

## KARST ET EXTENSIONS GRAVITAIRES D'ALTITUDE : LE MASSIF DU JAOUT (PYRÉNÉES OCCIDENTALES - FRANCE)

Stéphanie KLARICA<sup>1,2</sup>, Yves HERVOUET<sup>1</sup> et Jacques BAUER<sup>3</sup>

(8 figures, 2 tableaux)

1. UMR 5831 Imagerie Géophysique, CURS-IPRA, Av. de l'Université, 64000 PAU, FRANCE. e-mail: yves.hervouet@univ-pau.fr
2. adresse actuelle: Escuela Ingenieria de Geologia, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. e-mail: klarica@ing.ula.ve
3. Chemin du Bois, 64800 NAY-BOURDETTES, FRANCE.

**RÉSUMÉ.** La compréhension des circulations d'eau au sein d'un réservoir karstique passe par la connaissance précise du réseau fissural. Nous avons mené une étude de ce réseau sur le massif du Jaout. Le relevé des fractures a été effectué à partir d'une image SPOT et de photographies aériennes ainsi que directement sur le terrain. Parallèlement, l'étude microtectonique du massif a été entreprise. Dans la zone étudiée située à proximité immédiate de la faille nord-pyrénéenne, les mouvements dus à la phase majeure pyrénéenne (Eocène-Miocène inférieur) ont effacé les traces de mouvements antérieurs. Ainsi, nous n'avons pu déterminer sur le terrain que les phases cénozoïques (phase pyrénéenne sub-méridienne, compression ENE-WSW à E-W et compression NW-SE). En altitude, des phénomènes récents purement distensifs sont générés par de l'extension multidirectionnelle gravitaire. En ouvrant les fractures préexistantes, les phénomènes gravitaires tiennent un rôle important dans l'écoulement des eaux au niveau de l'exokarst, la karstification s'établissant préférentiellement dans les fractures tectoniquement actives.

### MOTS-CLÉS:

karst, Urgonien, fracturation, extension gravitaire, Récent, France, Pyrénées occidentales.

### ABSTRACT. High altitude karst and horizontal gravity extensions: the Jaout massif (western Pyrenees, France).

The fracture network has to be well-defined to better understand the subsurface water circulation in a karstic aquifer. We therefore carried out a study of the fracture network on the Jaout massif in the Western Pyrenees (France). This karstic massif, developed in the Urgonian limestones, represents an important aquifer with an area of 40 km<sup>2</sup>. We first analyzed the fracture network by remote sensing (SPOT image and aerial photographs) to define the kilometeric to hectometric scale. We also recovered field measurements to define the metric to decimetric scale. When the fault planes were striated, we have measured for each fault: strike, dip, sense of dip, pitch of striations, sense of pitch and sense of movement. By this microtectonic study, all the determined fracture families can be linked to tectonic events. Along the North Pyrenean Fault, the major Pyrenean events (Eocene-early Miocene event) erased all previous evidence of movement: we only determined on the massif Jaout this event (submeridional shortening) and the two following phases (the ENE-WSW to EW compression and the recent NW-SE shortening). We also determined at high altitudes important horizontal extensions associated with superficial gravity phenomena. Water circulation in the upper part of this karstic reservoir can be explained by this contemporaneous extension. Our data underline the relationship between karstification and recent tectonic events.

### KEYWORDS:

karst, Urgonian, fracture network, gravity extensions, Recent, France, Western Pyrenees.

### 1. Importance de la fracturation pour la connaissance du milieu karstique

La "fracturation" regroupe, en géologie, l'ensemble des surfaces de rupture des roches (failles, diaclases, joints...) ayant des origines souvent différentes. Ces discontinui-

tés définissent le réseau de fissures de la masse rocheuse. En hydrogéologie, il faut aussi tenir compte de la notion d'utilité (ou de fissure utile), puisque c'est elle qui représente la capacité de la fissure à laisser s'écouler les fluides (perméabilité). Au cours de l'évolution du processus de karstification, une sélection naturelle des fissures les

plus larges se met en place et permet l'ouverture de gros drains à partir des petites fissures, conformément à une organisation régie par le gradient hydraulique du moment (Mangin, 1975).

On a longtemps pensé que le réseau de fissures dirigeait les écoulements sans se soucier de l'histoire géologique des différentes formes de fissures. Pourtant, des études récentes (Quinif *et al.*, 1997; Hervouët, 1997) montrent qu'une distension contemporaine de la karstification joue un rôle important dans l'élaboration du schéma final. La compréhension des circulations d'eau au sein d'un réservoir karstique passe donc par la connaissance précise de la fracturation, de son organisation dans l'espace et dans le temps, et des relations qui existent entre ces fissures (drains et systèmes annexes).

Nous avons mené une étude du réseau de fissures à différentes échelles d'observation sur un exemple naturel: le massif du Jaout (Pyrénées occidentales, France) dont les différentes cavités ont été recensées récemment par Delaître (1997). Ce massif est caractérisé par une ossature de roches carbonatées du Crétacé inférieur (Urgonien). Un premier relevé des fissures a été effectué sur une image SPOT Panchromatique et sur des photographies aériennes. Parallèlement aux données de télédétection, nous avons effectué un relevé sur le terrain du pendage de toutes les surfaces planes témoignant d'une fracturation de la roche. De plus, l'étude microtectonique à l'échelle de l'affleurement a permis de définir les différentes familles de fractures, leurs jeux et le rôle qu'elles tiennent dans l'élaboration de la structure régionale lors des différentes phases tectoniques. Environ 2000 mesures de la fracturation sont disponibles; plus de trois cents cas montrent des traces de mouvement.

## 2. Le massif du Jaout : un aquifère karstique important

### 2.1. Localisation géographique

Le massif du Jaout se situe dans la partie orientale des Chaînes Béarnaises des Pyrénées occidentales (Fig. 1). Il est limité au sud par une dépression passant par les cols d'Agnoures et de Louvie. Sa bordure nord s'étend géographiquement jusqu'à la limite entre le "pays du flysch" et les "chaînes calcaires". A l'ouest le massif est limité par le gave d'Ossau, à l'est par la vallée de l'Ouzom (Fig. 2).

Le Pic du Moule de Jaout culmine à 2050 m. Le col de Jaout (1500 m) sépare une zone occidentale d'une zone orientale en deux parties sensiblement égales. Les émergences de ce massif sont situées au niveau des vallées d'Ossau (côte entre 440 et 490 m) et de l'Ouzom (côte 600 m).

