

## CONCOURS G2E

# GÉOLOGIE

Durée : 3 heures

---

Les calculatrices programmables et alphanumériques sont autorisées. Les téléphones portables et autres "smartphones" doivent être éteints au cours de l'épreuve et ne doivent en aucun cas être utilisés même à titre de montre.

L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est strictement interdit.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il en fait mention dans sa copie et poursuit sa composition. Dans ce cas, il indique clairement la raison des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les candidats doivent respecter les notations de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la numérotation de la question posée. Pour chaque réponse, on demande un développement concis et explicite ; ceci, afin de pouvoir répondre à l'ensemble des questions du sujet.

La rédaction se fera uniquement à l'encre bleue ou noire et l'utilisation du blanc correcteur est interdite. Une grande attention sera apportée à la clarté de la rédaction et à la présentation des différents schémas.

---

**Attention ! Les figures 9, 12 et 13, ainsi que les tableaux 1 et 4 en annexe, sont à rendre avec votre copie, sans découpage ni collage.**

### Géologie des Cordillères Bétiques et du bassin d'Alboran

Les Cordillères Bétiques constituent une importante chaîne de montagnes au sud-est de l'Espagne. Elles se prolongent par la chaîne du Rif, au nord de l'Afrique, en dessinant un arc passant par Gibraltar. Ces deux chaînes appartiennent à la ceinture orogénique alpine du sud de l'Europe (Fig. 1). Depuis le Paléozoïque, la région concernée a connu une première période d'océanisation importante au Jurassique, après le rifting triasique (250 Ma) qui a morcelé un vaste continent structuré durant l'orogénèse hercynienne, puis une deuxième période au Néogène. La convergence Afrique-Europe, qui a débuté au Crétacé, se poursuit actuellement, faisant du pourtour méditerranéen une zone tectoniquement active (Fig. 2). La convergence a été accommodée par des zones de subduction, puis par des collisions continentales, responsables, entre autre, de la formation des Cordillères Bétiques et du Rif. Ces deux chaînes ont en commun leurs zones internes, qui comportent plusieurs unités, dont des ophiolites, métamorphisées à haute pression. Les zones internes chevauchent les zones externes, vers le nord dans les Cordillères Bétiques, et vers le sud dans le Rif. La remontée des unités de haute pression vers la surface a été favorisée par une extension post-orogénique, au Néogène, conduisant à la formation de bassins sédimentaires, dont le bassin océanique d'Alboran (Fig. 1). L'extension du bassin d'Alboran aurait été facilitée par la rotation anti-horaire de la zone de subduction longeant l'océan Bétique. Vers l'ouest, le plancher du bassin d'Alboran comporte des roches crustales exhumées appartenant aux zones internes. Il est recouvert par des sédiments, d'une épaisseur de 6 à 8 km, déposés depuis le Miocène.

#### 1. SISMICITÉ ET TOMOGRAPHIE (5 POINTS).

La figure 3 montre trois coupes tomographiques qui mettent en évidence la structure profonde de la zone ouest méditerranéenne, en passant par les Cordillères Bétiques, le Rif, et la mer d'Alboran.

1.1. Comment ces images tomographiques sont-elles obtenues ?

1.2. Que met-on en évidence avec les enregistrements de tomographie sismique ?

1.3. Sur la coupe a (Fig. 3), des tirets noirs ont été placés horizontalement à des profondeurs voisines de 410 et 670 km. Quelle est l'expression minéralogique de ces horizons géophysiques ?

1.4. Dénommer les enveloppes terrestres de part et d'autre de l'horizon géophysique à 670 km.

1.5. Analyser successivement les coupes a à c (Fig. 3), et traduire leur évolution en terme de tectonique des plaques.

1.6. Quel modèle convectif rendrait mieux compte des observations effectuées à partir de la coupe a (Fig. 3) ?

1.7. La coupe de la figure 4 montre la répartition des vitesses des ondes sismiques,  $V_p$  ( $\text{km.s}^{-1}$ ), de la côte nord ouest de l'Espagne à la mer d'Alboran, au sud de l'Espagne (voir localisation de la coupe en figure 1). On retiendra trois enveloppes majeures avec  $V_p < 6,5$  ( $\text{km.s}^{-1}$ );  $6,5 < V_p < 7$  ( $\text{km.s}^{-1}$ );  $V_p > 7$  ( $\text{km.s}^{-1}$ ). Compléter le tableau 1 en précisant : (i) le nom des discontinuités séparant les zones majeures définies précédemment, (ii) le nom des enveloppes, (iii) la lithologie type, et (iv) le type de croûte sous le massif ibérique.

1.8. Décrire et expliquer la structure de la marge nord de la péninsule ibérique (Fig. 4).

1.9. Décrire et expliquer la structure de la marge sud de la péninsule ibérique (Cordillères Bétiques et mer d'Alboran) à partir des figures 1 à 6.

## **2. OPHIOLITES ET PÉRIDOTITES DANS L'ARC BÉTIQUE-RIFAIN (7 POINTS).**

La micro-plaque ibérique a joué un grand rôle lors de l'ouverture du corridor océanique (océan ligure) qui s'est développé en transtension à partir de l'océan Atlantique central, au Jurassique inférieur et moyen. Cet océan ligure est subdivisé en plusieurs bassins océaniques échelonnés d'est en ouest (Fig. 7) avec, au niveau de l'Espagne, l'océan Bétique. Ce dernier, d'une longueur de l'ordre de 700 km, a établi une jonction entre l'Océan Atlantique et le reste de la Téthys Ligure. Des ophiolites, témoins de l'océan Bétique, sont tectoniquement intercalées dans les zones internes des Cordillères Bétiques (Fig. 5 et 6). Dans ces ophiolites, dont la puissance est inférieure à 1000m, les laves et les roches gabbroïques (gabbros à olivine et gabbros s.s.), sont rares par rapport aux péridotites mantelliques sous-jacentes. Les compositions de deux péridotites mantelliques (Iherzolite et harzburgite), d'un basalte et de deux gabbros prélevés dans les ophiolites des Cordillères Bétiques, sont reportées dans le tableau 2.

2.1. Souligner, de manière concise, les différences de composition géochimique entre les péridotites, et entre les péridotites et le basalte (ne pas considérer  $\text{SiO}_2$  pour les péridotites entre elles).

2.2. Comment peut-on obtenir des harzburgites à partir des Iherzolites ? On donnera, de façon succincte, des arguments géochimiques, minéralogiques et pétrologiques.

2.3. Quel processus magmatique est à l'origine des gabbros dans les ophiolites ? Nommer ce processus.

2.4. Comment expliquer les variations de compositions observées entre les deux gabbros ?

2.5. L'âge des bassins océaniques est déduit de la datation des zircons des gabbros et des sédiments supra-ophiolitiques associés (Fig. 8). Déterminer la durée moyenne de l'océanisation à l'origine de l'océan Bétique.

2.6. Si on estime une vitesse d'expansion inférieure à 5 cm par an, indiquer la largeur maximale du bassin océanique Bétique.

2.7. Dans les Cordillères Bétiques, la chaîne du Rif, et dans l'actuel banc de Gorringe à proximité de l'Espagne (Fig. 2 et 5), les lherzolites sont relativement courantes par rapport aux harzburgites. En tenant compte de cette observation et des réponses aux questions précédentes, comment la croûte océanique bétique s'est-elle formée ?

