminated limestones with ripple marks, and is able to provide breccias over the platform.

The thinning of the Lutetian strata at Fachar shows that this zone was a shallow area that was not sub-

siding at this epoch. Two hypotheses can be put forward: (1) this area constituted the southern edge of the basin during the Palaeocene to Lutetian time interval; (2) the lack of subsidence marks the occurrence of a forebulge trending N110°E, parallel to the belt in formation. This hypothesis agrees with the emersion of the western termination of the External Sierras in the Early Eocene and the thinning of the Lutetian in this area.

Important subsidence in the ENE (Arguis) and in the east (Sierra de Guara), recording the southward migration of the South Pyrenean depocentre, could have been perturbed by the bending of Iberian plate in the western External Sierras. Normal faults, cross-cutting the highest area of the carbonate platform, would have facilitated the dismembering of the platform during the progressive southward emplacement of the talus slope. They may be considered as the starting point for the megaturbidites that deposited further north in the Eocene turbiditic basin.

1. Introduction

Le bassin d'avant-pays sud-pyrénéen (par exemple, [11,19,23]) résulte de la subduction continentale de l'Ibérie sous l'Europe [4,5,8,17] (Fig. 1). Les mouvements compressifs débutent pendant le Crétacé supérieur [22] et se poursuivent, dans la partie occidentale, jusqu'au Miocène inférieur, avec la mise en place du chevauchement frontal sud-pyrénéen [18,19,26], au front des Sierras marginales. La phase pyrénéenne (fin de l'Éocène inférieur à Oligocène inférieur [16]) correspond au stade de déformation maximum sur l'ensemble de la chaîne.

L'avant-fosse sud-pyrénéenne constitue un système de bassins d'avant-pays [7]. Il y a migration du dépo-centre, au cours du temps, du nord vers le sud. Pendant la première partie du Paléogène (Paléocène à Lutétien), les faciès sont tranchés. Au sud-ouest, l'Éocène inférieur est absent : les argiles rouges continentales et les calcaires lacustres du « Garumien » (Maastrich-

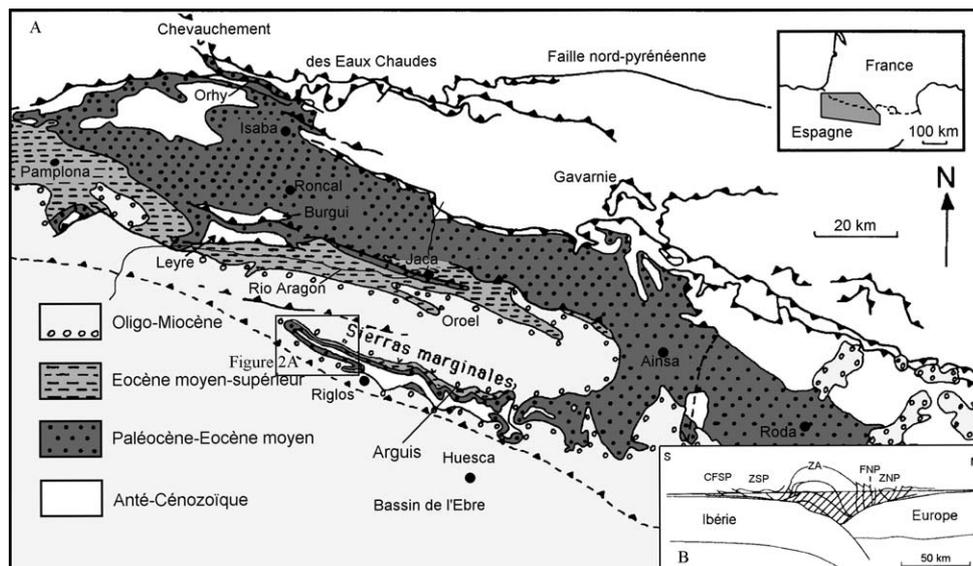


Fig. 1. (A) Carte géologique schématique de la Zone sud-pyrénéenne et sa localisation (encadré) (modifiée d'après [9,13]). 1 : Oligo-Miocène ; 2 : Éocène moyen-supérieur (marnes de Pampelune) ; 3 : Paléocène-Lutétien : (a) calcaires, (b) plaines sous-marines, (c) lobes, (d) chenaux distributaires, (e) faciès fluvio-deltaïques, (f) faciès de pente ; 4 : anté-Tertiaire. (B) Coupe lithosphérique des Pyrénées occidentales passant par l'Aragon (modifiée d'après [24]).

