

# La « Mission d'Andalousie », expédition géologique de l'Académie des sciences de Paris à la suite du grand séisme de 1884

Jean Bonnin<sup>a</sup>, Michel Durand-Delga<sup>b,\*</sup>, André Michard<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *École et observatoire des sciences de la Terre, UMR 7516, 5, rue Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France*

<sup>b</sup> *La Péliisserie, 81150 Florentin, France*

<sup>c</sup> *Université Paris-Sud, Orsay et École normale supérieure, 1, rue Maurice-Arnoux, 92120 Montrouge, France*

Reçu le 14 mars 2002 ; accepté le 17 juin 2002

Présenté par Michel Durand-Delga

---

**Abstract – The ‘Mission d’Andalousie’, a geological expedition of the French Academy of Sciences, following the great Andalusian earthquake of 1884.** A major earthquake affected the Betic Cordilleras between Granada and Málaga on Christmas 1884. At once the French Academy of Sciences sent a mission of senior scientists to survey the physical effects of the earthquake and decipher its geological background. The isoseist map constructed by the ‘Mission d’Andalousie’ shows an elliptic maximum intensity zone the great axis of which is remarkably parallel to the EW-trending boundary between the Outer (Sub-Betic) and Inner Betic Zones. The geologists of the Mission finally favoured the hypothesis of a causal link between mountain belt fracturing and seismicity. They performed a remarkable mineralogical study of the metamorphic rocks, unravelling the occurrence of glaucophanites and eclogites. The stratigraphic description of the Triassic to Miocene sedimentary levels by the Mission resulted in the definition of the Sub-Betic Zone. However, the scientific interpretations were hampered both by the lack of technical means (seismographs), and by that of some basic geological concepts (thrust nappes, syntectonic metamorphism). **To cite this article: J. Bonnin et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 795–808.**

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

seismology / stratigraphy (Mesozoic, Cenozoic) / metamorphism / orogeny / Betic Cordilleras

**Résumé –** Le plus récent des trois grands séismes historiques dans les Cordillères bétiques eut lieu à Noël 1884, entre Grenade et Malaga. Il occasionna l’envoi par l’Académie des Sciences d’un groupe de géologues de haut niveau. Ils réalisèrent l’étude pétrographique des péridotites de Ronda et des roches métamorphiques de la « zone Bétique », découvrant éclogites et glaucophanites. De la description, plus au nord, des termes sédimentaires du Trias au Miocène résulta la définition du « Subbétique ». La carte d’isoséistes dressée par la Mission montre une « zone épiscopale » elliptique, allongée d’est en ouest dans la direction du grand « accident nord-bétique », séparant zones interne et externe de la chaîne. Parmi les hypothèses hasardées à l’époque, la Mission, longtemps tentée d’adopter les théories volcaniques/magmatiques sur l’origine des séismes, semble avoir finalement aperçu les rapports entre séismes et fracturation. Cependant, l’interprétation scientifique des phénomènes resta souvent hors d’atteinte, du fait du manque de moyens instrumentaux (sismographes) et parce que certains concepts géologiques essentiels (nappes de charriage, métamorphisme syntectonique) n’étaient pas encore acquis. **Pour citer cet article : J. Bonnin et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 795–808.**

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

séismologie / stratigraphie (Mésozoïque, Cénozoïque) / métamorphisme / orogénie / Cordillères bétiques

---

---

\* Correspondance et tirés à part.  
Adresses e-mail : bonnin@selene.u-strasbg.fr (J. Bonnin),  
michard@geologie.ens.fr (A. Michard).

## Abridged version

### 1. Introduction

The earthquake that affected the mountainous area between Granada and Málaga on Christmas 1884 caused severe damage and heavy casualties, and ranks as the third historical major earthquake in the Betic Cordilleras [1, 37, 42]. The currently accepted parameters are: maximal intensity IX–X MSK; focal depth 10–20 km; magnitude 6.5–6.7. The French Academy of Sciences decided at once to send to Andalusia a mission of senior scientists, directed by F. Fouqué (Fig. 1). They formed three different teams in the field [19]: C. Barrois and A. Offret went to west and south of Sierra Nevada [9]; A. Michel-Lévy and J. Bergeron more to the west, between the Serranía de Ronda and Málaga [35]; and M. Bertrand and W. Kilian to the northern, sedimentary area [15].

