# Tectogenèse pyrénéenne dans le bassin flexural d'Aquitaine : apports de la reconstitution de paléocontraintes

# Pyrenean tectogenesis in the Aquitaine Flexural Basin: insights from paleostress reconstruction

#### Muriel ROCHER\*, Olivier LACOMBE et Jacques ANGELIER

Laboratoire de tectonique quantitative, URA CNRS 1759, Université Pierre-et-Marie-Curie, tour 26-25, E 1, boîte 129, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

#### ABSTRACT

Paleostress reconstructions based on analyses of fault slips and mechanical calcite twins bighlight the Cenozoic structural evolution of the Aquitaine basin. The pyrenean phase, from the Late Cretaceous to the Oligocene, corresponds to a N020 compression, responsible for the development of N110 trending folds, locally deviated near N160 ramps. Later, the compression turned to N160. Nearly east-west extensions, probably resulting from stress permutations, produced north-south normal faults. This tectonic evolution, dominated by a north-south compression, is apparently polyphase because of structural inheritance and salt tectonics. © Académie des sciences / Elsevier, Paris.

Keywords: Paleostresses, Twins, Fractures, Folding, Perturbations, Aquitaine

#### Résumé

La reconstitution de paléocontraintes par l'analyse des failles striées et des macles mécaniques de la calcite éclaire l'évolution structurale cénozoïque du bassin d'Aquitaine. La phase pyrénéenne est caractérisée, du Crétacé supérieur à l'Oligocène, par un serrage N020 responsable du plissement général N110, localement dévié aux abords de rampes N160. Par la suite, la compression est orientée N160. Des extensions à peu près est-ouest, vraisemblablement liées à des permutations de contraintes, engendrent des failles normales nord-sud. Cette évolution, dominée par un serrage nord-sud, se traduit par un polyphasage apparent, dû à l'héritage structural et à la tectonique salifère. © Académie des sciences / Elsevier, Paris.

Mots clés : Paléocontraintes, Macles, Fractures, Plissement, Perturbations, Aquitaine

#### **ABRIDGED VERSION**

#### Introduction

The Cenozoic compressional tectonism in the Aquitaine Basin followed a Mesozoic distension; it prevailed from the Late Cretaceous to the Oligocene, then decreased until the Present. The northward migration of flexuring accompanying the setting of pyrenean thrust units (Déramond et al., 1993), is characterized by N110 (i.e. N110°E) fold axes and strike–slip faults.

Because of Mio-Pliocene sedimentation burying tectonic features, the structural analysis involved consideration of subsur-

Note présentée par Jean Aubouin.

Note remise le 1<sup>er</sup> septembre 1997, acceptée après révision le 20 octobre 1997.

<sup>\*</sup> E-mail : rocher@lgs.jussieu.fr

C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth & Planetary Sciences 1998. 326, 129-135

face data. Analyses of drainage network anomalies (Deffontaines, 1991), SPOT images and seismic-reflection (e.g., ECORS Pyrenees team, 1988) resulted in a structural diagram of the region studied (figure). The North Pyrenean foreland is affected by N110 folds. Most anticlines are north-verging ramp propagation folds, or south-verging with backthrusts. Some folds are locally turned along N160 faults. Major N040 and N140 to N–S faults, inherited from the Hercynian orogeny (Brunet, 1991), underwent a strike-slip reactivation during the Pyrenean major event.

We analysed tectonic features in quarries and drill-cores because of few natural outcrops in the Mont-de-Marsan region. We also studied the Sainte-Suzanne anticline, along the North Pyrenean Front, closely associated with a fold-and-thrust lateral ramp.

#### Inversion of fault slip and calcite twin data

Paleostress reconstructions reveal the kinematics of major structures and their structural evolution. Two independent inverse methods, applied to striated faults and calcite twins, provide access to the reduced stress tensor, including the orientation of principal axes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  ( $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$ , pression positive) and the ratio  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ . Note that in this paper a compressional state of stress (along horizontal  $\sigma_1$  axis) refers to tensors with  $\sigma_3$  axis vertical, or with  $\sigma_2$  axis vertical and  $\Phi < 0.5$ . Likewise, an extensional state (along horizontal  $\sigma_3$  axis) of stress refers to tensors with  $\sigma_1$  axis vertical, or with  $\sigma_2$  axis vertical and  $\Phi > 0.5$ .