Fig. 1. (A) Schematic geologic map of the South Pyrenean Zone and its location (inset) [9,13], modified. 1: Oligocene-Miocene; 2: Middle to Upper Eocene (Pamplona Marls); 3: Palaeocene-Lutetian: (a) limestones, (b) abyssal plains, (c) lobes, (d) distributary channels, (e) alluvial to deltaic deposits, (f) slope deposits; 4: ante-Cainozoic formations. (B) Cross-section at lithospheric scale of the western Pyrenees (from [24], modified).

tien à Paléocène [15]) sont recouverts directement par une plate-forme carbonatée marine, d'épaisseur variable d'âge Lutétien (formation Guara). Celle-ci est formée de calcaires massifs à alvéolines s'enrichissant progressivement en nummulites. Au nord, le dépôt est approvisionné par des turbidites terrigènes épaisses (plus de 2000 m) perturbées par des arri-

vées de mégaturbidites carbonatées [10,13], dont la provenance est controversée, puisque, pour certains auteurs [3,12,13,21], leur origine est septentrionale, tandis que, pour d'autres [1,2,20], elle est méridionale. Les calcaires de plate-forme méridionaux et les turbidites septentrionales sont recouverts par des formations marines marneuses (formation Pampelune au

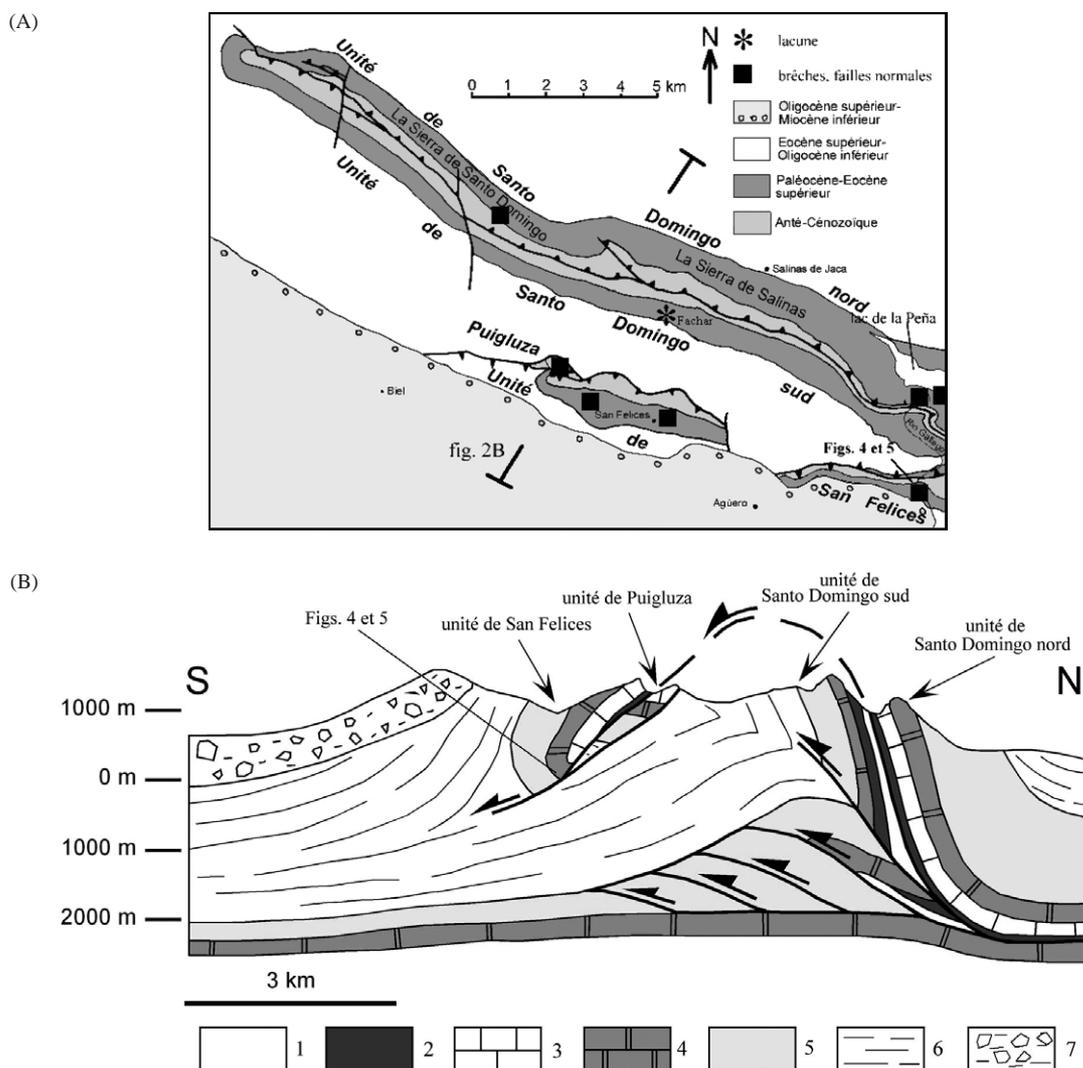


Fig. 2. (A) Carte géologique schématique de la terminaison occidentale des Sierras marginales (modifiée d'après [25]). (B) Coupe géologique de la terminaison occidentale des Sierras marginales (localisation sur la Fig. 2A). 1 : Muschelkalk ; 2 : Keuper ; 3 : Lias ; 4 : Crétacé supérieur à Lutétien ; 5 : Lutétien terminal à Priabonien (formation Arguis) ; 6 : Priabonien–Oligocène inférieur ; 7 : Oligocène supérieur à Miocène inférieur ; Fig. 4 : site projeté de la Fig. 4 ; Fig. 6 : site projeté de la Fig. 6.

Fig. 2. (A) Schematic geologic map of the Western ending of External Sierras [25, modified]. (B) Geological cross section of the western termination of External Sierras (location: Fig. 2A).