2.8. Indiquer, sur la figure 9, le cheminement du liquide basaltique issu de la fusion des péridotites mantelliques au niveau d'une dorsale.

2.9. Les écailles de péridotites incorporées aux Cordillères Bétiques et au Rif peuvent renfermer du plagioclase, du spinelle, et quelquefois du grenat (Fig. 9 et 10). Décrire précisément la lame mince de l'échantillon de péridotite (Fig. 10c).

2.10. Indiquer la trajectoire suivie par l'échantillon de péridotite de la figure 10c sur le diagramme P-T de la figure 9.

2.11. Lorsque du grenat est présent dans une péridotite (Fig. 10), quelle peut être l'origine de la péridotite ? Indiquer un contexte géodynamique possible.

2.12. Les données isotopiques  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  versus  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , calculées à 185 Ma, d'échantillons de basaltes et gabbros, issus des ophiolites bétiques, sont reportées sur la figure 11, avec les domaines de composition de basaltes de sites géodynamiques actuels (OIB, CFB, MORB). Comment obtient-on les rapports  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  et  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ?

2.13. Comment expliquer la dispersion des points des échantillons des ophiolites bétiques dans le diagramme  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  versus  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Fig. 11) si on écarte l'influence d'une contamination de la zone de subduction lors de la fusion du manteau ?

### 3. TECTONIQUE (5 POINTS).

3.1. Suivant le profil topographique proposé (Fig. 12), réaliser une coupe géologique simplifiée NW-SE puis NE-SW (voir localisation, Fig. 5), passant par la mer d'Alboran. On précisera les limites des principales zones tectoniques : bassins néogènes, zones externes, zones internes et flyschs.

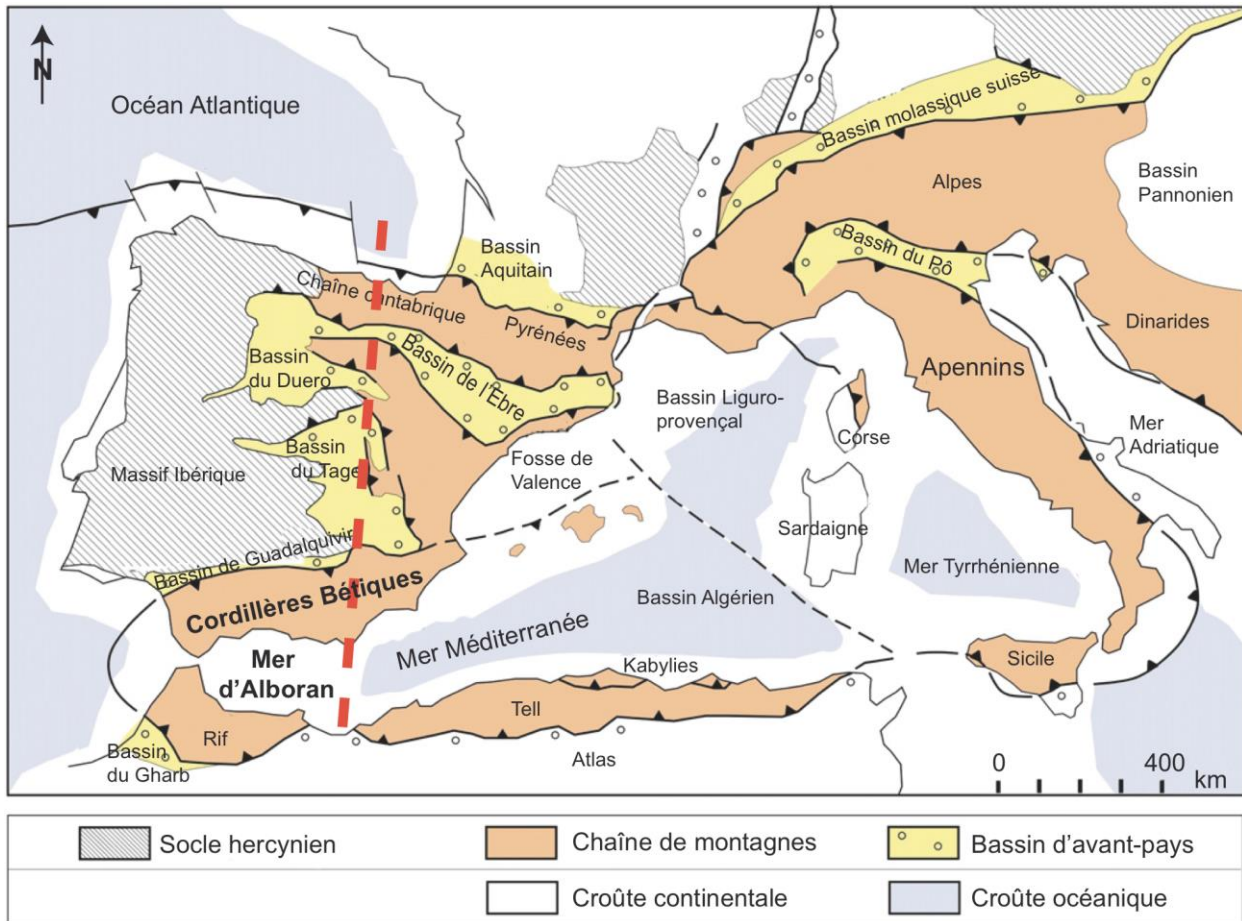
3.2. Les principaux événements associés à la formation des Cordillères Bétiques et du bassin d'Alboran sont résumés dans le tableau 3. Reporter, sur la figure 9, le chemin P et T suivi par les zones internes.

3.3. Quatre déformations majeures (D1 à D4), associées à des épisodes métamorphiques distincts, structurent les Cordillères Bétiques et ont accompagné, en partie, la formation du bassin d'Alboran. Au nord de ce bassin, un dôme tectono-métamorphique permet aux unités les plus internes (Alpujarides et Névalo-Filabrides) d'affleurer.

Sur la figure 13, réalisée à partir d'une coupe N-S perpendiculaire au dôme, (i) replacer les différentes déformations (D1 à D4) dans les cadres noirs, (ii) légendier les objets, (iii) préciser pour chaque déformation (D1 à D4) les directions de raccourcissement, d'allongement et/ou de cisaillement qui ont conduit à leur développement.