The paleostress analysis of fault slips (Angelier, 1990) is based on the principle that the observed stria on a fault plane is parallel to the shear stress exerted on this plane. If tectonism is polyphased, mechanically consistent fault slips are gathered into subsets, taking into account chronological observations. The mechanical twinning of calcite allows determination of paleostress orientations (Etchecopar, 1984). This allows separation of superimposed stress tensors, but cannot provide relative chronology.

#### Paleostresses and foreland folds (Mont-de-Marsan)

In the region of Mont-de-Marsan, brittle teconics were studied on N110 anticlines (figure). Three quarries are located at Cros (subhorizontal Santonian limestones), Tercis near the Dax diapir (Upper Senonian marly limestones with N100 vertical bedding), and Arcet (Danian gently dipping dolomitized limestones unconformably overlain by Oligocene). Oriented drillcores (Paleocene limestones) were obtained from two wells situated on the Mont-de-Marsan anticline. Eight calcite samples (figure and table II) were extracted from the Arcet quarry, the sandy limestones of Bougue (Chattian), and the drill-cores.

At Cros, reverse and strike-slip faults reveal two successive NNE and NNW compressions (table I) and some additional minor events. At Arcet, the same compressions correspond to large strike-slip faults, subsequently opened and filled during a later ENE extension; two calcite samples extracted from these fractures recorded the same states of stress. At Tercis, a NNE major compression was synchronous with folding, and followed by a NNW compression and perpendicular extension. In the drill-cores, reverse and strike-slip faulting characterizes similar successive NNE and NNW compressions, which alternated with nearly E–W extensions, determined with many normal faults. Five samples extracted from these cores provided independent results consistent with fault analyses. In many sites, we also detected minor NNE extensions and E–W compressions. The calcite sample of Bougue recorded three states of stress, although no fracture was observed; a strike-slip regime with  $\sigma_1$  NNE and  $\sigma_3$  WNW was also suspected at Arcet (Oligocene sands) and Roquefort (Aquitanian sands), then E–W and NNW compressions.

#### Paleostresses and front of range (Orthez)

In the region of Orthez, three sites with limestones were studied in the eastern part of the Sainte-Suzanne anticline (figure), trending N110 but turning to the east to N170 along a regional-scale fault zone: La Ménière quarry (Maastrichtian), Sainte-Suzanne scarps (Urgonian), and Loubieng quarry (Danian).

We determined an early ENE shortening with N170 reverse faults (table I), reactivated under NW-SE extension. A later NNE compression was characterized by neoformed reverse faults, strike-slip thrust reactivation of early N170 reverse faults, numerous dextral faults and few sinistral faults. We also reconstructed a NNW compression (reverse then strike-slip faults) and a late minor ENE extension. Tourneret (1992) obtained similar results through twin inversion in calcite samples from Vic Bilh (figure).

#### Successive paleostresses and folding regimes

We regionally determined a NNE major compression responsible for folding and a later NNW compression (Hervouët et al., 1997; Thomas et Delfaud, 1990); the kinematic change probably occurred at Upper Oligocene times (Klitgord and Schouten, 1986). Near Orthez, an early ENE compression was interpreted as a local deviation of the NNE regional stress near a N170 fault zone, which acted as a thrust. Similar stress deviations were detected in the Iberian Range (Guimera and Alvaro, 1990). Later, N170 accidents underwent dextral movement, consistent with the regional NNE compression. The post-Oligocene NNW compression probably continues, as shown by borehole breakouts (Bell et al., 1992) and focal mechanisms of earthquakes (Grellet et al., 1993).

Some extensions were also reconstituted. An early NW–SE extension, observed at Orthez, is attributed to a local stress perturbation following the ENE compression. The local WNW and regional ENE extensions are interpreted as due to stress permutation respectively associated with (and postdating) the NNE and NNW compressions. We explain the NNE extension by extrados stretching at anticline hinges. Numerous states of stress thus coexisted during a given tectonic event.

We conclude that the NNE and NNW compressions, identified through fault and twin analyses, are regionally significant, and can be related to a known Upper Oligocene kinematic change. Numerous other Cenozoic states of stress were reconstituted. This apparent complexity does not reflect systematic polyphase tectonism, but local perturbations as a result of inherited structures and salt diapirism, in the general context of nearly N–S Iberia/Africa-Eurasia convergence.