En vallée de l'Ouzom, une seule grosse émergence est à prendre en compte (source d'Aygueblaque; côte 600 m, impénétrable, pérenne). Cette source se situe sur le prolongement de la partie orientale de l'axe du synclinal de Jaout.

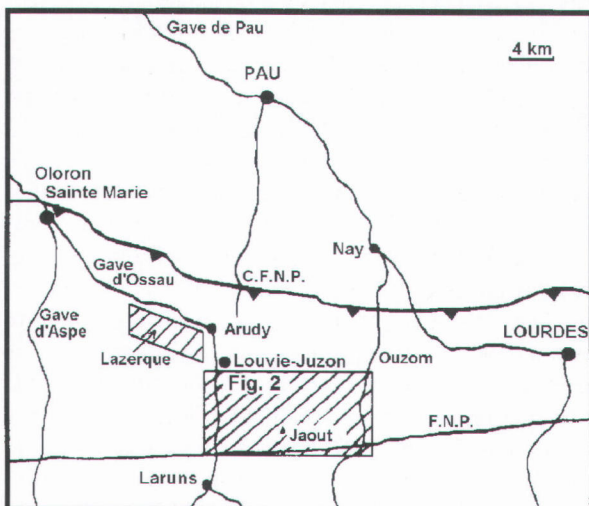
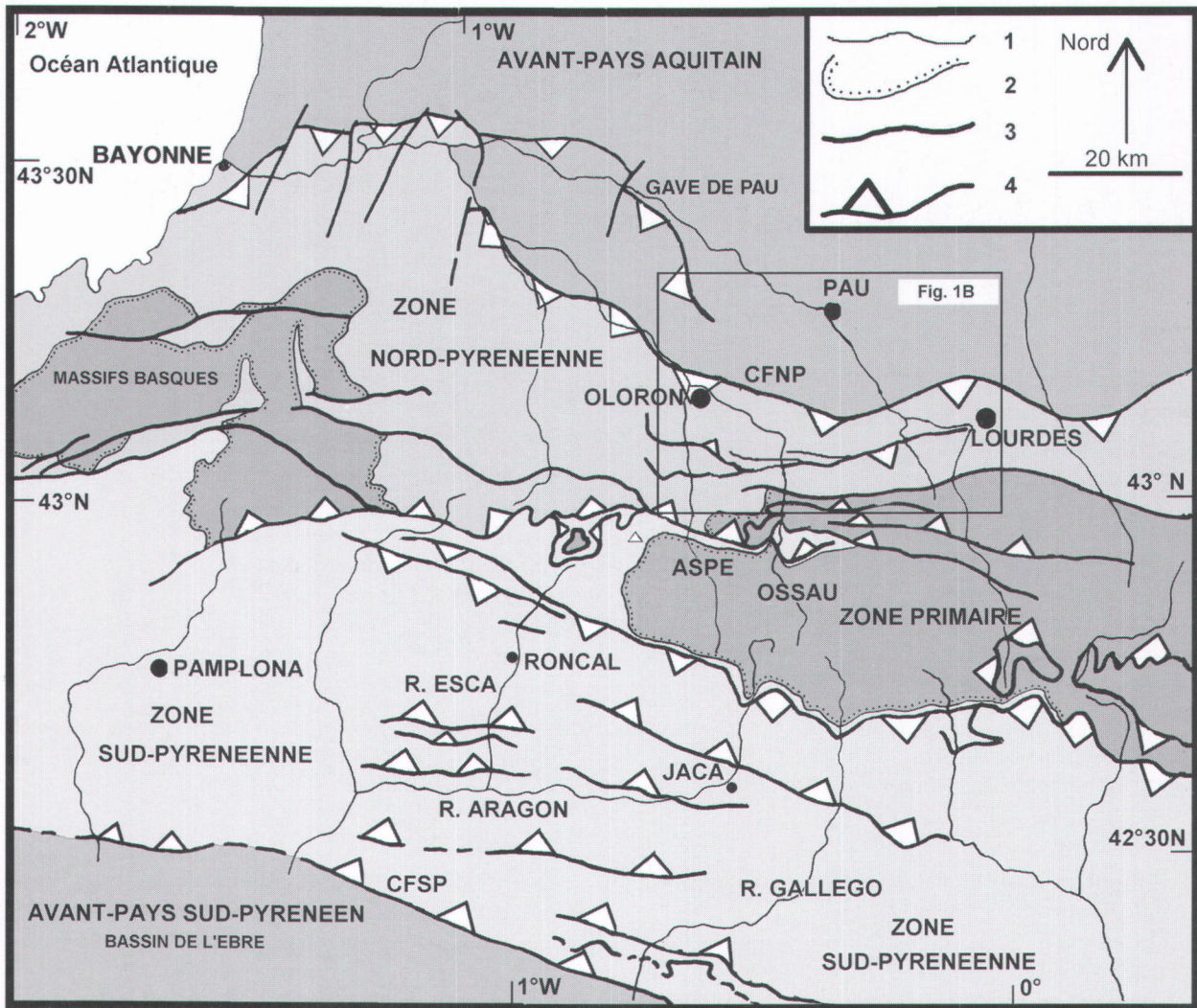
En vallée d'Ossau, les émergences étudiées se succèdent de l'amont vers l'aval (Fig. 3):

- les sources de l'Oasis (côte 450 m, impénétrables, pérennes) sont situées sur le prolongement de la partie occidentale de l'axe du synclinal de Jaout;
- les sources de Béon (ou Miédougé, côte 450-455 m, impénétrables, pérennes) sont représentées par plusieurs griffons sortant des éboulis au pied de la falaise calcaire du Pène de Béon;
- la source Saint-Julien (côte 440-445 m, impénétrable, pérenne) dite aussi source du Lescu émerge au pied de la falaise du Port de Béon;
- l'émergence de la grotte Crampé (côte 490 m, pénétrable, temporaire) est située au-dessus de la source Saint-Julien sur la falaise du Port de Béon. Ce regard de trop-plein peut devenir violent en période de crue;
- la source aux Fées (côte 470 m, pénétrable, pérenne) est une source vaclusienne captée au profit de la commune de Castet. Le conduit ennoyé a été pénétré à ce jour jusqu'à -72 m. Il plonge de 30° vers le sud avec un azimut N170°E.

### 2.2. Cadre géologique (Fig. 2)

Le massif du Jaout est essentiellement constitué par des formations sédimentaires d'âge crétacé inférieur (Fig. 2).