### 2. Seismological results

Field observation of the effects of the earthquake upon human artefacts proved to be of the highest quality: they resulted in a damage zonation map (Fig. 2) that closely resembles modern isoseismal maps [37]. Apart from the traditionally alleged causes of earthquakes (influence of celestial bodies, barometric variations), leading Italian scientists [40] strongly favoured, in those times, a volcanic/magmatic origin; members of the French Mission did not formally oppose these views; some of them, however, were more inclined to consider a tight relationship with fracturing (Figs. 3 and 4). In spite of the lack of adequate instruments (seismographs did not exist yet), an attempt has been made at estimating the seismic wave velocities in the near field, from observations of sequential failures of telegraphic traffic, and in the distant field, from observations of disturbances recorded in European magnetic observatories; the factor severely hampering any conclusion has been the lack of reliable time base. Back home, some of the participants in the Mission [23] attempted to develop seismographic instruments and experimental protocols, and they pleaded in favour of a pool of transportable instruments to be deployed in case of occurrence of an earthquake.

### 3. Stratigraphic and structural results

The marked contrast between the ‘Betic Zone’, made up of metamorphic and allegedly ancient terranes, and the northern ‘Sub-Betic Zone’, which mainly shows Jurassic–Cretaceous sediments, was emphasised [13, 14]: Triassic formations occur in both zones, but while they dominantly consist of carbonates in the Betic Zone, they display evaporitic marly sequences with basaltic intercalations (ophites) in the Sub-Betic one. Barrois [9] discovered Triassic *Megalodon* fossils in the Alpujarras crystalline carbonates. Kilian collected remarkable Ammonites faunas, especially in the Lower Liassic and Upper Jurassic layers. North of Granada, intrusion of ‘diorite’ dykes in the Upper Liassic layers was observed [26]. However, it was Taramelli,

i.e. a scientist of the rival Italian mission [40], who established the Late Cretaceous age of the Sub-Betic ‘Couches rouges’, closely similar to the Apenninic ‘Scaglia’ formation. Finally, based on the ‘Atlantic’ character of the faunas in the Pliocene formations, Bergeron claimed [10, 35], being followed by Bertrand [12], that the Atlantic-Mediterranean connection through the Strait of Gibraltar opened up at that time.

### 4. Mineralogical and petrographical results

Barrois and Offret, both skilled mineralogists with a deep practice of polarising microscopy, recognised [9] almost all the minerals that occur in the high-grade (garnet, staurolite, andalusite, sillimanite, kyanite) and low-grade schists (chloritoid, chlorite) of the Betic Zone south and west of the Sierra Nevada (Fig. 5). They occasionally described microstructural details, such as intrafolial folding, or the successive growth of minerals, their position with respect to cleavage, and the occurrence of pressure shadows on garnet blasts. They observed that the same minerals occur in the intrafolial quartz veins and in their country-rocks. Unfortunately, taking as granted the theory of exhalative metamorphism, they interpreted these mineralogical quartz veins as hydrothermal dykes intruding and transforming an old sedimentary pile.

In the Sierra Nevada, Barrois and Offret unravelled the occurrence of blue, Na-amphibole similar to the glaucophane of the Île de Groix. They also described typical eclogites from the same area. However, they failed to conclude that Betic metamorphism could be Alpine, and in line with the current concept of that time, they admitted that the higher-grade rocks were Archean, and the lower-grade ones Cambrian.