### 1. Introduction

La structuration cénozoïque du Bassin aquitain fait suite à l'épisode tectonique distensif mésozoïque. La flexure de l'avant-pays pyrénéen accompagne la mise en place des unités chevauchantes pyrénéennes ; les sédiments d'avant-fosse se déforment au fur et à mesure de l'avancée du front de déformation vers le nord (Déramond et al., 1993). Cette tectogenèse s'exprime du Crétacé à l'Oligocène, puis de façon atténuée jusqu'à nos jours. À l'échelle régionale, elle est caractérisée par le rejeu décrochant de failles N160 (lire : N160°E) et N040, et par des plis d'axe N110.

Les structures ayant été enfouies sous des dépôts postoligocènes peu déformés, l'analyse structurale de cette région exige la prise en compte des données de subsurface et des études sismiques.

### 2. Cadre structural de l'étude

L'étude combinée des anomalies rectilinéaires et curvilignes des réseaux de drainage (Deffontaines, 1991) et de l'imagerie SPOT a fourni un schéma structural régional (figure). Les profils sismiques, comme le profil ECORS-Arzacq (ECORS Pyrenees team, 1988), ont permis de connaître la nature des accidents et le style structural de la région.

L'avant-pays Nord-Pyrénéen (figure) est affecté de plis orientés N110. Les anticlinaux sont des plis de propagation de rampes déversés vers le nord, ou parfois vers le sud par rétrochevauchement. Des accidents majeurs N040 et N140 à nord-sud, hérités de la phase hercynienne et déjà réactivés lors de l'extension à l'Albien (Brunet, 1991), ont rejoué en décrochement lors de la phase majeure pyrénéenne. Certains axes de plis comme les anticlinaux de Mont-de-Marsan et de Sainte-Suzanne se parallélisent aux accidents orientés N160.

La région de Mont-de-Marsan présentant peu d'affleurements naturels, nous avons effectué l'analyse tectonique en carrières et sur carottes de forage. Nous avons en outre étudié la structure de Sainte-Suzanne, sur le Front Nord-Pyrénéen, formée d'un système pli chevauchant/rampe latérale.

## 3. Inversion des données de failles et de macles de la calcite

La reconstitution des paléocontraintes permet de comprendre la cinématique de chaque type d'accident, ainsi que son évolution structurale. Elle est effectuée selon deux méthodes d'inversion complémentaires, portant sur les failles à stries et les macles de la calcite. Dans les deux cas, l'inversion des données de cisaillement aboutit au tenseur réduit des contraintes, caractérisé par l'orientation des axes principaux  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  ( $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$ , compression positive) et par le rapport  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ .

L'analyse des failles à stries en termes de paléocontraintes (Angelier, 1990) repose sur le principe selon lequel la strie observée sur un plan de faille est parallèle à la contrainte cisaillante exercée sur ce plan. Dans le cas d'un polyphasage, les systèmes de failles sont séparés sur la base de leur compatibilité mécanique et des observations de chronologie relative. La reconstitution des paléocontraintes, fondée sur l'inversion des macles mécanique, de la calcite (Etchecopar, 1984) tient compte à la fois des plans maclés et non-maclés. Le processus permet de séparer les états de contraintes d'une tectonique polyphasée, mais non de fixer l'ordre chronologique des événements.

Dans cette note, nous entendons par état de contrainte compressif (dans la direction de  $\sigma_1$ ) tout tenseur avec  $\sigma_3$  vertical, ou avec  $\sigma_2$  vertical et  $\Phi < 0.5$ . Par état de contrainte extensif (selon  $\sigma_3$ ), nous entendons tout tenseur avec  $\sigma_1$  vertical, ou avec  $\sigma_2$  vertical et  $\Phi > 0.5$ .

# 4. Paléocontraintes et plis d'avant-pays (Mont-de-Marsan)

Dans la région de Mont-de-Marsan (figure), une étude de fracturation (tableau I) a été effectuée sur des anticlinaux, dans trois carrières de calcaires du Crétacé (Cros, Tercis) et du Paléocène (Arcet), ainsi que dans des carottes de calcaires paléocènes de deux forages (Mont-de-Marsan). Par ailleurs, huit échantillons de calcite (tableau II) ont été prélevés dans les carrières d'Arcet et de Bougue, et dans les carottes de forage.