nord et formation Arguis au sud) datées de la fin du Lutétien au Priabonien [19].

2. Les indices de distension dans les dépôts Paléocène à Lutétien des Sierras marginales occidentales

Les Sierras marginales se sont formées sur le chevauchement frontal sud-pyrénéen (Fig. 2A). À la terminaison occidentale, les séries sont très déformées (Fig. 2B) et souvent en position inverse [6,15,25]. Les unités de Santo Domingo nord, de Puigluza et de San Felices formaient, avant érosion et plissement, la même entité structurale : elles contiennent toutes les trois du Lias. Leur origine est à rechercher au nord de l'unité de Santo Domingo sud.

Sur le Crétacé supérieur marin (Fig. 3), les dépôts continentaux du «Garumnien» (Maastrichtien–Paléocène) s'installent. Ils ne dépassent pas la centaine de mètres le long du río Gallego. Vers le milieu de

cette formation, des calcaires lacustres (5 à 10 m) s'intercalent. Stratigraphiquement au-dessus des calcaires lacustres, des microfailles normales synsédimentaires (rejets de quelques centimètres) affectent les argiles rouge vif et les grès quartzeux du «Garumnien» le long du río Gallego (unité de San Felices ; Fig. 4).

La sédimentation marine reprend au début du Lutétien (formation Guara) par des dépôts de plage (calcarénites à stratifications obliques ou entrecroisées), suivis par des calcaires massifs de plate-forme.

À la terminaison occidentale des Sierras marginales, l'épaisseur de la formation Guara est anormalement faible : son maximum (170 m) est observé le long du lac de la Peña (unité Santo Domingo nord, Fig. 2A), alors que, quelques kilomètres vers l'est, elle atteint 800 m [15]. À la sortie méridionale des Gorges du río Gallego, dans l'unité de San Felices, elle ne dépasse pas 100 m d'épaisseur et les termes de passage à la formation Arguis sont affectés par des failles normales découpant ces séries en petits horsts et grabens (Fig. 5). Le rejet de ces failles est faible (mé-