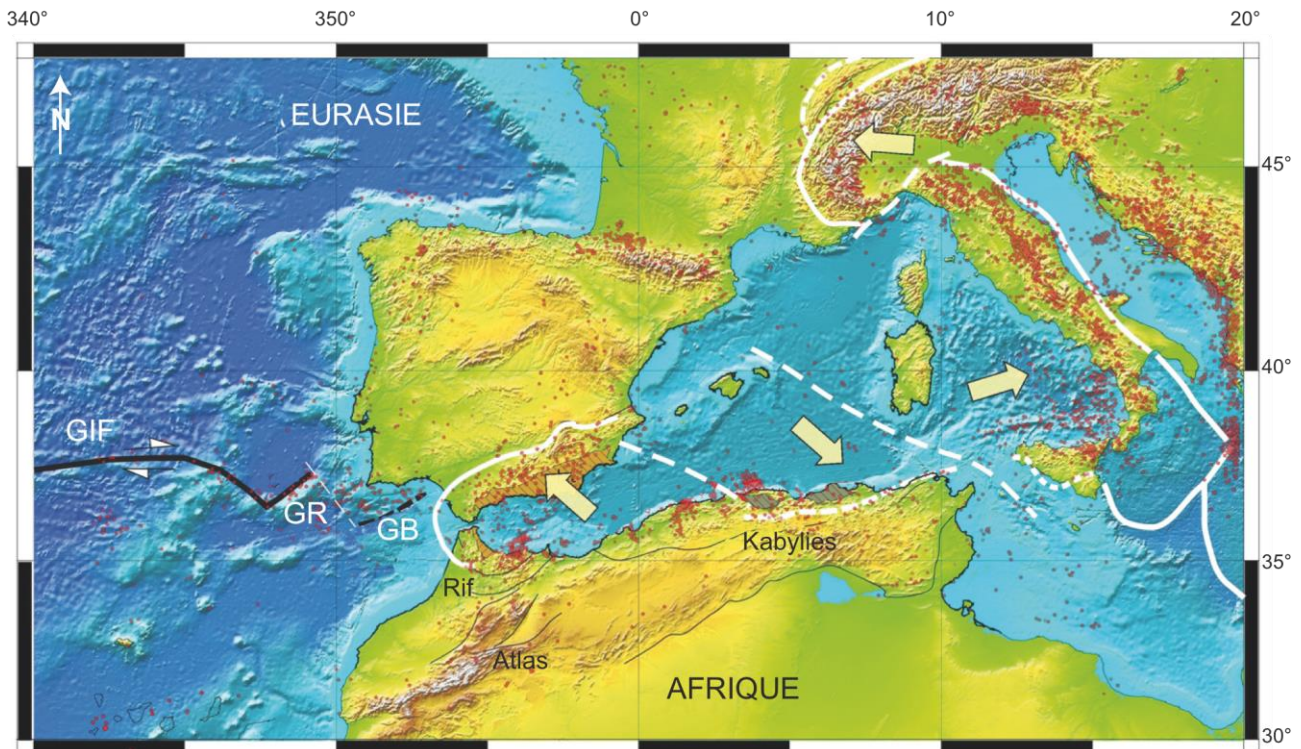
### 4. SYNTHÈSE (3 POINTS).

Reporter sur le tableau 4, la succession des principaux événements géodynamiques, en précisant leur nature afin de rendre compte de la structure actuelle des Cordillères Bétiques et du bassin d'Alboran. Chaque événement sera spécifié dans le tableau par un segment limité par des flèches opposées. La longueur du segment tiendra compte de la durée du processus indiqué.



**Figure 1.** Carte tectonique simplifiée de la Méditerranée occidentale.

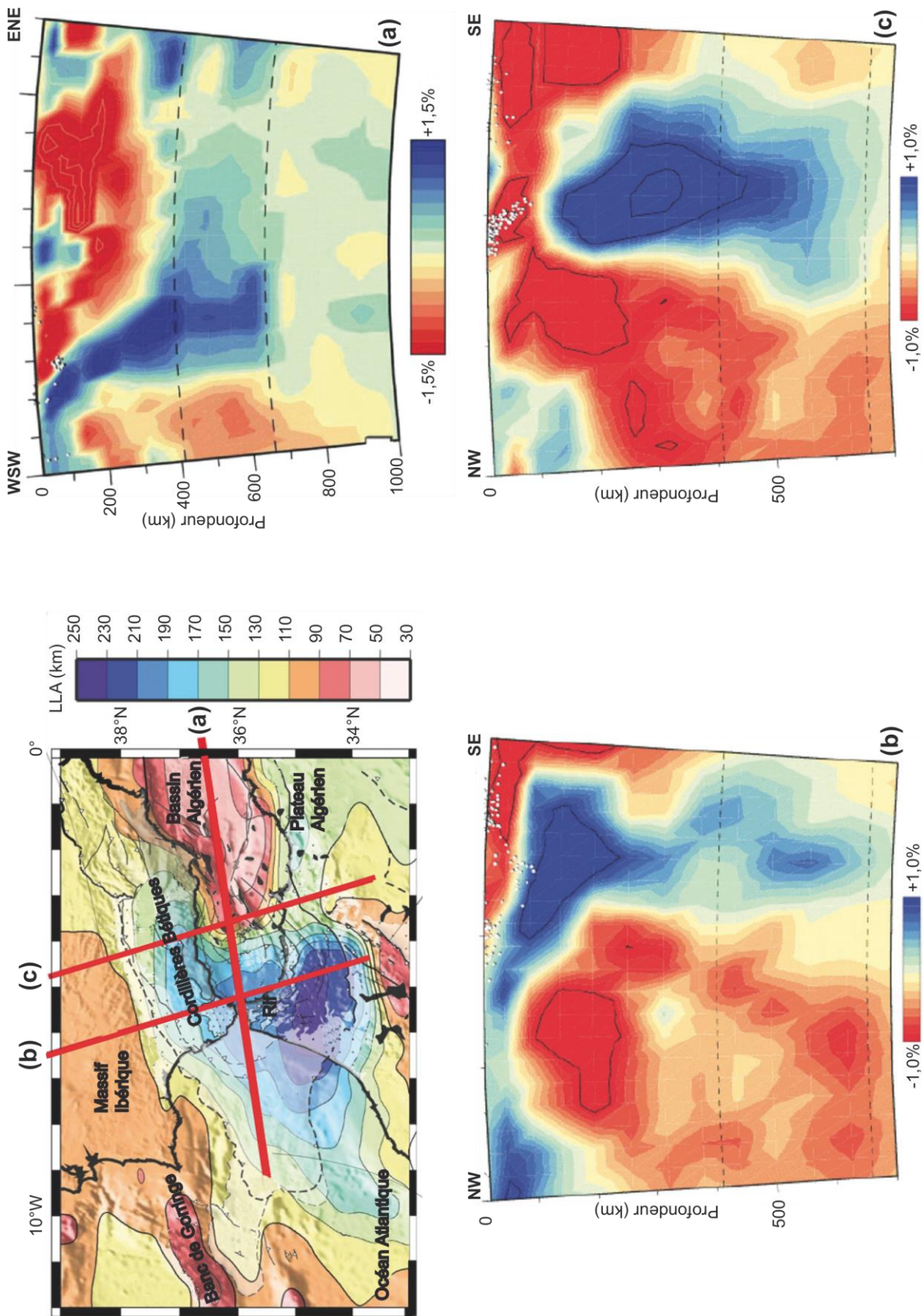
Le trait rouge en pointillé, d'orientation Nord-Sud, correspond à la position de la coupe géophysique de la figure 4.