La carrière de Cros présente des calcaires santoniens en bancs subhorizontaux. Des failles inverses, des stylolites et des décrochements indiquent deux compressions NNE et NNW successives (superposition de stries). Les striations successives sur les plans de failles montrent que la compression NNW passe peu à peu à un régime décrochant (permutation  $\sigma_2 - \sigma_3$ ), puis à une extension perpendiculaire ENE (permutation  $\sigma_1 - \sigma_2$ ).

La carrière de Tercis, près du diapir de Dax, est constituée de calcaire marneux du Campanien-Maastrichtien en bancs verticaux orientés N100. Les failles indiquent une compression NNE avant et après basculement des strates, donc synchrone du plissement. Une compression NNW puis une extension ENE lui succèdent.



Figure. Orientation de  $\sigma_1$  pour chaque tenseur compressif reconstitué à partir des données de failles (longues flèches noires) et de macles de la calcite (courtes flèches grises) sur le schéma structural, réalisé à partir d'images SPOT, des réseaux de drainage et de profils sismiques. Autour sont présentés des stéréodiagrammes de résultats d'analyse de failles (le numéro indiqué correspond à celui de la colonne C du tableau I) et de macles de la calcite (projection de Schmidt, hémisphère inférieur). FNP : Front nord-pyrénéen.

 $\sigma_1$  orientation for each compressive tensor reconstituted by inversion of fault slip data (long solid arrows) and calcite twin data (short shaded arrows) in the structural map, carried out from analyses of SPOT image, drainage network and seismic profiles. Some stereoplots of results of fracturation (the indicated number corresponds to the number of the column C of table I) and calcite twins analyses are shown (Schmidt projection, lower hemisphere). FNP: North Pyrenean Front.

Tableau I. Tenseurs des contraintes (dans l'ordre de description dans le texte), déterminés par analyse inverse des failles striées pour les sites de Cros, Tercis, Arcet, La Ménière, Loubieng, Sainte-Suzanne, et Mont-de-Marsan. C : ordre chronologique ;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : axes principaux du tenseur des contraintes (direction-inclinaison) ;  $\Phi$  : rapport  $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  ;  $\alpha$  : angle moyen strie mesurée-cisaillement calculé ; N : nombre de mesures ; Q : qualité du résultat (A : bon, B : moyen, C : médiocre).

Stress tensors (in the order of description in the text) determined by inverse analysis of fault slips for Cros, Tercis, Arcet, La Ménière, Loubieng, Sainte-Suzanne and Mont-de-Marsan sites. C: chronological order;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ; principal axes of the stress tensor (trend-plunge);  $\Phi$ : ratio ( $\sigma_2 - \sigma_3$ )/( $\sigma_1 - \sigma_3$ );  $\alpha$ : mean angle observed striacomputed shear; N: number of data; Q: quality of the result (A: good, B: intermediate, C: poor).

Site	С	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma^{}_3$	$\phi$	α	Ν	Q
	1	191–09	335 –79	100-06	C',2	13,4	59	A
Cros	3	157-06	262-68	065-21	6,2	11,0	37	Α
	?	115-38	254-44	007-22	0,2	17,7	7	С
	2 ?	116-61	304-29	212-19	0,5	19,1	15	В
Tercis	1	025-69	205 –21	115-00	0	11	76	A
	1	196 –19	334 –66	100 –15	rens	ılé		
	2	025-10	292-12	153–74	0,4	13	11	В
	3	164-19	356-70	255-04	0,2	17,1	17	В
	4	203-74	331–10	063-12	0,6	13,5	17	В
Arcet	1	191-04	018-85	281-01	0,5	7,3	4	С
	2	142-19	324-71	232-01	0,8	9,1	6	В
Mont-de- Marsan Puits A	2	190-02	281-46	098-44	0,1	20,2	15	В
	4	159–05	046-78	250-11	0,2	21,5	12	В
	5	234-84	350-03	080-05	0,4	15,6	26	Α
	3	146-87	284-03	014-02	0,2	19	7	В
	1 ?	246-03	337-23	149-67	J,3	8,8	5	В
Mont-de- Marsan Puits B	1	199–05	305-71	107-18	0,6	18,0	7	A
	2	159-00	256-87	068-03	0,4	23,6	13	С
	3	208-54	023-36	115–03	0,7	6,4	4	С
	4	135-85	341-04	251-02	0,4	11,3	20	A
La Ménière	1	076-13	346-02	246-77	0,2	19,4	13	С
	2	195–77	062-09	33009	0,7	7,8	13	A
	3	025-12	118-10	245–74	0,2	22,1	41	В
	4	318-05	054-48	224-42	0,2	18,1	15	С
	5	152-78	308-11	03905	0,5	18,5	15	<u> </u>
Sainte- Suzanne	1	247-04	339-20	148-69	0,5	16,6	14	В
	2	244-66	033-20	127-11	0,5	14,7	16	В
	3	204-12	297-14	075-72	0,1	10,4	9	В
	4	153–77	318-12	049-03	1	11,6	5	С
Loubieng	1	235-04	143-27	332-63	0,5	15,6	15	В
	2	200-84	059-05	329-04	0,8	1,2	16	С
	3	022-01	291-52	113-38	0,2	15,1	66	A
	4	141–09	049-11	269-75	0	21,7	40	В
	5	513-73	142-17	051-02	0,4	16,2	14	В