- i) Les formations du Quaternaire sont présentes dans les vallées. Ce sont principalement des éboulis ou des dépôts de remaniement, des alluvions subactuelles et du Würm, des dépôts glaciaires non datés, des vallum et moraines du Riss.
- ii) Les formations de l'Albien sont constituées de marnes schisteuses noires, à spicules, attribuées à l'Albien (c1, marnes de "Saint Palais"). Dans le cœur du synclinal de Jaout, leur épaisseur peut atteindre 600 m.
- iii) Les formations de calcaires massifs subécifaux (n6) de l'Aptien supérieur constituent le réservoir étudié. Ce sont des calcaires clairs à faciès urgonien, épais d'environ 400 mètres et contenant de nombreux rudistes du genre *Toucasia*. Ces calcaires forment les principales crêtes du massif. Sur le flanc sud du synclinal de Jaout (Fig. 3), on peut suivre un contact stratigraphique très net entre les calcaires et les marnes schisteuses. Par contre sur le flanc nord, la transition se fait par passages latéraux de faciès. L'épaisseur de la série calcaire varie entre les flancs nord (600 m) et sud (430 m) du synclinal de Jaout.
- iv) Les marnes gréseuses de l'Aptien inférieur (Bédoulien) dites "marnes de Sainte Suzanne" (n5) sont finement litées, gris bleuté à roux. On y trouve des passées plus carbonatées à Orbitolines. Cet ensemble im-



**Figure 1:** (1): Cadre géologique général des Pyrénées occidentales, et (2): position géographique du secteur étudié (C.F.N.P.: Chevauchement Frontal Nord-Pyrénéen; F.N.P.: Faille Nord-Pyrénéenne; C.F.S.P.: Chevauchement Frontal Sud-Pyrénéen).

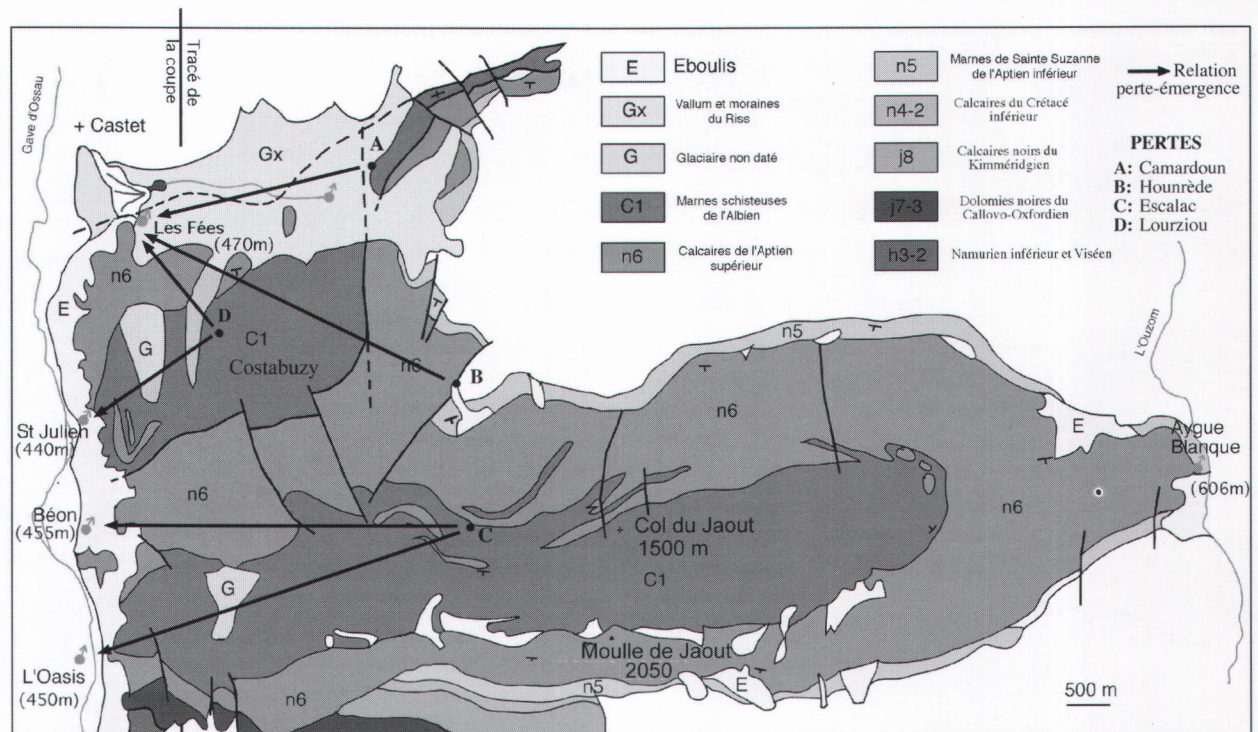
**Figure 1:** General geological map of Western Pyrenees (1) and location of the studied area (2). C.F.N.P.: North Pyrenean Thrust Front; F.N.P.: North Pyrenean Fault; C.F.S.P.: South Pyrenean Thrust Front.

perméable sous-jacent aux calcaires urgoniens est bien représenté dans la partie orientale du massif du Jaout. Son épaisseur varie ici de 50 à 250 m. Il est totalement absent à l'affleurement dans la partie la plus occidentale: l'Urgonien y est discordant et vient recouvrir directement le Callovo-Oxfordien (Fig. 2). Cette discordance est due

à la fragmentation en blocs basculés de la marge ibérique septentrionale au passage Jurassique-Crétacé inférieur et correspond au début du rifting du Golfe de Gascogne (Canérot & Lenoble, 1993).

v) Les formations carbonatées du Crétacé inférieur et du Jurassique (calcaires et dolomies) non étudiées ici, représentent aussi un fort potentiel hydrologique en tant que réservoir fissuré voire karstique. Elles comprennent:

- les formations calcaires du Valanginien au Barrémien (n4-2);
- les formations du Jurassique qui regroupent les calcaires noirs (j8) du Kimméridgien et les dolomies noires (j7-3) du Callovo-Oxfordien



**Figure 2:** Carte géologique du massif du Jaout (d'après Castéras, 1970a, 1970b, modifiée). Carte de synthèse des tracés artificiels effectués sur le massif du Jaout.

**Figure 2:** Geological map of the massif of the Jaout (after Castéras, 1970a, 1970b, modified).

vi) Des ophites attribuées au Trias pointent au niveau du village d'Aste.

A Aste, les ophites, les dolomies callovo-oxfordiennes ainsi que les calcaires urgoniens sont affectés par le métamorphisme pyrénéen, bien marqué au contact de la Faille Nord-Pyrénéenne.