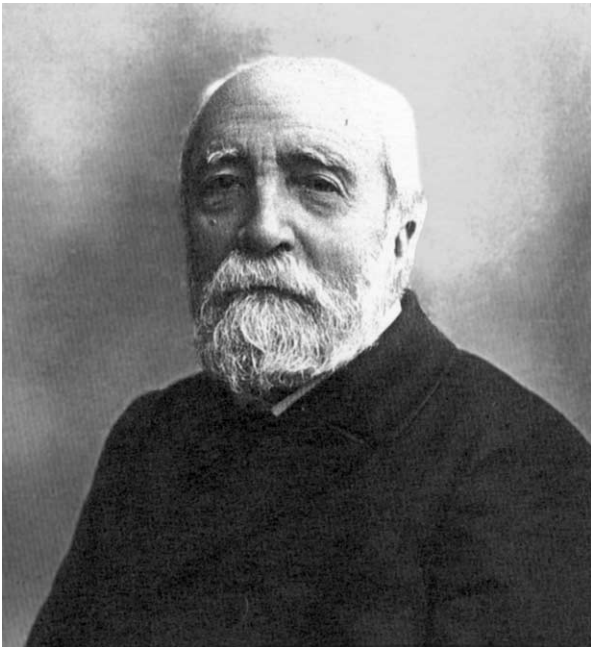
In the western part of the surveyed area, Michel-Lévy and Bergeron described [34], after MacPherson [28], the Ronda peridotites, which they considered as intrusive ‘norites’. However, the authors were puzzled by the apparent weakness of contact metamorphism around the alleged intrusion! On the other hand, they definitely demonstrated that serpentinite minerals form at the expense of olivine and pyroxene crystals, by alteration (hydration) of the dry pristine rock.

### 5. Conclusion

The ‘Mission d’Andalousie’ of the French Academy of Sciences is similar to the modern geologic missions to remote territories: a team of scientists of varied disciplines grapples with the description of a poorly known mountain belt in a short time span. The Mission obtained important results in seismology, with the publication of one of the first isoseismal maps, in stratigraphy, with the definition of the Sub-Betic Zone, and in petrography and mineralogy, with the description of most of the metamorphic rocks of the Betic Zone, including the blueschists and eclogites of Sierra Nevada. The Mission also published the first geological map of the Central Betic Cordilleras at scale 1:600 000. The interpretation of the seismic mechanisms, and that of

the broad structure and evolution of the Andalusian mountain belt were heavily hampered by the lack of technical means (seismographs), and of some basic geological concepts (thrust nappes, syntectonic metamorphism), still to

be elaborated then. In spite of these limitations, the ‘Mission d’Andalousie’ resulted in one of the most successful scientific expeditions sponsored by the French Academy of Sciences during the 19th century.



**Figure 1.** Fernand Fouqué (1828–1904), chef de la « Mission d’Andalousie », membre de l’Académie des sciences, professeur au Collège de France (extrait du Bull. Soc. Fr. Minéral. 28 (1905)).

**Figure 1.** Fernand Fouqué (1828–1904), head of the ‘Mission d’Andalousie’, member of the French Academy of Sciences, Paris, professor at the ‘Collège de France’ (reprinted from Bull. Soc. Fr. Minéral. 28 (1905)).

## 1. Préparation et déroulement de la mission

Le soir de Noël 1884, les montagnes situées au sud-ouest de Grenade, que recouvre une neige d’épaisseur inhabituelle, sont ébranlées par un violent tremblement de terre. Malgré la faible densité de la population, on comptera entre 700 et 900 morts, 1200 à 1500 blessés. Un millier de maisons devront être reconstruites, et environ 14 000 sont endommagées dans plus d’une centaine de villages. L’ébranlement est ressenti dans presque toute la péninsule ibérique [42].