**Figure 2.** Carte topographique et bathymétrique centrée sur la Méditerranée occidentale.

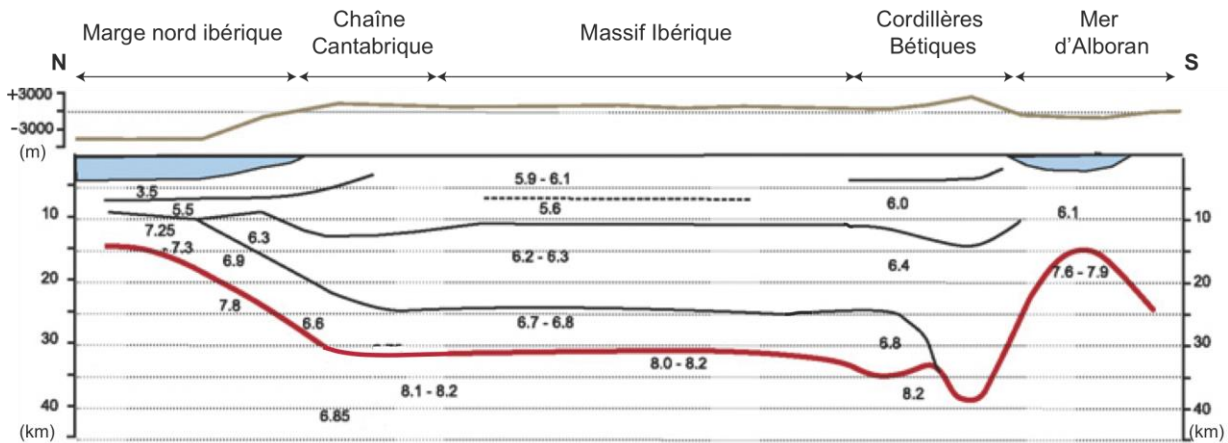
Les petits points en rouge indiquent la localisation des séismes. Les lignes blanches soulignent le caractère arcué des chaînes de montagnes. Les tirets blancs correspondent à des failles transformantes actuelles ou anciennes. Les flèches jaunes indiquent les directions des poussées majeures actuelles.

GIF, faille de Gibraltar ; GR, banc de Gorringe ; GB, banc de Guadalquivir.

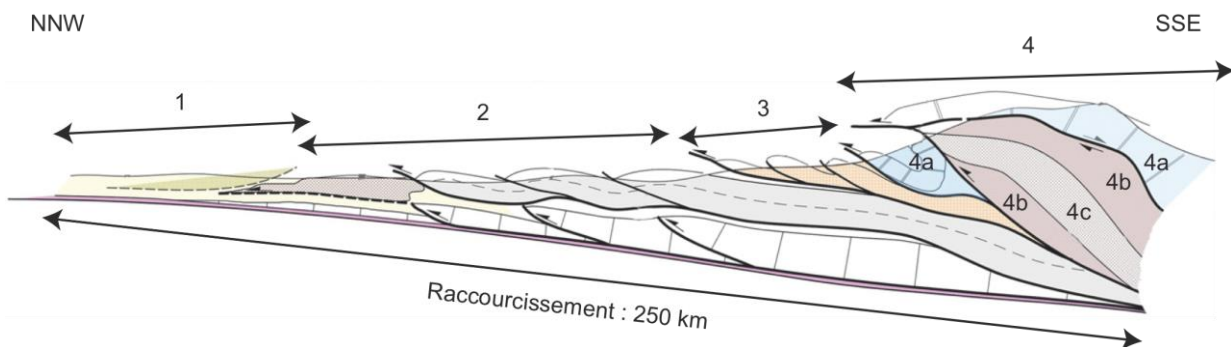


**Figure 3.** Coupes tomographiques (a à c) dans l'arc bético-rifain.

La carte montre la profondeur (en km) de la limite lithosphère-asthénosphère (LLA), et la localisation des trois profils tomographiques. Les petits points blancs sur les profils correspondent aux hypocentres des séismes.

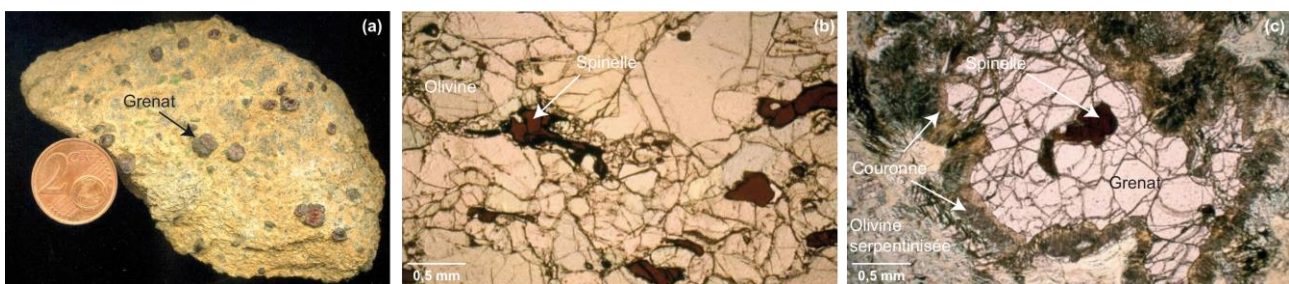


**Figure 4.** Profil de distribution des vitesses des ondes sismiques en fonction de la profondeur, le long d'une coupe Nord-Sud, sous la péninsule ibérique, de sa marge nord à la mer d'Alboran. Un profil topographique est dessiné dans la partie haute de la figure. Voir localisation de la coupe sur la figure 1.



**Figure 6.** Coupe géologique schématique synthétique (sans échelle) des Cordillères Bétiques au bassin d'avant-pays de Guadalquivir.

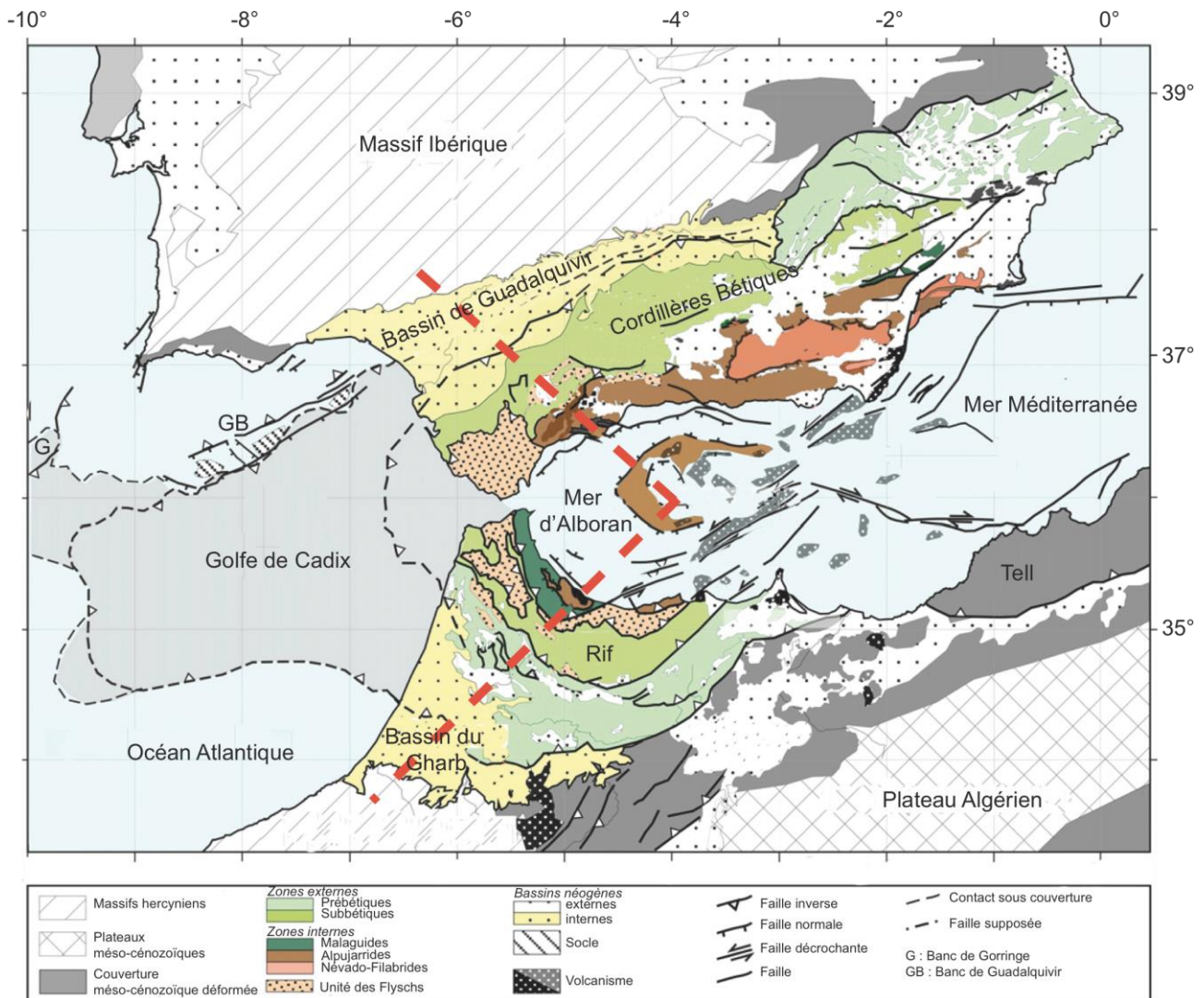
- 1 : Bassin d'avant-pays de Guadalquivir (Miocène) ;
- 2 : Zones externes Prébétiques et Subbétiques (Trias à début Miocène) ;
- 3 : Unité des Flyschs (Jurassique à début Crétacé) ;
- 4 : Zones internes, 4a : Malaguides (Paléozoïque à Oligocène), 4b : Alpujarrides (Paléozoïque à Trias), 4c : Névalo-Filabrides (péridotites et/ou ophiolites mésozoïques).