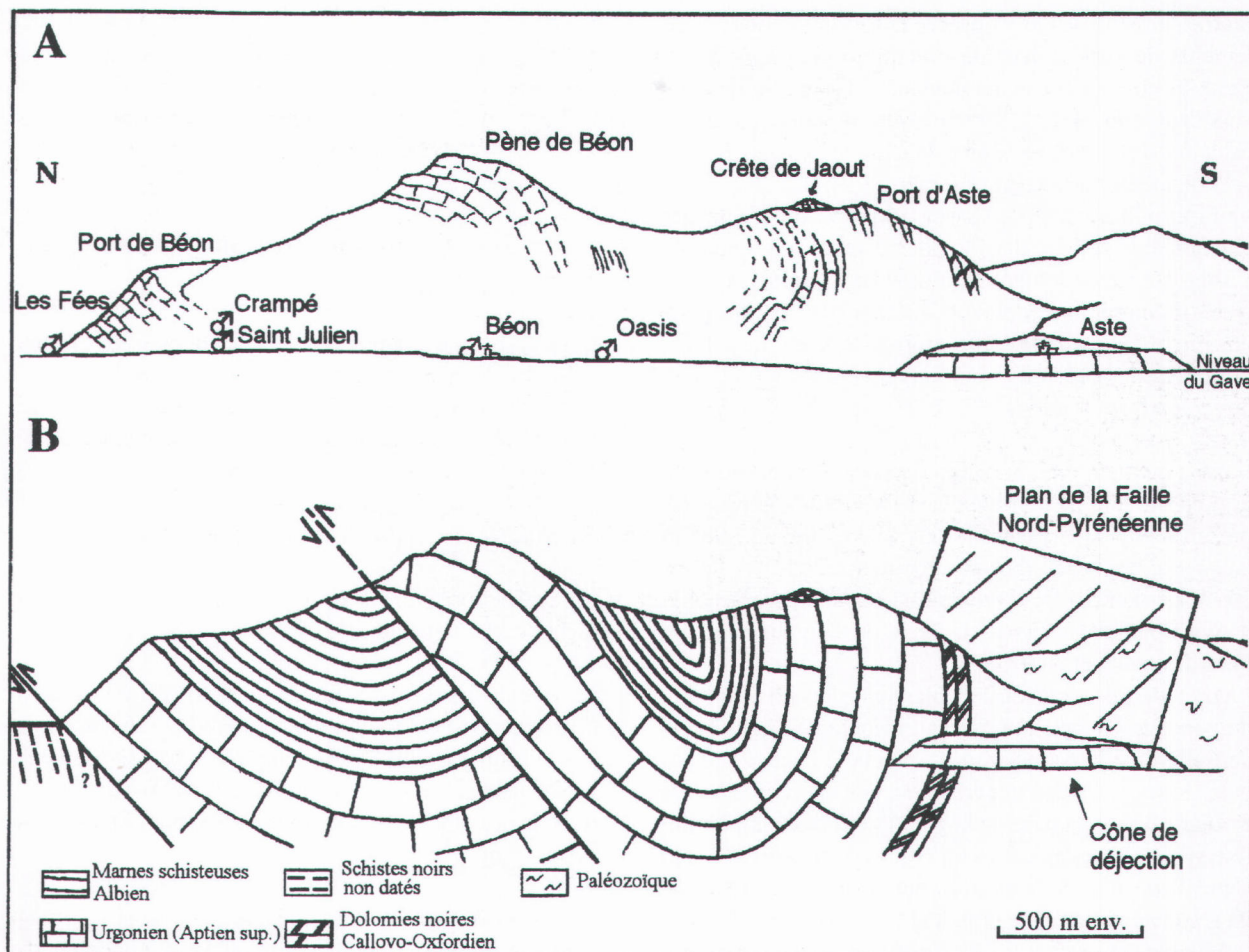
### 2.3. Cadre structural

Le massif du Jaout appartient à la Zone Nord-Pyrénéenne. Sa bordure méridionale est bordée par la Faille Nord-Pyrénéenne. Le système de plis déversés vers le nord qui le compose définit les synclinaux dissymétriques E-W du Jaout et de Costabuzzy, et est associé à des failles inverses chevauchantes vers le nord (Fig. 2 et 3). Dans la partie orientale, le synclinal de Costabuzzy passe à une structure anticlinale complexe et faillée, où la qualité des affleurements est très médiocre et n'a donc pu être étudiée en détail. Cette structure anticlinale est responsable de l'écoulement vers l'ouest d'une partie des eaux circulant au sein du réservoir karstique.

La structuration des Chaînon Béarnais s'effectue au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque (Martin, 1992; Umbhauer *et al.*, 1994; Hervouët *et al.*, 1996). Elle débute au Lias avec un découpage régional selon des accidents N-S et E-W. Une tectonique de blocs se met en place avec une direction d'extension E-W: les accidents N-S jouent alors en failles normales et les accidents E-W

en failles décrochantes. Au Bajocien, ce jeu de blocs cesse, et ne reprend qu'au Malm (Umbhauer *et al.*, 1994) avec à nouveau une tectonique en extension correspondant aux prémices de l'ouverture du Golfe de Gascogne. A l'Albien (Umbhauer *et al.*, 1994), les contraintes régionales changent: l'orientation de la direction d'extension est alors N-S, orthogonale à celle du Jurassique. Les failles N-S deviennent alors des accidents relativement passifs et les accidents E-W des failles normales actives.

Avec le début de l'orogénèse pyrénéenne, au cours du Crétacé supérieur (Souquet & Déramond, 1989; Vergès & Muñoz, 1990; Déramond *et al.*, 1993), la Zone Nord-Pyrénéenne passe d'un régime de contrainte globalement distensif à un régime compressif. Celui-ci est généralement orienté NNE-SSW. Cependant dans notre région d'étude entre la vallée d'Aspe à l'ouest et la vallée de Lourdes à l'est (Fig. 1), les plis sont orientés N70°E à N90°E impliquant une orientation locale de la compression NNW-SSE à N-S. Les failles qui affectent ce plissement montrent une direction maximale de raccourcissement orientée N-S à NNE-SSW rejoignant la direction pyrénéenne générale. Le plissement majeur étant attribué en Zone Nord-Pyrénéenne occidentale au Lutétien (Mirouse, 1980), cette "normalisation" de la contrainte pyrénéenne pourrait intervenir au cours de l'Éocène moyen terminal - Éocène supérieur. Les anciennes failles normales de direction E-W sont réactivées en failles inverses chevauchantes (Umbhauer *et al.*, 1994).