L’Académie des sciences de Paris est alertée, depuis Séville, par le géologue français A.-F. Noguès, qui dirige des exploitations minières [38], et, depuis Cadix, par le savant andalou réputé José MacPherson [29]. Les membres d’une expédition scientifique sont désignés dès le 16 janvier 1885. Fernand Fouqué (1828–1904 ; Fig. 1), connu pour ses travaux sur l’éruption de Santorin en mer Égée, va diriger la mis-

sion. Le 7 février, le groupe atteint Malaga, muni des introductions et des cartes nécessaires. Le 2 mars, Fouqué précise [19] qu’à l’issue d’une tournée commune de 15 jours, les membres de la Mission vont se partager en trois groupes. Charles Barrois (1851–1939), professeur à Lille, et Albert Offret (1857–1933), agrégé-préparateur au Collège de France, étudieront les terrains cristallins entre la zone la plus affectée (Sierra Tejeda) et, vers l’est, les contreforts de la Sierra Nevada ; Auguste Michel-Lévy (1844–1911), ingénieur en chef des Mines, et Jules Bergeron (1853–1919), préparateur à la Sorbonne, se chargeront des mêmes terrains dans les « serranias » occidentales (Ronda) ; enfin, Marcel Bertrand (1847–1907), autre ingénieur des Mines, et Wilfrid Kilian (1862–1925), préparateur à la Sorbonne, examineront les domaines sédimentaires septentrionaux. Malgré la brièveté de leur séjour (du 7 février à la fin mars), les savants français élaboreront un tableau de la géologie du Sud de l’Espagne qui fera date, d’abord au travers d’une quinzaine de publications préliminaires en 1885–1886, puis du mémoire imposant publié à Paris en 1889 [2] et traduit en espagnol en 1892. Plusieurs contributions espagnoles seront publiées aux *Comptes rendus* durant cette période fertile de l’après-séisme, parmi lesquelles il convient de citer la carte des localités affectées de F. de Botella [16] et la note de J. MacPherson [30], insistant sur le « rôle de première importance » joué par la structure géologique régionale.

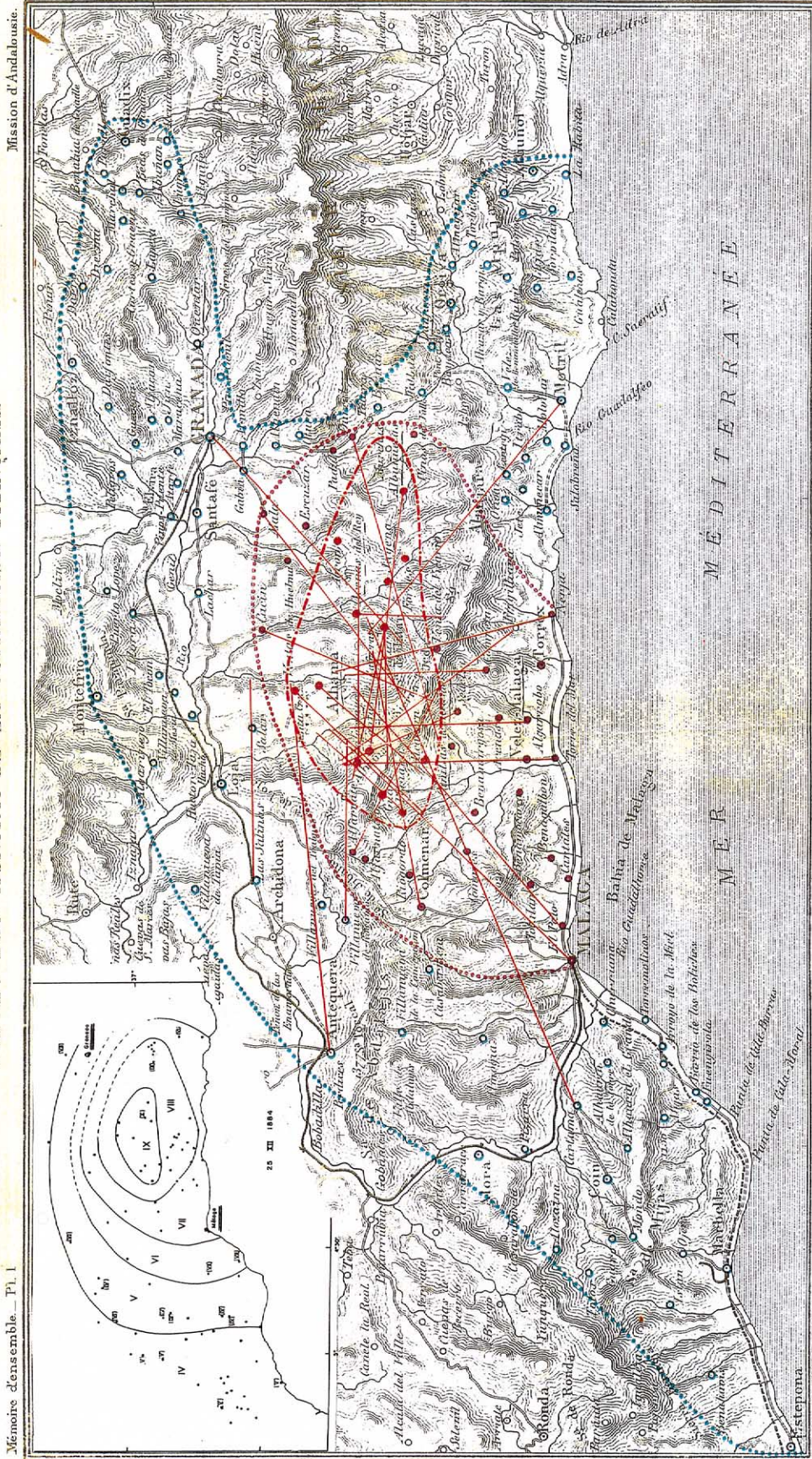
Parallèlement à l’Académie des sciences de Paris, l’Académie romaine des *Lincci*, à l’instigation de l’abbé Antonio Stoppani (1824–1891), organisa une mission, confiée à Torquato Taramelli (1845–1922), stratigraphe de Pavie, et à Giuseppe Mercalli (1850–1914), volcanologue et sismologue de Naples. Arrivés à Malaga le 20 avril, ils donnèrent aux *Lincci* une relation de leur séjour les 10 et 12 juin. Un important mémoire [40], avec d’intéressants schémas géologiques et de zonation sismique, paraîtra en 1886, trois ans avant le mémoire français. Le texte italien apporte de nombreuses et utiles considérations sismologiques, mais n’ajoute guère de résultats géologiques à ceux publiés dans les notes préliminaires de la mission française.