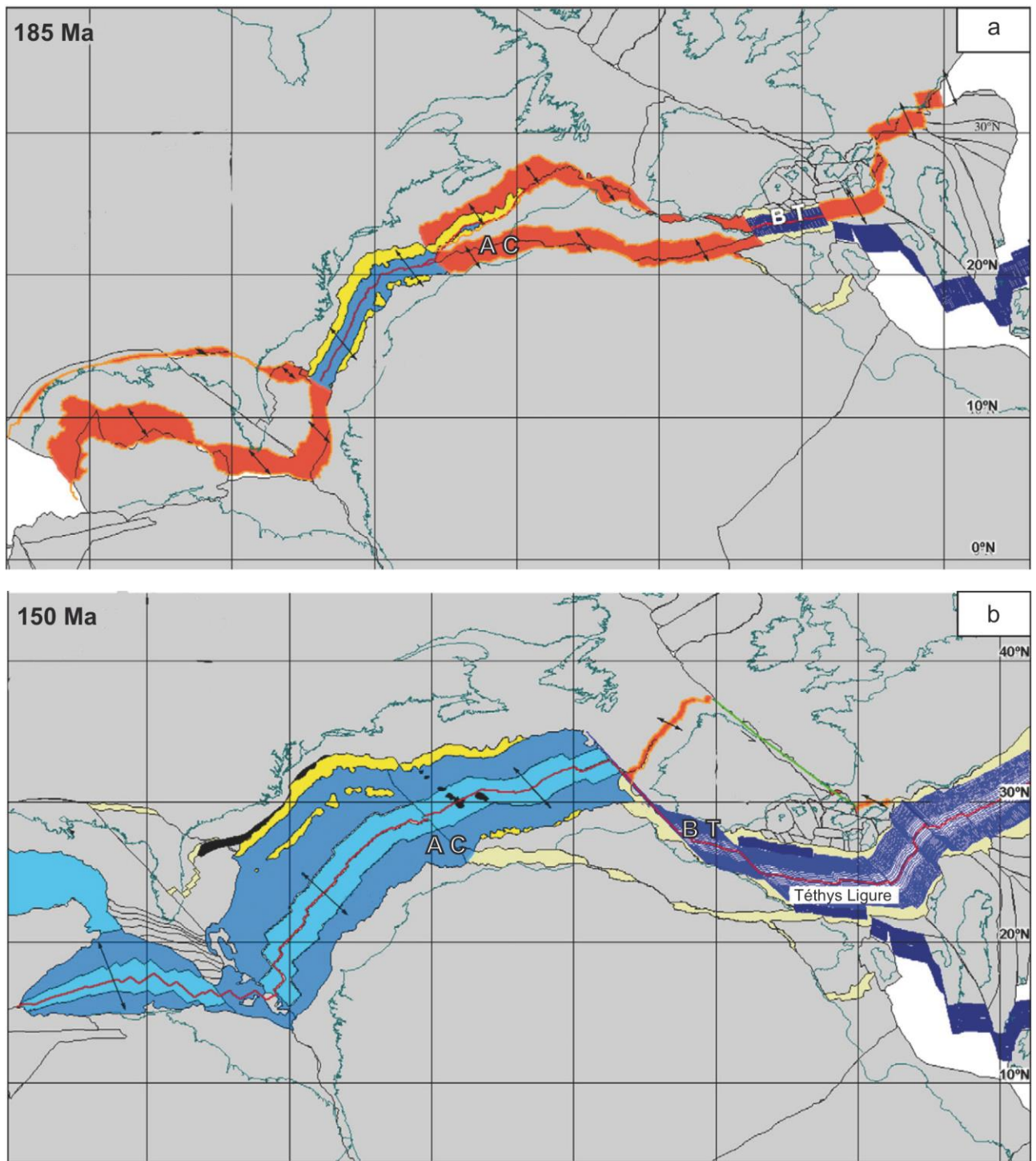
**Figure 10.** Péridotites à grenat et/ou à spinelle ; les autres minéraux sont l'olivine accompagnée de quelques pyroxènes accessoires.

(a) Echantillon macroscopique de péridotite à grenat ; (b) Péridotite à spinelle vue au microscope, en lumière polarisée analysée ; (c) Péridotite à spinelle et grenat, vue au microscope en lumière polarisée analysée. La couronne sombre est constituée de pyroxènes, d'amphiboles et de spinelles microscopiques.