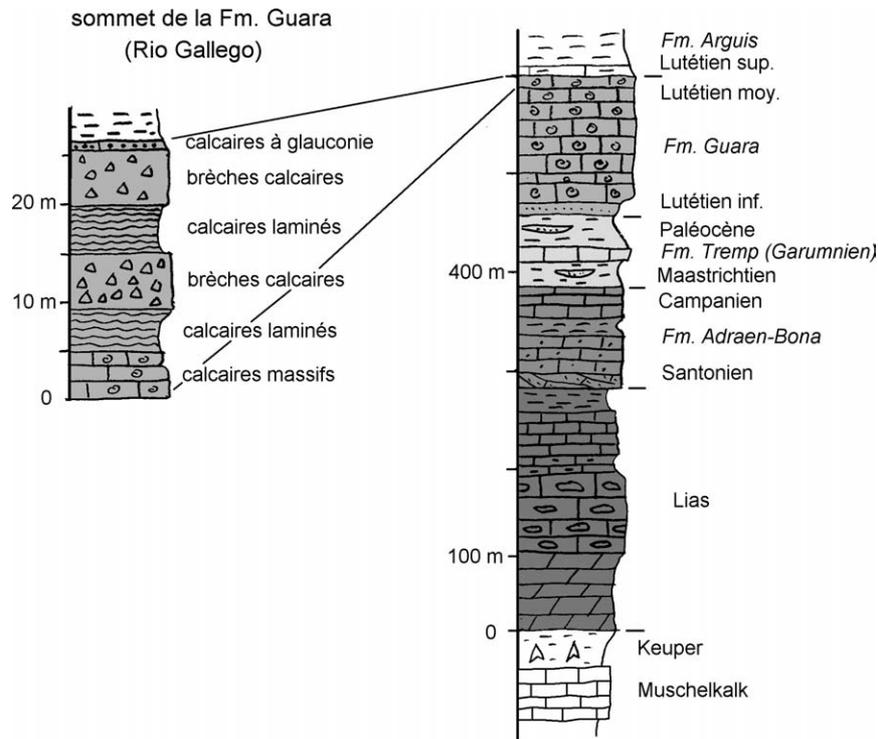


Fig. 3. Colonne stratigraphique synthétique des Sierras marginales occidentales (modifiée d'après [15]).

Fig. 3. Synthetic stratigraphic columnar section of the western External Sierras (modified from [15]).

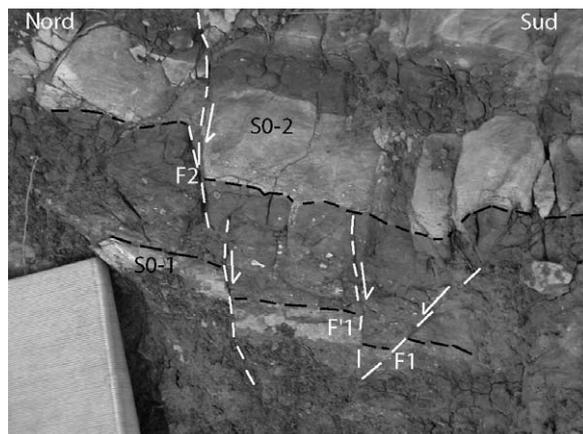


Fig. 4. Microfailles normales affectant le « Garumnien » le long du río Gallego (localisation sur la Fig. 2A). Le banc de grès S0-2 fossilise les microfailles F1 et F'1. Pour plus de lisibilité, les bancs étant à l'envers, la photographie a été renversée.

Fig. 4. Normal micro-faults affecting the 'Garumnian' along the Gallego River (location in Fig. 2A). The S0-2 sandstone bed fossilizes the F1 and F'1 micro-faults.

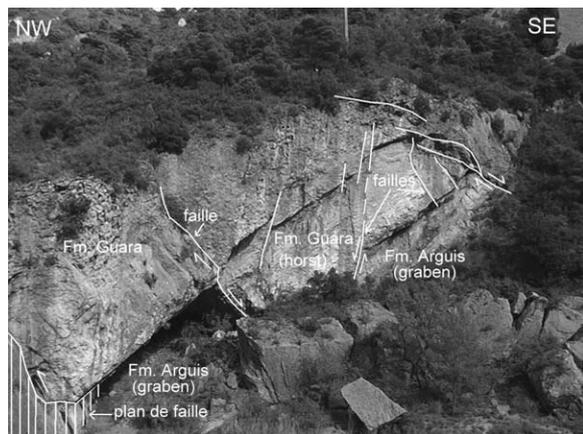


Fig. 5. Failles normales affectant les formations de Guara et d'Arguis le long du río Gallego (flanc inverse; localisation sur la Fig. 2A).