**Figure 3:** Panorama (A) et coupe interprétative (B) de la partie occidentale du massif du Jaout illustrant la disposition générale de la structure plissée.

**Figure 3:** View (A) and cross-section (B) of the massif of the Jaout.

La compression NNW-SSE apparaît comme postérieure à la phase majeure pyrénéenne (Martin, 1992; Hervouët, 1997; Rocher *et al.*, 1998). Cette postériorité est confirmée par les études effectuées sur le flanc sud des Pyrénées: elle débiterait dans l'Oligocène supérieur (Thomas et Delfaud, 1990) et correspondrait à un changement global (Klitgord et Shouten, 1986) de cinématique. Cette nouvelle orientation est relevée en Aquitaine (Rocher *et al.*, 1998) et dans les Pyrénées occidentales (Hervouët *et al.*, 1996). De nombreux mécanismes aux foyers des séismes de la ligne Arrette-Arudy (Modiano, 1980; Gagnepain *et al.*, 1980; Gagnepain-Beinex *et al.*, 1982) ainsi que des études régionales (Bell *et al.*, 1992; Grellet *et al.*, 1993; Ribeiro *et al.*, 1996) montrent que la compression NNW-SSE se poursuit actuellement. Aujourd'hui encore, la région présente une activité sismique soutenue (séisme d'Arudy du 29 février 1980, Gagnepain *et al.*, 1980; Grandjean *et al.*, 1994) qui se traduit par des mouvements verticaux importants, mesurés en particulier au niveau du col de Jaout (Ruegg & Kasser, 1983).

Dans les Pyrénées et en Aquitaine, une compression ENE-WSW est relevée. Pour Rocher *et al.* (1998), il s'agit de la compression pyrénéenne NNE-SSW déviée à proximité d'accidents N160°E. Dans les Pyrénées (Martin, 1992; Hervouët, 1997), cette compression semble devoir être séparée de la compression pyrénéenne. Nous reviendrons sur ce problème lors de l'examen des résultats de l'étude microtectonique (§ III, B, 2).

#### 2.4. Cadre hydrogéologique

Le massif du Jaout est un aquifère karstique bien alimenté. Tout cours d'eau venant d'un autre système étant inexistant sur le massif, son alimentation est assurée en totalité par les seuls apports météoriques (pluie et neige). La pluviométrie n'a jamais été mesurée sur le massif. Il existe une station météorologique à proximité, à Laruns en vallée d'Ossau (altitude 523 m) où les précipitations moyennes annuelles sont de 1740 mm. L'infiltration est essentiellement diffuse sur la totalité des calcaires urgoniens, et présente un caractère concentré au niveau des

marnes albiennes. On y observe la formation de ruissellements de surface lors de précipitations importantes. Ceux-ci convergent généralement vers des dolines, ou vers des pertes dès qu'ils retrouvent le contact avec les calcaires urgoniens sous-jacents. Une seule zone de ruissellement temporaire est observée en surface (Fig. 2): la Lau qui naît au port de Castet, ruisselle sur les argiles glaciaires, et se jette dans le gave d'Ossau en amont de Castet. Ce ruissellement peut devenir important lors de fortes précipitations (débit estimé supérieur à 300 l/s lors des pluies du 26/07/96) et permet d'évacuer un volume important des précipitations sans transit dans l'aquifère des calcaires urgoniens.

L'ossature du massif du Jaout constitue un aquifère karstique d'un volume conséquent: l'impluvium général représente une superficie de 40 km<sup>2</sup>. Les traçages artificiels (Fig. 2) et les mesures hydrochimiques (Klarica, 1997) permettent de montrer que les sources pérennes d'Aygueblanque, d'Oasis, de Béon, de Saint-Julien et des Fées drainent cet aquifère.

La direction générale des écoulements dépend avant tout du pendage du substratum imperméable de l'aquifère et de l'allure de la surface topographique à l'échelle régionale. Ainsi, le niveau imperméable des marnes de Sainte Suzanne définit la base de la gouttière formée par l'aquifère synclinal des calcaires urgoniens du massif du Jaout. Cette disposition permet un écoulement des eaux suivant un gradient hydraulique principal d'orientation E-W, vraisemblablement grâce à l'ouverture de fentes d'extrados dans l'axe du pli, accordant à l'aquifère karstique du Jaout un caractère original dans le contexte régional.

Néanmoins, le traçage artificiel qualitatif effectué depuis la perte d'Hounrède (Fig. 2) montre une relation directe avec la Source aux Fées en contradiction avec les déductions élaborés à partir de la carte géologique: un écoule-

ment vers les sources de Béon avait été supposé (Bauer, 1994). Le gradient hydraulique de cette zone n'est donc pas confirmé. Nous avons donc eu recours à une analyse fine de la fracturation pour comprendre ce drainage vers le NNW.

### 3. Analyse de la fracturation du Massif du Jaout

L'analyse de la fracturation a été entreprise par l'intermédiaire de différentes méthodes: étude des directions à partir de l'imagerie satellitaire et des photographies aériennes, étude des directions et des plongements ainsi que des mouvements à partir du terrain.

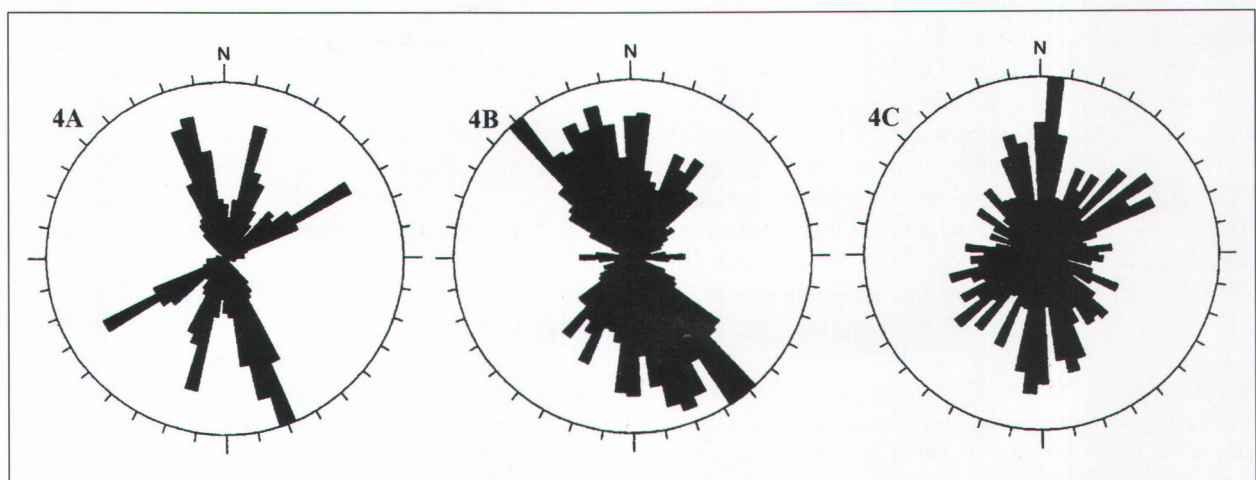
#### 3.1. Etude du réseau fissural à différentes échelles