[Photos © Hervé Bertrand - ENS Lyon]

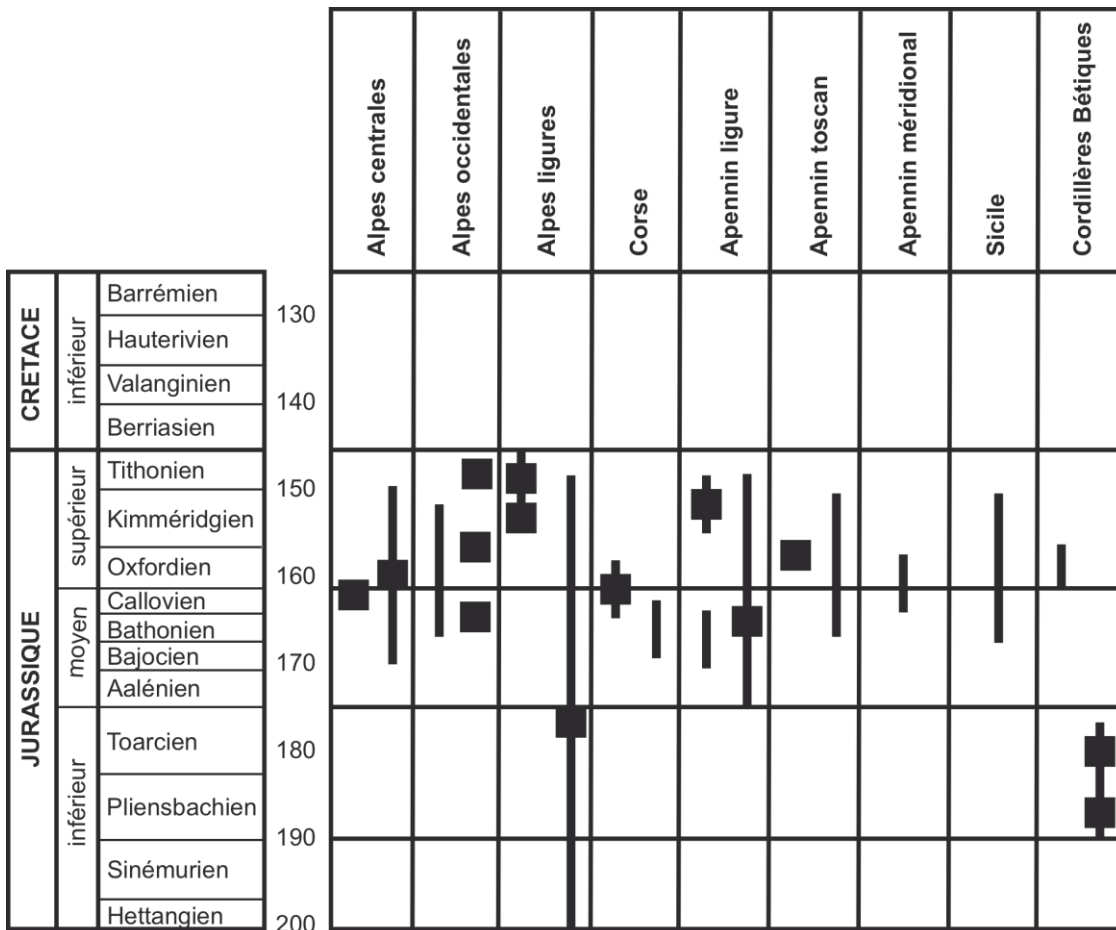


**Figure 5.** Carte géologique montrant les principales unités tectoniques et les bassins sédimentaires associés du système Cordillères Bétiques-Rif. Le trait rouge en pointillé, constitué de deux segments orthogonaux, correspond à la position de la coupe géologique à réaliser (voir figure 12).

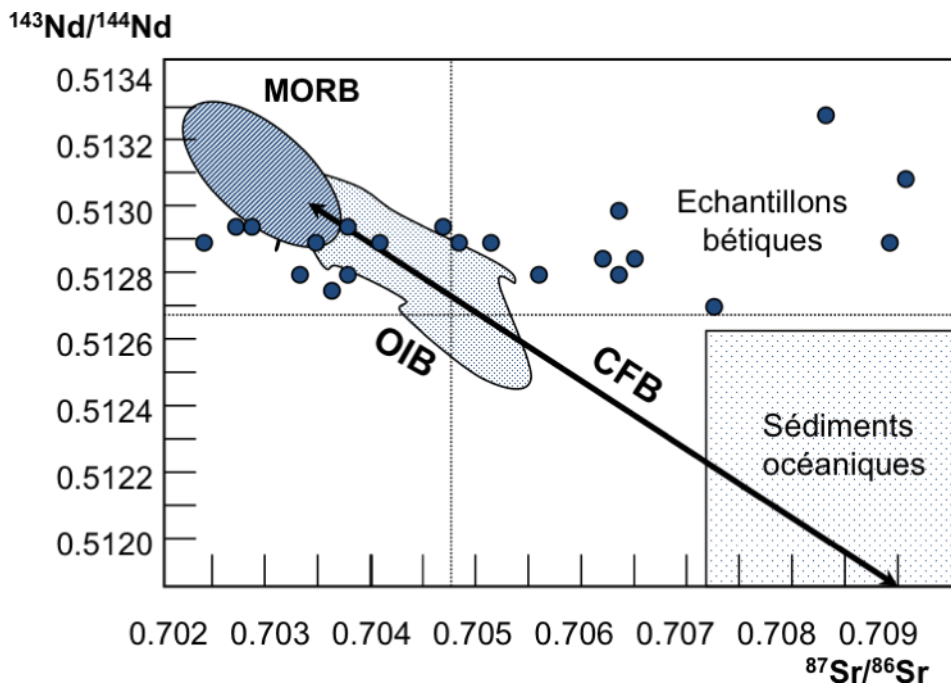


**Figure 7.** Reconstitutions paléogéographiques de la Téthys occidentale et de l'Atlantique central, (a) au Pliensbachien (185 Ma), (b) au Tithonien (150 Ma).  
 AC : Atlantique central, BT : Océan Bétique.  
 Les flèches indiquent les directions principales d'ouverture (extension).





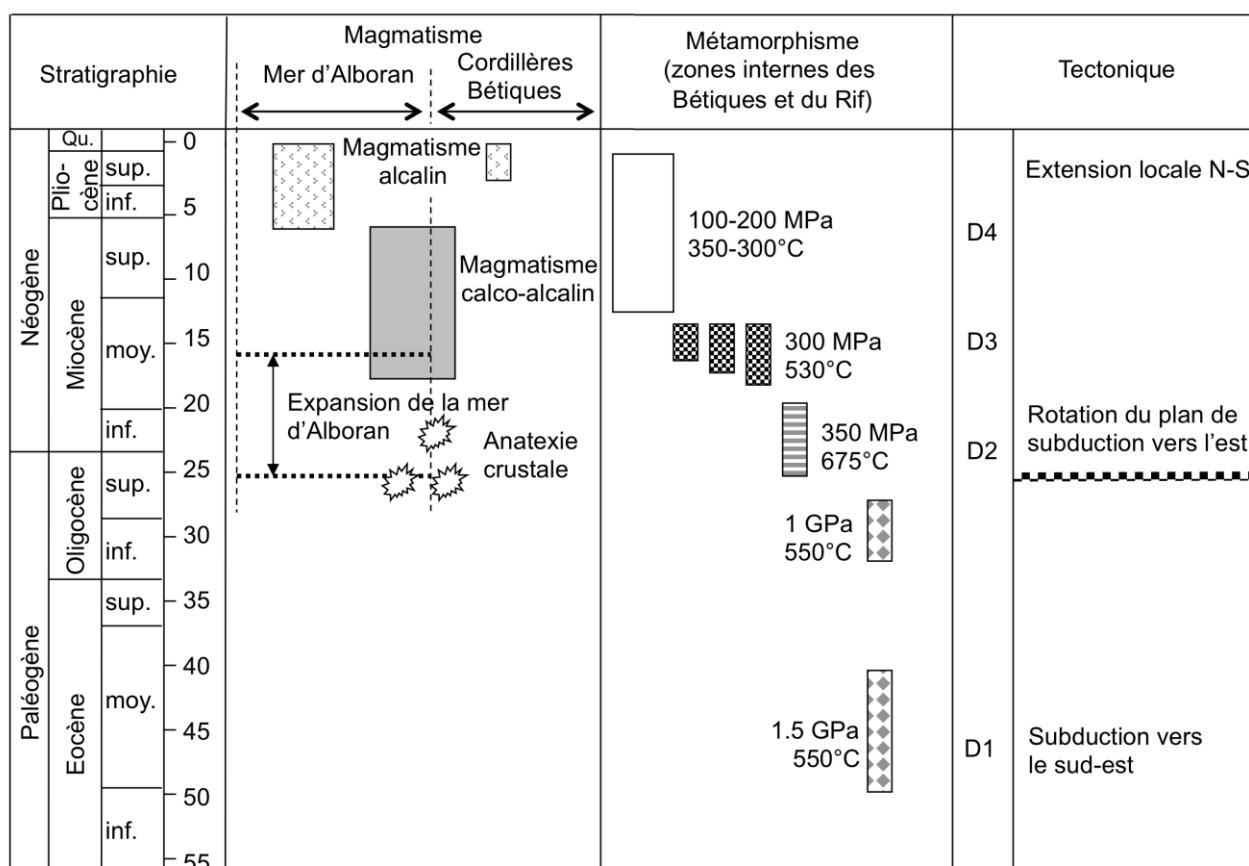
**Figure 8.** Age des sédiments supra-ophiolitiques (trait continu) et des zircons (carrés noirs) datés par U/Pb dans différents bassins océaniques de la Téthys ligure.