Tableau II. Tenseurs des contraintes, (dans l'ordre de description dans le texte), déterminés par analyse inverse du maclage de la calcite pour les échantillons des carrières de Bougue, Arcet, et Loubieng et les carottes de forage de Mont-de-Marsan. N: ordre d'obtention ;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ,  $\Phi$  et Q: voir tableau I ; *MT*: nombre total de macles ; *NT*: nombre total de non-macles ; *M*: nombre de macles compatibles avec le résultat ; *N*: nombre de non-macles compatibles avec le résultat.

Stress tensors (in the order of description in the text) determined by calcite twins inverse analysis for the samples of Bougue, Arcet and Loubieng quarries and of Mont-de-Marsan drill-cores. N: order of obtaining;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ,  $\Phi$  and Q: see table I; MT: total number of twinned planes; NT: total number of untwinned planes; M: number of twinned planes consistent with the result; N: number of twinned planes consistent with the result.

Site		N	$\dot{\sigma}_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	φ	мт	NT	М	N	Q	
Bougue		1	204–13	089–61	300-25	0,5	121	26	58	24	A	
		2	088-09	221-77	356-09	0,3	65	24	27	23	Α	
		3	343-22	246–17	122-61	0,1	41	21	19	21	С	
Arcet .		1	031–50	301-01	210-40	0,7	100	24	35	24	A	
		1	021–23	118–14	236-68	tenseur débasculé						
	1	2	153-01	243-21	061–69	0,3	67	22	24	21	В	
		3	091-03	182-21	352-69	0,5	43	22	20	21	С	
		4	190–21	015-69	281-01	0,9	24	21	17	20	С	
	1	1	033–30	236-58	129–10	0,3	81	33	41	33	A	
	2	2	159-06	264-68	067-21	0,4	43	30	17	30	C	
Mont-de- Marsan Puits A		1	057-31	312-24	191-49	0,2	157	29	39	29	A	
	1	2	211-26	060-61	307-12	0,3	120	27	39	27	A	
	1	3	329-32	076-25	197–47	0,2	84	24	33	22	С	
		4 ?	141–60	016–19	278-23	0,3	51	24	19	22	С	
		1	342-06	075-30	241-59	0,3	132	45	46	41	В	
	2	2	219–17	082-68	313-14	0,4	86	45	38	39	В	
		3	125-33	256–45	016-27	0,5	50	43	25	36	С	
		1	293-17	123-73	024-03	0,4	89	17	35	17	A	
	3	2	006-18	178-72	276-02	0,1	55	16	26	16	A	
		3	178–11	281–48	079–40	0,5	30	15	14	15	C	
Mont-de- Marsan Puits B	1	1	146-66	010-18	275-15	0,3	125	38	56	38	A	
		2	123–20	255-62	026-19	0,2	69	38	24	35	В	
		1	033-75	154–08	246-13	0,3	120	36	54	35	A	
	2	2	213-27	059–60	309-11	0,2	68	34	37	33	В	
		3	229–72	128-03	037-18	0,6	32	33	15	33	C	
Loubieng		1	145-39	310-50	049-07	0,2	126	47	45	42	A	
		2	337-13	242-22	095-65	0,6	85	43	29	42	C	

La carrière d'Arcet est constituée de calcaires dolomitisés du Danien plissés, recouverts en discordance par des molasses sableuses oligocènes. Dans les bancs daniens, deux compressions NNE et NNW successives ont engendré d'importants décrochements conjugués, ouverts et minéralisés ultérieurement par une extension ENE. Deux échantillons de calcite, extraits de ces fractures, ont subi les mêmes compressions. Un des échantillons a enregistré l'extension ENE, et une compression mineure est-ouest.