##### 3.1.1. Interprétation d'une image SPOT panchromatique (échelle kilométrique, Fig. 4A)

Le réseau fissural a été étudié à petite échelle à partir d'une scène SPOT panchromatique (K39-J263 du 13/08/1991) acquise dans le cadre du programme INSU IDYL PYRENEES. Les images numériques SPOT panchromatique possèdent une résolution relativement fine (1 pixel égale 10 m).

Un traitement de base simple a été appliqué à l'image (filtre de rehaussement haute fréquence et étalement dynamique), la fracturation étant déjà bien identifiable. Cependant la végétation, et en particulier la forêt, les pentes abruptes des crêtes du Jaout, et des Port et Pène de Béon n'ont pas permis l'exploitation de ces zones.

La vue de la structure dans son ensemble facilite la compréhension du système. Les linéaments kilométriques ont



**Figure 4:** Rosaces directionnelles de la fracturation suivant l'image SPOT panchromatique (A), les photographies aériennes (B) et les données de terrain (C).

**Figure 4:** Fracturation rose diagrams after Spot Panchromatic image (A), aerial photographs (B) and field data (C).

ainsi été identifiés et reportés sur l'image. Ce sont essentiellement des linéaments d'origine géologique (décalage, contact anormal entre deux formations...) et morphologique (ruissellement des eaux de surface, alignement des dolines, lapiaz...).

A partir de la carte de la fracturation tracée depuis l'image SPOT, nous avons établi une rosace de distribution des 191 grandes fractures relevées. Ce mode de représentation statistique permet de caractériser la distribution des fractures au sein d'une population *a priori* hétérogène. Chaque branche de la rosace directionnelle correspond à une direction de la fracturation. La longueur des branches est proportionnelle au nombre de fractures mesurées. Ainsi les directions prédominantes d'une série de mesures sont facilement identifiables. La rosace directionnelle (Fig. 4A) montre trois familles directionnelles majeures d'orientations moyennes: N020°E, N060°E et N160°E. Chaque famille est représentée uniformément sur le massif.

### 3.1.2. Interprétation des photographies aériennes (échelle hectométrique, Fig. 4B et 5)

Le réseau fissural a été étudié à moyenne échelle à partir de 7 photographies aériennes acquises par l'IGN (mission 82 64IFN/170: n° 1635, 1637, 1639, 1865, 1867, 1869, 1871). Sur les photographies numérisées, un premier traitement comprenant un filtre de réhaussement haute fréquence et un étalement de la dynamique de l'image a été appliqué. La majeure partie des fractures a été tracée à partir de ces premiers documents. Ensuite, nous avons appliqué sur le plan image initial des filtres directionnels (N/S, E/W, NW/SE, NE/SW). Cette technique de rehaussement d'image permet de tracer plus facilement des linéaments suivant la direction du filtre. Les fractures pointées dans ce plan image sont ensuite reprises dans le plan image initial afin de vérifier leur validité.

Par rapport à l'image SPOT, la couverture par photographies aériennes permet une analyse plus détaillée. Les failles cartographiées ont ici une longueur d'ordre hectométrique. Le couvert végétal constitue la première gêne rencontrée. Contrairement aux grands linéaments, le tracé de la fracturation sur les photographies aériennes est basé sur des critères plus morphologiques que géologiques. Les linéaments d'ordre hectométrique sont bien soulignés par l'érosion (ruissellement des eaux de surface, alignements de dolines, dépressions et décalages bien visibles au niveau des lapiaz, ruptures de pente, mais aussi variations de flore ou de teintes dues à la composition du sol). Le lapiaz représente une zone idéale pour le tracé de la fracturation (Fig. 5): les décalages et les cannelures sont bien visibles dans la barre rocheuse. Au sud du lapiaz, les alignements de dolines peuvent être identifiés très précisément.

La dernière difficulté rencontrée est due à la déformation des photographies aériennes, les angles de l'axe de prise de vue n'étant pas le même au centre et aux bords de la photographie. Il n'est donc pas évident de repérer la direction des fractures par rapport au nord géographique. Cette opération peut vite devenir une source d'erreur importante. Afin de minimiser les erreurs, nous avons reporté, le plus précisément possible, le nord géographique au centre de chaque photographie. Puis, nous avons mesuré la direction de chacune des fractures depuis chaque photographie sans effectuer d'assemblage à l'échelle du massif, et en les reportant sur la carte topographique.

La cartographie de 810 fractures d'échelle hectométrique a été établie. Nous avons construit une rosace directionnelle pour chaque photographie, et une rosace directionnelle pour tout le massif (Fig. 4B). Il est intéressant d'observer séparément les rosaces directionnelles de chaque photographie afin de mettre en évidence des différences de direction de fracturation en fonction de la position sur le massif. La rosace directionnelle globale permet de comparer les mesures d'ordre hectométrique avec celles d'ordre kilométrique (Fig. 4A).