Fig. 5. Normal faults affecting the Guara and Arguis formations along the Gallego River (inverse limb, location in Fig. 2A).

trique à plurimétrique) et leur direction après remise à l'horizontale de la stratification (Fig. 6) est typiquement pyrénéenne (N090°E à N130°E). Le caractère synsédimentaire de cette déformation en extension est synsédimentaire, comme l'attestent des perturbations importantes au sein de la sédimentation.

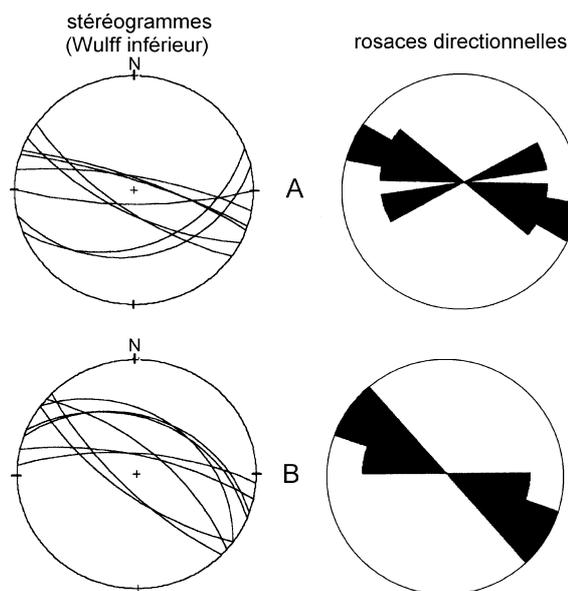


Fig. 6. Direction des failles normales dans le Lutétien. (A) Actuel; (B) avant le plissement pyrénéen.

Fig. 6. Strike of the Lutetian normal faults. (A) Present; (B) before the Pyrenean folding.

En effet, dans les vingt derniers mètres de la formation Guara, à proximité des failles normales, les calcaires massifs à alvéolines et nummulites disparaissent. Ils sont remplacés par une alternance de calcaires laminés très fins, présentant des rides de courant et deux niveaux de brèches monogéniques issues d'un remaniement in situ de la plate-forme carbonatée (Fig. 3). Le passage à la formation Arguis se fait par un niveau de condensation (50 cm) riche en glauconie, oxydes de fer et tests de lamellibranches. Les brèches monogéniques se retrouvent (Fig. 2) plus au nord sur la rive gauche du lac de la Peña, à l'ouest à San Felices et au nord-ouest, dans la sierra de Santo Domingo. La première séquence bréchique atteint une dizaine de mètres d'épaisseur, alors que la seconde dépasse 40 m. Le sommet de la formation Guara est masqué par les eaux du lac. Plus à l'ouest, à San Felices, la végétation dense ne permet pas d'évaluer l'épaisseur des brèches monogéniques. Ces brèches sont visibles jusque sur la sierra de Santo Domingo. Vers l'est, les conditions d'affleurement ne permettent pas d'observer le passage latéral entre ces dépôts perturbés et la plate-forme stable.

Dans l'unité de Santo Domingo sud, la formation Guara est particulièrement réduite. À Fachar, la partie

supérieure des argiles rouge vif du « Garumnien » et la formation Guara diminuent progressivement d'épaisseur en se dirigeant vers l'WNW. Les argiles « garumniennes » finissent par disparaître et la formation Guara, réduite à 1 m d'épaisseur, repose directement sur les calcaires lacustres du « Garumnien ».

3. Discussion et conclusions

Les observations à Fachar et le long du río Gallego montrent que l'épisode extensif sud-pyrénéen débute dès le Paléocène. Cette extension est antérieure aux plis synsédimentaires au N160°E qui affectent la formation Arguis (Lutétien à Priabonien), quelques kilomètres à l'est [14]. De plus, ce phénomène extensif n'est pas limité à l'extrémité occidentale des Sierras marginales. Plus à l'est, près de la localité de Roda (Fig. 1A), les grès de l'Éocène inférieur sont découpés par des failles normales de directions voisines de celles mesurées le long du río Gallego. Ici, les failles sont postérieures à la sédimentation de l'Éocène inférieur (Éocène moyen?). À la même époque, plus au nord, des plis sur propagation de rampe se forment dans le bassin turbiditique (par exemple, [9,13]). Ils correspondent à la phase pyrénéenne paroxysmale [16].