**Figure 11.** Diagramme  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  versus  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , calculé à 185 Ma, avec la projection (échantillons matérialisés par des points) de gabbros et basaltes des ophiolites bétiques. CFB : basaltes continentaux, OIB : basaltes océaniques intraplaques, MORB : basaltes des rides médio-océaniques.

Poids en %	Lherzolite	Harzburgite	Basalte	Gabbro (1)	Gabbro (2)
SiO <sub>2</sub>	44,24	46,20	48,83	47,62	49,73
TiO <sub>2</sub>	0,20	0,13	1,51	1,16	1,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,94	3,02	16,63	19,91	9,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,79	8,53	11,49	9,71	13,82
MnO	0,17	0,10	0,16	0,16	0,18
MgO	37,71	41,93	7,18	6,74	14,09
CaO	2,93	0,09	10,82	10,23	8,73
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,00	3,08	4,11	1,66
K <sub>2</sub> O	0,01	0,00	0,16	0,25	0,11
Total	100	100	100	100	100
X = Mg/(Mg+Fe <sup>2+</sup> )	88,41	90,69	55,32	57,89	67,41

**Tableau 2.** Composition chimique des éléments majeurs d'échantillons issus des différents membres de l'ophiolite.



**Tableau 3.** Principaux événements géologiques cénozoïques intéressant la Mer d'Alboran et les Cordillères Bétiques.

Modèle CMEN-DOC v2 A4 ©NEOPTEC

Nom de famille :

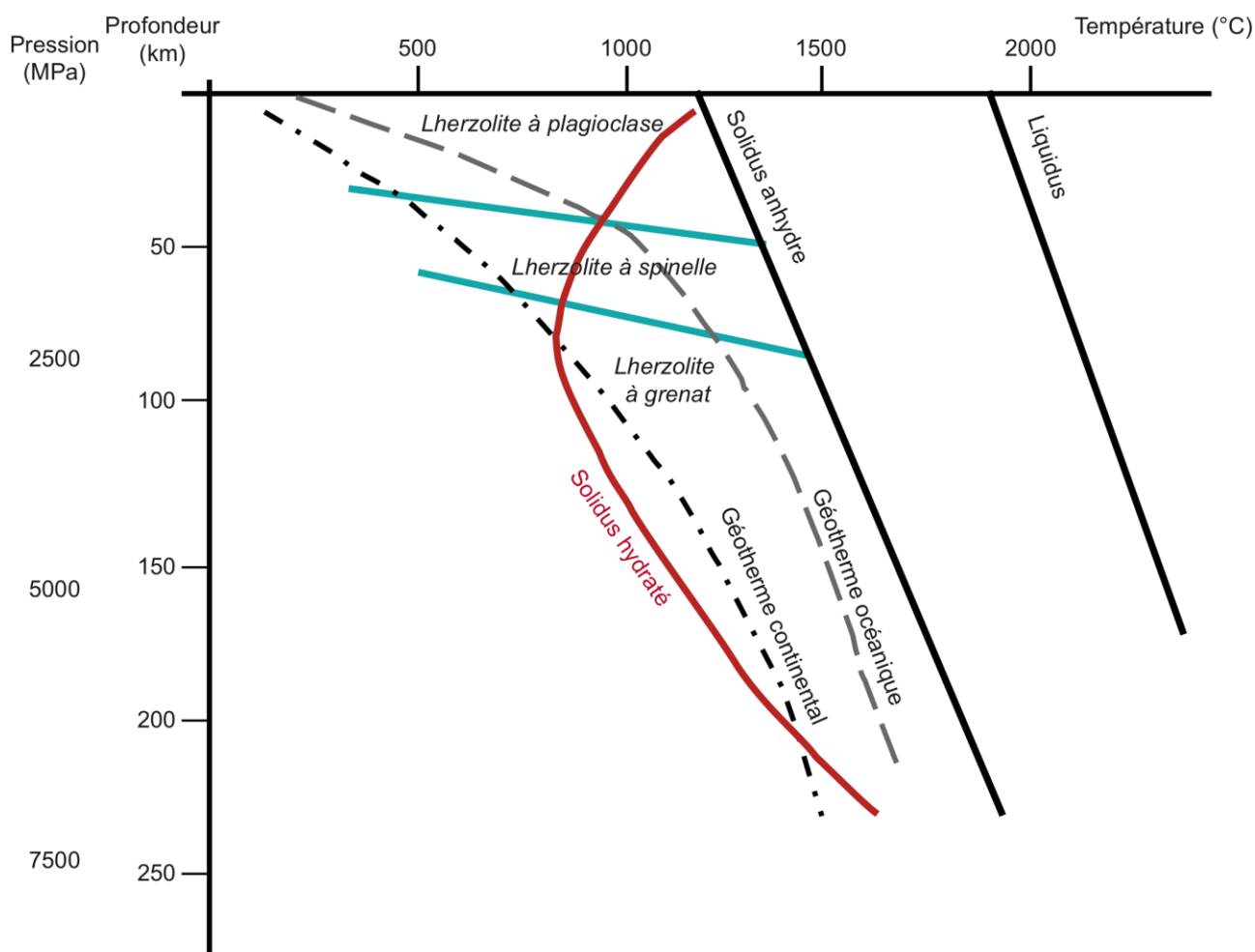
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

Prénom(s) :