Du côté espagnol, la jeune *Comisión del Mapa geológico*, alors dirigée par l’ingénieur Manuel Fernández de Castro (1825–1895), désigna le 7 janvier 1885 un groupe de six ingénieurs des Mines pour

CARTE DE LA PARTIE DE L'ANDALOUSIE

ÉPROUVÉE PAR LE TREMBLEMENT DE TERRE DU 25 DÉCEMBRE 1884

D'APRÈS LES TRAVAUX DE LA COMMISSION FRANÇAISE



LÉGENDE

- Direction des secousses en chaque point.
- Limites de l'éprouvée.
- " " de la zone moyenne.
- " " " externe.
- " " " externe.
- Localités ruinées par le tremblement de terre.
- " " " fortement endommagées.
- " " " ayant vivement senti les secousses.
- " " " mais n'ayant subi que peu de dommages.

étudier le séisme andalou. À l'issue d'une campagne de terrain de trois mois, un rapport provisoire [18] rappelle les connaissances géologiques acquises avant 1885 sur l'Andalousie. Quant à l'enquête sismologique, elle est fondée sur les résultats de questionnaires détaillés, qui auraient obtenu plusieurs milliers de réponses. Les auteurs considèrent que « *los hechos observados justifican en todo las modernas teorías italianas* ». Ce rapport, suivi de la traduction des quatre premières notes des géologues français, ne semble pas avoir été complété par un mémoire ultérieur.