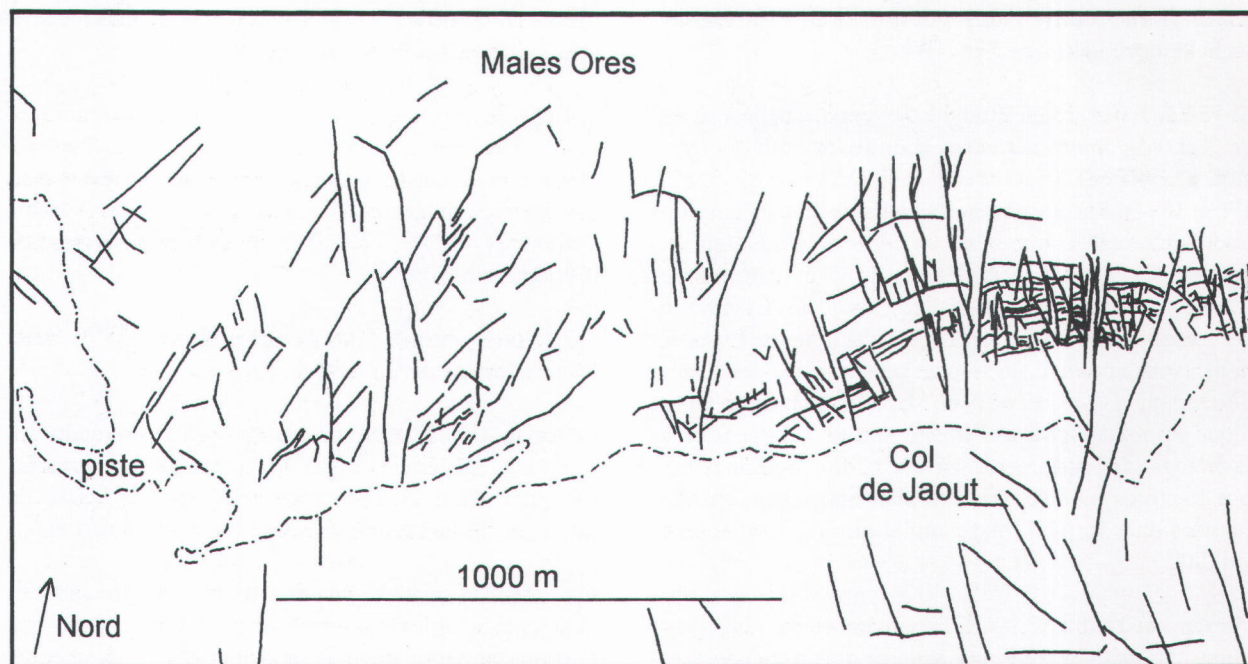
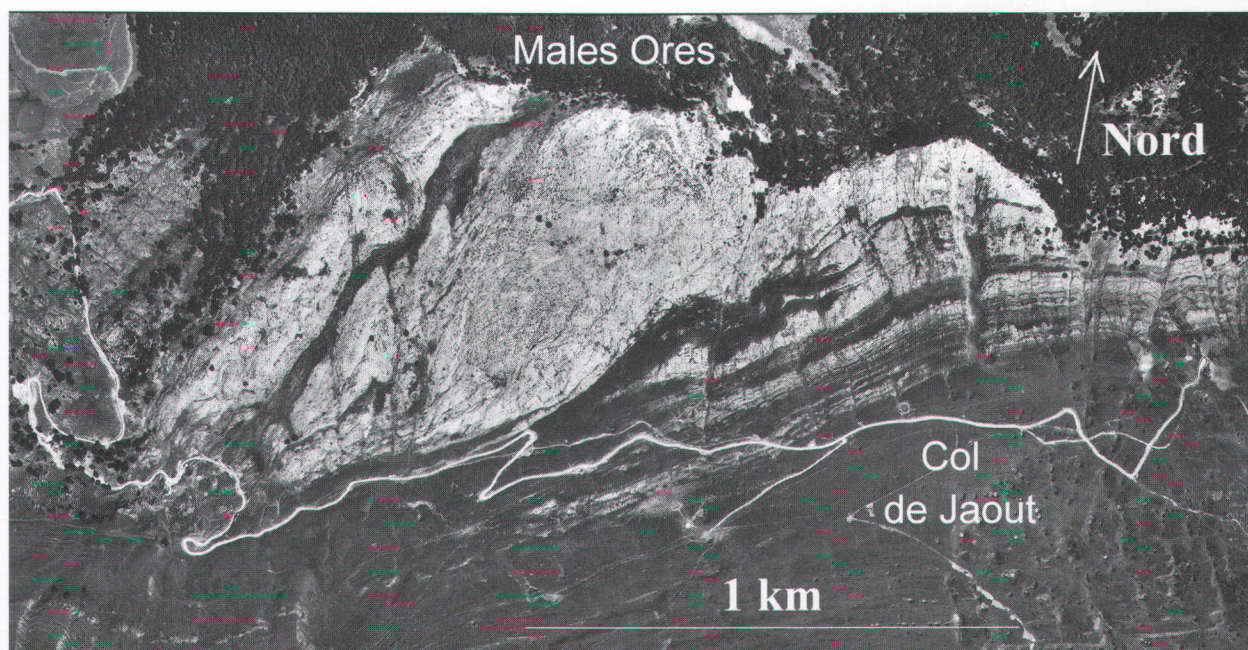
A l'échelle du massif, une direction prépondérante est mise en évidence: c'est la direction N140°E. Puis, on observe toute une série de mesures bien homogène avec des directions majeures d'orientations moyennes: N160°E - N000° et N020°E - N040°E, et une direction mineure d'orientation N090°E.

### 3.1.3. Interprétation des données de terrain (échelle décimétrique à décamétrique, Fig. 4C)

Le réseau fissural a été étudié sur les affleurements qui se trouvent généralement sur les fronts d'excavations artificielles. Ceux-ci sont ici peu nombreux, le massif du Jaout constituant un milieu essentiellement pastoral.

Sur le terrain, le relevé du pendage de toutes les surfaces planes observables le long des affleurements apporte une information supplémentaire non négligeable: la valeur et le sens de plongement des fractures. Si la direction des fractures représente un paramètre important pour déterminer la direction préférentielle des écoulements dans la masse rocheuse, la connaissance du plongement de ces mêmes fractures est aussi importante et permet d'élaborer une vue en 3D du système d'écoulement.

Les 971 mesures ont été réalisées le long de la seule piste qui monte depuis le port de Castet jusqu'au col de Jaout dans la partie occidentale du massif. La piste a été découpée en six stations dans les formations bédoulienne, urgonienne et albienne. Les résultats des mesures sont présentés séparément afin de pouvoir identifier des différences éventuelles au sein du massif. Puis, à titre de comparaison avec les données ac-



**Figure 5:** Lapiaz du Pic de Males Ores situé au nord du col de Jaout. A: extrait de la photographie aérienne n°1867; B: Fracturation hectométrique à décimétrique.

**Figure 5:** Lapiaz of Males Ores Peak located at the North of Jaout pass. A: detail of aerial photography; decametric to hectometric fracturation.

quises à l'échelle kilométrique (Fig. 4A) et hectométrique (Fig. 4B), la rosace directionnelle de toutes les fractures décimétriques à décimétriques est constituée (Fig. 4C).