Les carottes orientées de calcaires paléocènes proviennent de deux forages situés sur l'anticlinal de Mont-de-Marsan. Une compression NNE s'exprime par des failles inverses et décrochantes ; quelques failles normales indiquent une extension WNW succédant à celle-ci. Des décrochements conjugués recoupant les failles précédentes sont compatibles avec une compression NNW. De nombreuses failles normales sont compatibles avec une extension ENE tardive (recoupement des stylolites subhorizontaux liés aux compressions subméridiennes par les stylolites subverticaux associés à l'extension ENE). Quelques failles indiquent une extension NNE et une compression ENE. De même, cinq échantillons de calcite provenant des carottes ont révélé deux compressions subméridiennes, et des extensions environ est–ouest et NNE.

Enfin, un échantillon de calcite provient des calcaires gréseux du Chattien de Bougue. Bien qu'aucune fracture n'ait été observée dans cette carrière, on reconstitue ainsi trois états de contraintes : un tenseur décrochant avec  $\sigma_1$  orienté NNE et  $\sigma_3$  WNW, compatible avec des failles normales NNE observées dans l'Oligocène à Arcet et des joints NE–SW dans des sables aquitaniens à Roquefort, une compression mineure est–ouest, et une compression NNW.

# 5. Paléocontraintes et front de chaîne (Orthez)

Dans la région d'Orthez, trois sites ont été étudiés sur l'anticlinal de Sainte-Suzanne (figure), d'axe N110 mais se parallélisant vers l'est à un accident régional N170 : les carrières de La Ménière (Maastrichtien calcaire) et de Loubieng (Danien marno-calcaire), ainsi que les affleurements de Sainte-Suzanne (calcaires urgoniens).

On détermine (tableau I) un serrage précoce ENE associé à des failles inverses N170, quelques décrochements, des stylolites et des glissements intraformationnels. Ces failles sont réactivées lors d'une extension NW–SE. Une compression NNE postérieure engendre des failles inverses, une réactivation décro-chevauchante des plans N170, de nombreux décrochements dextres N150 à nord– sud (correspondant à l'accident régional N170) et des décrochements sénestres. Ensuite, ont eu lieu une compression NNW (failles inverses, puis décrochements), puis une extension ENE mineure. L'analyse du maclage des échantillons de Loubieng et de Vic Bilh (Tourneret, 1992) (figure) aboutit aux mêmes compressions subméridiennes, à la compression ENE, ainsi qu'aux extensions NW–SE et ENE.

## 6. Régimes successifs de paléocontraintes et plissements

Dans les régions de Mont-de-Marsan et d'Orthez, on détermine une compression NNE majeure responsable du plissement, puis une compression NNW. Cette succession est également identifiée dans les Pyrénées occidentales (Hervouët et al., 1997), et en Espagne (Thomas et Delfaud, 1990). Le changement, d'origine cinématique, s'est produit à l'Oligocène supérieur (Klitgord et Schouten, 1986). Dans la région d'Orthez, une compression ENE est interprétée comme une déviation locale précoce de la contrainte régionale NNE, aux abords des accidents majeurs N170 avant joué en chevauchements (ainsi responsables de plis locaux d'axe N170). Cette compression déviée existe aussi dans la Chaîne ibérique (Guimera et Alvaro, 1990). Les accidents N170 ont ensuite joué en décrochements dextres (et en décro-chevauchements), en accord avec le serrage régional NNE. D'après les études d'ovalisation des trous de forage (Bell et al., 1992) et de mécanismes au foyer des séismes (Grellet et al., 1993), la compression NNW perdurerait actuellement.

Des extensions ont été aussi reconstituées. À Orthez, une extension NW-SE succédant à la compression ENE est attribuée à une perturbation locale des contraintes, associée à cette compression. Les mesures ayant été prises sur des anticlinaux, l'extension NNE est interprétée comme un étirement d'extrados. L'extension locale WNW est probablement due à la relaxation de la compression NNE à l'Oligocène, et l'extension ENE régionale est attribuée à la relaxation de la compression NNW après le Miocène. Un même événement tectonique correspond ainsi à de multiples champs de contraintes.