## 2. Modalités, caractéristiques et causes du séisme

### 2.1. Caractéristiques sismologiques

La carte des isoséistes dressée par la Mission (Fig. 2) permet de situer l'épicentre à proximité des Ventas de Zafarraya, à environ 10 km au sud-ouest d'Alhama, sur la retombée septentrionale de l'axe montagneux qui s'élève entre la Méditerranée d'Alboran et le bassin de Grenade. Le panorama géologique de cette région épacentrale, tel qu'on peut le décrire aujourd'hui (Fig. 3), est remarquable par l'existence d'un couloir faillé, occupé par des terrains récents (Miocène de la zone de Colmenar) et séparant deux ensembles géologiques contrastés, les sédiments du Subbétique, décollés de la croûte ibérique, et les nappes métamorphiques du Bétique. Ce dernier ensemble appartient à un « terrain d'Alboran » (ancienne microplaque, déformée par subduction partielle et collision), charrié vers le nord-ouest à l'Oligocène–Miocène inférieur. La limite entre Bétique et Subbétique est un accident tectonique majeur, appelé « accident nord-bétique ».

Précisons d'abord les paramètres admis actuellement pour le séisme du 25 décembre 1884 [37] : épicentre 36,95°N–3,98°W ; intensité maximale IX–X (MSK) ; profondeur du foyer 10–20 km ; magnitude 6,5–6,7 ; moment sismique  $10^{18}$  N m. Le séisme principal fut suivi de répliques pendant plus d'une année [1] : les principales (intensité VII) se placèrent le 14 février, à l'arrivée de la mission française, et à la mi-avril, à l'arrivée de l'italienne. Les observateurs des missions de 1885 sont tombés d'accord, quant à eux, sur un certain nombre de points concrets au sujet du séisme étudié : (i) la situation, les di-

mensions et la forme ellipsoïdale de la zone qualifiée alors d'« épicentre » (Fig. 2) ; (ii) la profondeur du « centre d'ébranlement », 11 km pour les français, 12–13 km pour les italiens ; (iii) la propagation des ondes, meilleure dans les roches cristallines compactes et suivant la direction des couches ; (iv) enfin, le fait que les grands massifs montagneux ont, soit arrêté (Sierra Nevada), soit dévié (Serrania de Ronda), les « mouvements ondulatoires » émanant du foyer du séisme. En revanche, l'interprétation des causes du phénomène a été fort controversée.

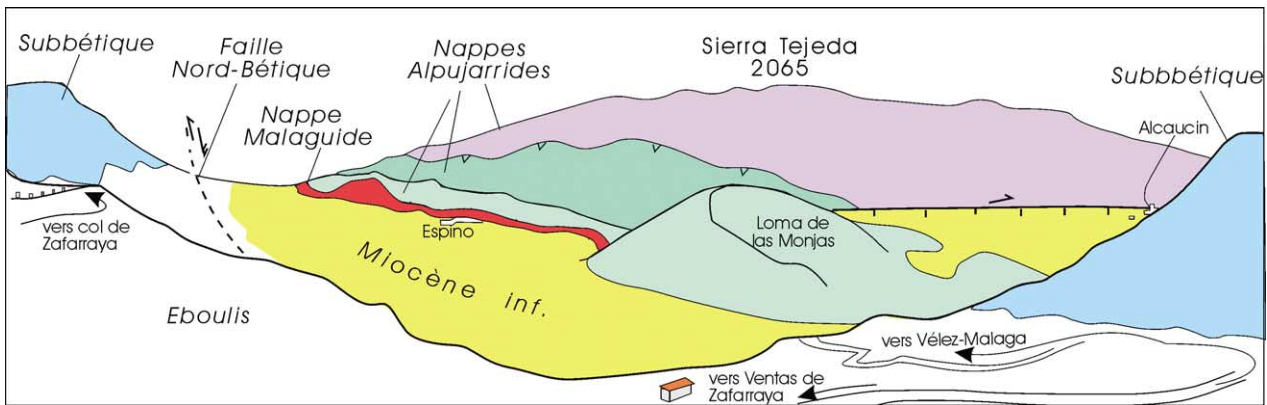
### 2.2. Considérations sismologiques des missions française et italienne