Le développement de failles normales en contexte compressif est décrit notamment dans certains contextes : à l'extrados des anticlinaux, dans des relais trans-tensifs, au droit des flexures crustales des plaques subduites, ou comme étant lié à l'effondrement gravitaire des chaînes de montagnes. Cette dernière hypothèse peut être écartée immédiatement, car elle suppose un épaissement important de la croûte, ce qui n'est pas le cas de la région étudiée [4,5]. L'absence de discordance synsédimentaire dans le Paléocène–Éocène moyen empêche de considérer que les failles normales orientées N090°–130°E prennent naissance à l'extrados d'anticlinaux de même direction. L'absence de décrochements dans le secteur fonctionnant pendant la sédimentation conduit aussi à abandonner l'idée du développement de bassins transtensifs. Seule l'hypothèse de la flexure de plaque reste compatible avec les observations. La direction de cette flexure est parallèle à celle de la chaîne en formation, associée avec des failles orientées N090°–N130°E. Le jeu de ces accidents, apparaissant à l'extrados de la flexure de la plaque ibérique, (1) déstabilise la plate-forme et

conduit à l'apparition de brèches dans le sédiment non induré, soit par éboulement le long des reliefs, soit par remaniement in situ (brèches), et (2) crée des pentes et donc des courants responsables du dépôt de calcaires laminés à rides de courants. Dans l'unité de Santo Domingo sud, d'origine plus méridionale, l'amincissement des séries est particulièrement important. Elle correspond à une région en relief relatif, du Paléocène au Lutétien. Deux hypothèses peuvent être envisagées : (1) cette région représente le bord méridional du bassin d'avant-pays à cette époque ; (2) l'absence de dépôts pendant l'Éocène inférieur et l'amincissement notable du Lutétien s'expliquent par la présence d'un bourrelet périphérique (*forebulge* [7]), orienté en moyenne N110°E, parallèlement à la chaîne en formation. Ce bourrelet permet d'expliquer la présence d'une zone haute au niveau de la terminaison occidentale des Sierras marginales durant cette période. Au sud, l'enfouissement des séries de même âge sous plus de 4000 m d'Oligo-Miocène ne permet pas de connaître les épaisseurs et les faciès sédimentologiques de l'Éocène inférieur et moyen, dans ce qui serait alors le bassin périphérique (*back bulge* [7]). Dans le cas où ces dépôts seraient absents, il faudrait privilégier la première hypothèse.

Les fortes subsidences enregistrées à l'est (Arguis) et à l'ESE (sierra de Guara), annonciatrices de l'avancée vers le sud du dépointe sud-pyrénéen, ont pu être contrariées par l'apparition de la flexure de la plaque ibérique, à la terminaison occidentale des Sierras marginales. Les failles normales, en découpant la plate-forme carbonatée sur une zone haute, faciliteraient le détachement de panneaux de plate-forme lors de l'installation postérieure du talus par avancée du bassin vers le sud. Ces observations confirmeraient donc la provenance méridionale des mégaturbidites du bassin turbiditique [1,2,20] en apportant un argument mécanique à leur désolidarisation de leur patrie d'origine.

Références

- [1] A. Barnolas, A. Teixell, La cuenca surpirenaica de Jaca como ejemplo de cuenca de antepais marina profunda con sedimentacion carbonatica en el margen distal, in: Simposio Geologia de los Pirineos, III Congr. Geol. España, Salamanca, vol. 2, 1992, pp. 205–214.
- [2] A. Barnolas, A. Teixell, Platform sedimentation and collapse in a carbonate-dominated margin of a turbiditic foreland basin