Ainsi, les compressions NNE et NNW déterminées par l'analyse des failles et des macles sont régionalement significatives, et sont liées à un changement cinématique oligocène. Pour chacune de ces phases, bien d'autres états de contraintes cénozoïques compressifs et extensifs sont identifiés au front des Pyrénées. Cette complexité apparente ne reflète pas systématiquement un polyphasage, mais des adaptations locales liées à un héritage structural majeur (virgation de plis et compression déviée) et au diapirisme salifère (extensions), dans un contexte général de convergence globalement nord-sud des plaques Ibérie/Afrique et Eurasie.

**Remerciements :** Les travaux de terrain et de laboratoire ont été soutenus par Gaz de France. Nous voudrions également remercier B. Deffontaines pour son aide dans l'élaboration du schéma structural.

#### RÉFÉRENCES

Angelier J. 1990. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. III: A new rapid direct inversion method by analytical means, *Geophys. J. Int.*, 103, 363–376

Bell J. S., Caillet G. et Le Marrec A. 1992. The present-day stress regime of the southwestern part of the Aquitcine Basin, France, as indicated by oil well data, *J. Struct. Geol.*, 14, (8/9), 1019–1032 Brunet M.-F. 1991. Subsidence et géodynamique du Bassin d'Aquitaine. Relations avec l'ouverture de l'Atlantique, *Thèse Sci.*, Univ. Paris VI, 288 p.

Deffontaines B. 1991. Développement d'une méthodologie d'analyse morphostructurale et morphotectonique. Analyse des sufaces enveloppes du réseau hydrographique et modèles numériques de terrain. Applications au NE de la France, *Thèse Sci.*, Univ. Paris VI, n° 90-6, et *Rapport Interne BRGM* n° 32005, 194 p. + annexe

Deramond J., Souquet P., Fondecave M.-J. et Specht M. 1993. Relationships between thrust tectonics and sequence stratigraphy surfaces in foredeeps: model and examples from the Pyrenees (Cretaceous-Eocene, France, Spain), *Geol. Soc. Special Publ.*, 71, 193–219

ECORS Pyrenees team, 1988. The ECORS deep reflection seismic survey across the Pyrenees, *Nature*, 331, 508–511

Etchecopar A. 1984. Étude des états de contraintes en tectonique cassante et simulation de déformations plastiques (approche mathématique), *Thèse Sci.*, Univ. Sci. et Tech. du Languedoc, Montpellier, France, 270 p

Guimera J. et Alvaro M. 1990. Structure de la compression alpine dans la Chaîne ibérique et la Chaîne côtière catalane (Espagne), *Bull. Soc. géol. France*, 8 (2), 339–348

Grellet B., Combes P., Granier T., Philip H. et Mohammadiou B. 1993. Sismotectonique de la France métropolitaine, *Mém. Soc. géol. France*, 164, 1, 76 p.; 2, 24 pl., 1 carte

Hervouet Y., Klarica S. et Roddaz B. 1997. Déformations alpines, inversion tectonique négative et karstogenèse : exemple de la Pierre Saint-Martin (Pyrénées-Atlantiques, France), *Bull. Soc. géol. France*, 168, 663–674

Klitgord K. et Schouten H. 1986. Plate kinematics of the Central Altantic, *In:* Vogt P.R. et Tucholke B.E. (éds), *The Western North Atlantic Region: Boulder, Colorado*, Geol. Soc. of America, The Geology of North America, vol. M, 351–377

Thomas G. et Delfaud J. 1990. Mise en évidence de décrochements dextres NW-SE contemporains de la sédimentation oligomiocène dans le bassin de Jaca-Pampelune (Pyrénées sudoccidentales, Espagne), C. R. Acad. Sci. Paris, série II, 801-806

Tourneret C. 1990. I. Maclage et états de contraintes dans les roches carbonatées du domaine fragile. Application à des plates-formes d'avant-pays de chaînes (Pyrénées, Alpes). II. Recherche des directions des contraintes tectoniques dans trois champs d'hydrocarbures d'Aquitaine, *Thèse Sci.*, Univ. de Montpellier II, I : 196 p. ; II : 28 p.