La rosace calculée sur la totalité des mesures souligne trois familles directionnelles majeures ayant pour orien-

tations moyennes: N000°, N050°E à N070°E, et N160°E. Ces nombreuses fractures ont la particularité de toutes présenter un plongement vers l'ouest qui est généralement assez fort. Ce sens du plongement favorise un gradient hydraulique allant vers l'ouest. De ce fait, les émergences de la partie occidentale du massif du Jaout sont toutes situées en vallée d'Ossau.



### 3.1.4. Conclusion de l'étude du réseau fissural (Fig. 4 et Tabl. 2)

L'étude du réseau fissural à différentes échelles d'observation nous a permis d'acquérir des données complémentaires. La plupart des directions de discontinuités repérées se retrouvent à plusieurs échelles d'observation. La totalité des mesures a permis de classer les fractures dans six familles dont l'origine sera discutée ultérieurement (Tabl. 2):

- (1) Les différentes méthodes décrivent une nette prédominance de la direction sub-méridienne (N160°E à N020°E) (Fig. 4): cette famille comprend des fractures de toutes dimensions (de quelques mètres à plusieurs kilomètres) qui sont régulièrement réparties sur l'ensemble du massif.
- (2 et 3) Les familles N020°E à N040°E et N150°E à N160°E comprennent essentiellement des fractures décimétriques à hectométriques. Leur répartition sur le massif semble homogène.
- (4) La famille N050°E à N070°E, comme la famille (1), comporte des fractures de toutes dimensions (kilométriques à métriques), même si l'ordre hectométrique est très peu représentée. Sa répartition sur le massif est assez homogène.
- (5) La famille N120°E à N140°E est présente du décimètre à l'hectomètre. Sa répartition sur le massif est toutefois très faible.
- (6) L'interprétation des photographies aériennes a permis de localiser la famille N090°E à N110°E sur la partie méridionale du massif (Fig. 5).

## 3.2. États des contraintes

### 3.2.1. Acquisition et traitement des données

Parallèlement aux mesures de la petite fracturation et lorsque les miroirs de failles étaient lisibles, nous avons fait l'acquisition de mesures de mouvements sur les mêmes affleurements, ainsi que sur des sites supplémentaires. Les deux premiers sites sont situés en vallée d'Ossau (à Arudy le long de la route départementale D 934, et dans la carrière de Louvie-Juzon; Fig. 1) dans les formations urgoniennes. Les autres ont été relevés sur le flanc nord de la crête de Lazerque (Fig. 1), à l'ouest d'Arudy (Urgonien et Jurassique terminal). Malgré la rapide dissolution des miroirs due à une forte pluviométrie après leur mise à l'air libre, l'acquisition de 344 mesures a permis d'entreprendre une étude statistique. Les mesures ont été regroupées en six sites (Garail, Lazerque, Arudy, Louvie-Juzon, Hounrède, col de Jaout) en fonction de leur position géographique.

Les indices de mouvements relevés sur le terrain sont traités à l'aide du logiciel Stress (Villemin *et al.*, 1993 et 1999), basé sur la méthode d'inversion directe développée par Angelier (1990). Les résultats sont donnés dans le Tableau 1A. La Figure 7 illustre les contraintes princi-

pales relevées sur le massif du Jaout (sites d'Hounrède et du col de Jaout).

### 3.2.2. Trois phases compressives (Tabl. 1A)

L'évolution géodynamique depuis le Jurassique supérieur de la Zone Nord-Pyrénéenne se décompose en plusieurs phases (Martin, 1992; Umbhauer *et al.*, 1994). Dans la région étudiée trois épisodes compressifs peuvent être mis en évidence et classés chronologiquement (Hervouët *et al.*, 1996; Hervouët, 1997).

La phase majeure pyrénéenne, visible à Arudy, Hounrède (Fig. 7-1A) et Jaout (Fig. 7-2A), est caractérisée par une direction N-S à NNE-SSW. Débutant au cours du Crétacé supérieur (Souquet & Deramond, 1989; Vergès & Muñoz, 1990), un âge éocène moyen à base de l'Oligocène est attribué au paroxysme de cette phase (Mirouse, 1980).

La compression ENE-WSW à E-W est représentée dans la vallée (Arudy, Louvie-Juzon) ainsi qu'à la base du Lazerque. Martin (1992) situe cette compression postérieurement à la phase majeure pyrénéenne. Cependant pour Rocher *et al.* (1998), en Aquitaine et sur le front du chevauchement nord-pyrénéen, la compression ENE représenterait une déviation de la contrainte pyrénéenne NNE aux abords de rampes latérales N160°E. Elles seraient donc synchrones. Sur le flanc nord des Pyrénées, faute de miroir commun aux deux contraintes, nous n'avons pas d'arguments pour ou contre cette hypothèse. Elle est séduisante pour les stations de Louvie (Fig. 6 et Tabl. 1) et du Jaout (Fig. 7-2B et Tabl. 1) mais inapplicable à Arudy et au Lazerque (Fig. 6B, 6C et Tabl. 1). Il en va de même sur le flanc sud des Pyrénées dans la vallée du Rio Esca au sud de Roncal (Fig. 1, 6D et Tabl. 1). La mégaturbidite MT5 définie par Labaume (1983) et mise en place à la fin de l'Éocène inférieur (Labaume *et al.*, 1985) est recoupée par des miroirs pluridécimétriques NE-SW dextres (Fig. 6D). Ces miroirs, non déformés, fonctionnent en transpression ( $\Phi = 0,15$ ) sous contrainte maximale ENE-WSW qui ne peut provenir de la déviation de la compression pyrénéenne NNE sur des plans NE-SW. De plus, si ces failles étaient antérieures aux mégaturbidites, pendant la mise en place de ces dernières soit celles-ci se seraient disloquées suivant ces plans soit ceux-ci auraient été injectés par du matériel provenant *per ascensum* de la carapette microbréchique sous-jacente en surpression, ces plans étant relativement parallèles à la direction du transport. Sans rejeter l'idée d'une éventuelle déviation locale de la contrainte pyrénéenne sur des rampes latérales N160° (Rocher *et al.*, 1998), il semblerait que bien souvent cette compression ENE-WSW soit postérieure à la compression pyrénéenne tant sur le flanc nord (Martin, 1992) que sur le flanc sud-pyrénéen.

La compression NW-SE à NNW-SSE est présente sur les sites d'Arudy et d'Hounrède (Fig. 7-1B). Elle débu-