- (Jaca Basin, Eocene, southern Pyrenees), *Geology* 22 (1994) 1107–1110.
- [3] P. Camara, J. Klimowitz, Interpretación geodinámica de la vertiente centro-occidental surpirenaica (cuencas de Jaca-Tremp), *Estud. Geol.* 41 (1985) 381–404.
- [4] P. Choukroune, The ECORS deep reflection seismic survey across the Pyrenees, *Nature* 331 (1988) 508–510.
- [5] P. Choukroune, the ECORS team, The Ecos Pyrenean deep seismic profile reflection data and the overall structure of an orogenic belt, *Tectonics* 8 (1989) 23–39.
- [6] P. Choukroune, L.M. Ríos, La structure des Pyrénées, *Bull. Centres Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine* 3 (excursion 43) (1980) 197–232.
- [7] P.G. DeCelles, A. Giles, Foreland basins systems, *Basin Res.* 8 (1996) 105–123.
- [8] P. Desegaulx, F. Roure, A. Villein, Structural evolution of the Pyrenees: tectonic inheritance and flexural behaviour in the continental crust, *Tectonophysics* 182 (1990) 211–225.
- [9] Y. Hervouët, M. Al Saffar, Les plis d'amortissement de deuxième génération : essai de quantification de la déformation sur le flanc sud des Pyrénées occidentales (Espagne), *Bull. Soc. géol. France* 165 (2) (1994) 123–134.
- [10] D.R. Johns, E. Mutti, J. Rosell, M. Séguret, Origin of a thick, redeposited carbonate bed in Eocene turbidites of Hecho Group, South-Central Pyrenees, *Geology* 9 (1981) 161–164.
- [11] P. Labaume, Évolution tectono-sédimentaire et mégaturbidites du bassin turbiditique éocène sud-pyrénéen (entre les transversales col du Somport-Jaca et pic d'Orhy-Sierra de Leyre), thèse de 3^e cycle, USTL, Montpellier, 1983, 170 p.
- [12] P. Labaume, E. Mutti, M. Séguret, Megaturbidites: a depositional model from the Eocene of the SW Pyrenean Foreland Basin, in: L.J. Doyle, R. Bourrouilh (Eds.), *Megaturbidites*, *Geo-Mar. Lett.* 7 (1987) 91–101.
- [13] P. Labaume, E. Mutti, M. Séguret, J. Rosell, Mégaturbidites carbonatées du bassin turbiditique de l'Eocène inférieur et moyen sud-pyrénéen, *Bull. Soc. géol. France* 25 (6) (1983) 927–942.
- [14] H. Millan, M. Aurell, A. Melendez, Synchronous detachment folds and coeval sedimentation in the Pre-Pyrenean External Sierras (Spain): a case study for a tectonic origin of sequences and system tracts, *Sedimentology* 41 (1994) 1001–1024.
- [15] H. Millan Garrido, A. Pocovi Juan, A.M. Casas Sainz, El frente de cabalgamiento surpirenaico en el extremo occidental de las Sierras Exteriores, *Rev. Soc. Geol. España* 8 (1–2) (1995) 74–89.
- [16] P. Mirouse, Les Pyrénées, *Bull. Centres Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine* 3 (1980) 28–39.
- [17] J.A. Muñoz, Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees crustal balanced cross-section, in: K.R. McClay (Ed.), *Thrust Tectonics*, Chapman & Hall, 1992, pp. 235–246.
- [18] H. Nuñez del Prado, Systèmes de dépôts et évolution sédimentaire des séries de transition marin-continentale dans le synclinal de Guarga (bassin sud-pyrénéen, province de Huesca, N-Espagne), thèse de 3^e cycle, université de Pau, 1986, 358 p.
- [19] C. Puigdefabregas, La sedimentación molásica en la Cuenca de Jaca, *Pirineos*, Jaca 104 (1975) 1–188.
- [20] C. Puigdefabregas, N.A. Rupke, J. Solesedo, The sedimentary evolution of the Jaca basin, in: *Int. Ass. Sedim., 9th Int. Congr.*, Nice, 1975, p. 33.
- [21] M. Séguret, P. Labaume, R. Madariaga, Eocene seismicity in the Pyrenees from megaturbidites in the south Pyrenean basin, *Mar. Geol.* 55 (1984) 117–131.
- [22] P. Souquet, J. Déramond, Séquence de chevauchements et séquences de dépôt dans un bassin d'avant-fosse. Exemple du sillon crétacé du versant sud des Pyrénées (Espagne), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 309 (1989) 137–144.
- [23] A. Teixell, Estructura alpina en la transversal de la terminación occidental de la Zona Axial pirenaica, thèse, université de Barcelone, Espagne, 1992, 252 p.
- [24] A. Teixell, Crustal structure and orogenic material budget in the west central Pyrenees, *Tectonics* 17 (3) (1998) 295–406.
- [25] A. Teixell, J. Garcia-Sansegundo, Estructura del sector central de la Cuenca de Jaca (Pirineos meridionales), *Rev. Soc. Geol. España* 8 (3) (1995) 215–228.
- [26] J.P. Turner, Structural and stratigraphic evolution of the West Jaca thrust-top basin, Spanish Pyrenees, *J. Geol. Soc. Lond.* 147 (1990) 177–184.