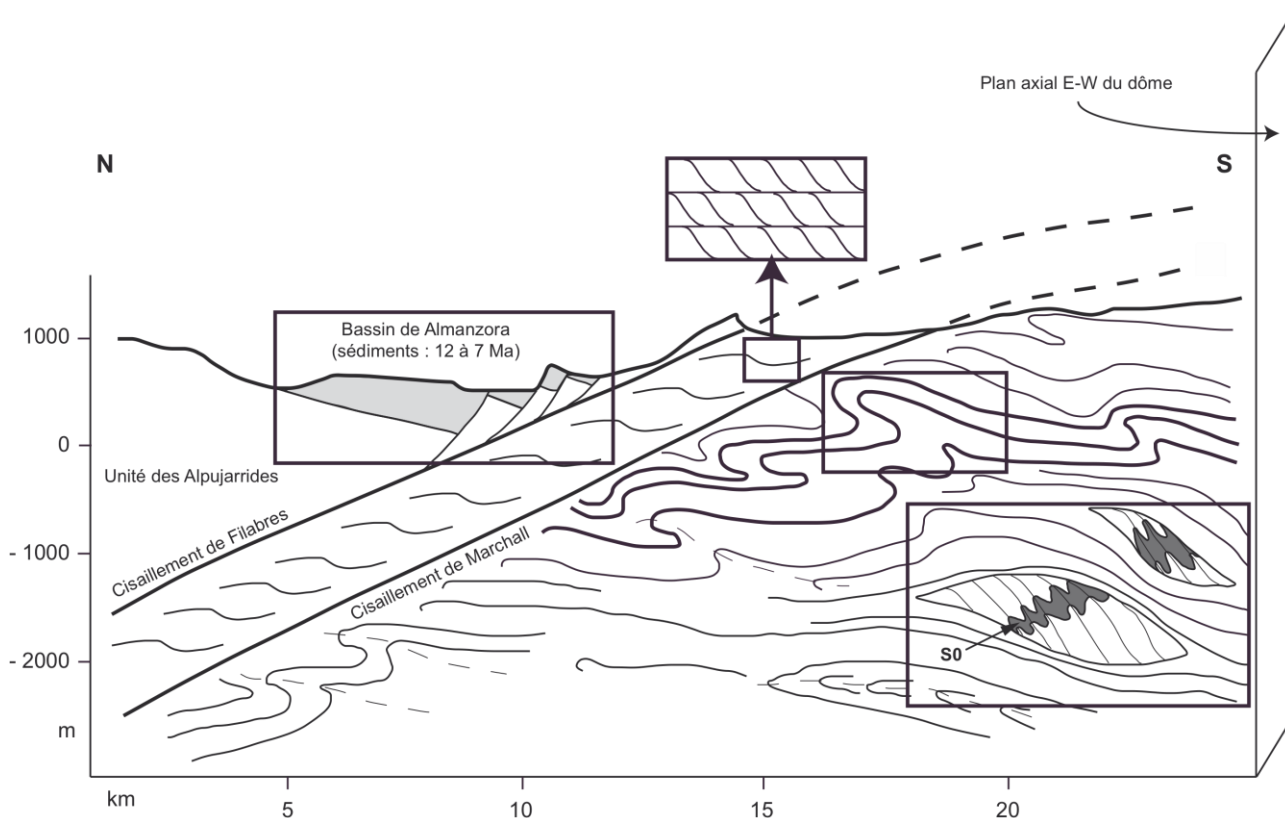
Numéro Inscription :  Né(e) le :  /  /

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

**ANNEXE A RENDRE AVEC VOTRE COPIE SANS DECOUPAGE NI COLLAGE  
UTILISER DES COULEURS VIVES ET CONTRASTEES  
NE PAS UTILISER DE BLANC CORRECTEUR**



**Figure 9.** Diagramme Pression-Température mettant en évidence les domaines de stabilité des lherzolites à plagioclase, spinelle ou grenat, par rapport aux géothermes continental et océanique, et aux courbes solidus-liquidus du manteau péridotitique.

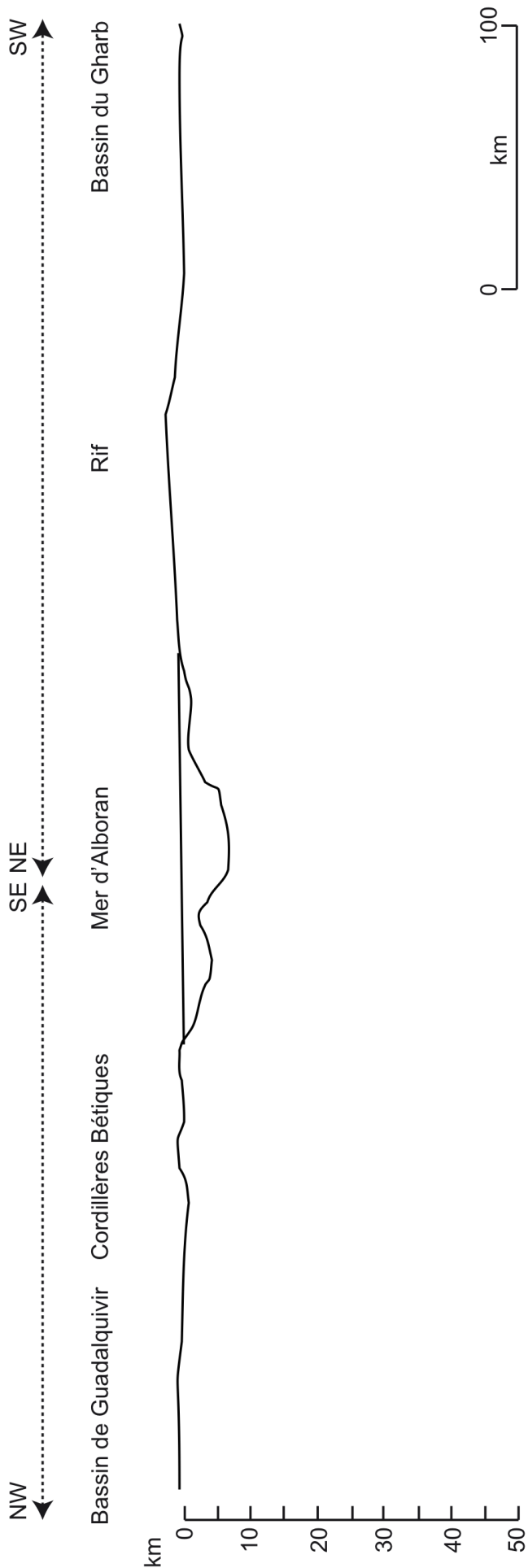


**Figure 13.** Représentation schématique de la déformation des zones internes des Cordillères Bétiques et du bassin d'Almanzora.  
 S0 : rubanement lithologique.

Vitesse des ondes ( $\text{km.s}^{-1}$ )	Discontinuités associées	Nom des enveloppes	Lithologie type
$V_p < 6,5$			
$6,5 < V_p < 7$			
$V_p > 7$			

Type de croûte sous le Massif ibérique :

**Tableau 1.** Constitution du massif ibérique en fonction de la profondeur.



**Figure 12.** Profil topographique simplifié des Cordillères Bétiques au Rif, passant par la Mer d'Alboran. La coupe géologique à réaliser est localisée sur la figure 5 (trait rouge en pointillé, constitué de deux segments orthogonaux).

Strati.	Magmatisme	Métamorphisme	Tectonique
Qu.			
Plio.			
Miocène			
23			
Oligocène			
34			
Eocène			
56			
Paléocène			
66			
Crétacé sup.			
100			
Crétacé inf.			
145			
Jurassique sup.			
168			
Jurassique inf.			
201			
Trias			

**Tableau 4.** Synthèse chronologique (âges absolus en Ma) des principaux événements des Cordillères Bétiques et de la Mer d'Alboran.

Strati. : Stratigraphie, Plio. : Pliocène, Qu. : Quaternaire, inf. : inférieur, sup. : supérieur.