Pour Taramelli et Mercalli [40], suivis par les ingénieurs madrilènes [18], le séisme andalou appartient aux « *terremoti perimetrici* », véritables tempêtes souterraines résultant de la pénétration d'eaux superficielles dans les roches calcaires perméables, si fréquentes dans la zone affectée. De là résulterait « *la expansión accidental de los gases y vapores que se reunen en lo interior de la tierra* » [18]. L'infiltration a pu se produire le long de cours d'eau [18, p. XVII] ou à la limite terre–mer [40, 3<sup>e</sup> §, p. XI]. Les savants italiens n'excluent pas que s'y ajoutent des causes barométriques, telles que les défendait le père Timoteo Bertelli (1826–1905), de Florence, le séisme ayant été précédé et suivi par de fortes variations de pression atmosphérique. Ils écartent, en revanche, l'idée que le séisme andalou appartienne aux « *terremoti vulcanici* » ou encore aux séismes orogéniques, « *terremoti tellurici* », conçus à l'époque comme la conséquence de la contraction thermique du Globe (théorie abandonnée au début du XX<sup>e</sup> siècle, après la mise en évidence de la radioactivité, source de chaleur interne au Globe).

Quant aux géologues français, ils sont hésitants et divisés. En 1885, Fouqué, chef de mission, conclut [20] : « Nous en sommes réduits à accepter les théories volcaniques », peut-être l'intervention « d'une éruption volcanique avortée », mais il n'y en a « aucune démonstration directe ». L'année suivante, Fouqué [22] semble se rallier à l'explication tectonique que défendent Barrois et Offret [5]. Ceux-ci vont insister [6] sur la localisation du séisme sur la bordure faillée d'un « arc tendu » (Fig. 4A). Ils concluent : « Nous sommes ainsi amenés naturellement à regarder les failles transverses de Malaga, Motril, Guadix, comme les lignes prédestinées, suivant lesquelles

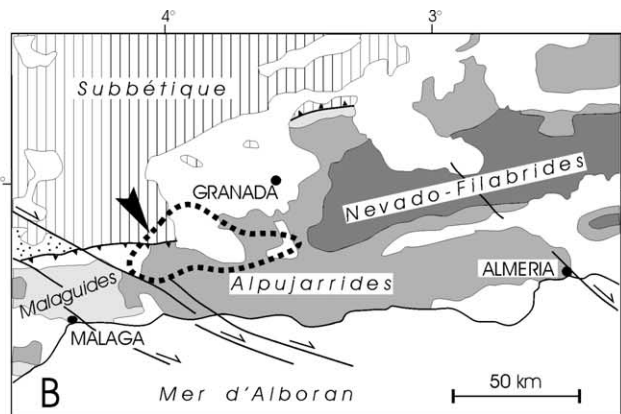
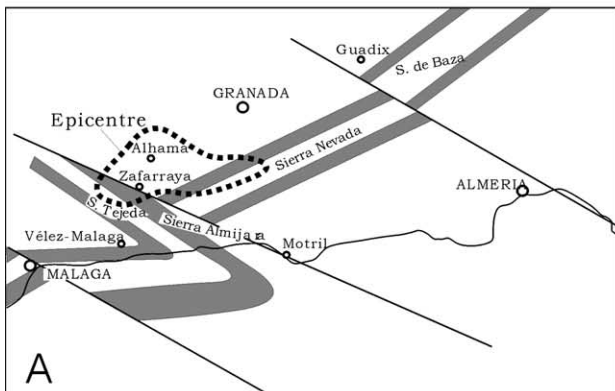
**Figure 2.** Carte des isoséistes du séisme andalou de 1884 (extrait de [2], pl. I réduite). En cartouche : réévaluation de l'intensité du séisme dans l'échelle MKS (extrait de [37], figure 5).

**Figure 2.** Isoseist map of the Andalusian earthquake of 1884 (reprinted from [2], pl. I reduced). Insert: re-calculated MKS seismic intensity (after [37], figure 5).



**Figure 3.** Le secteur de l'épicentre du séisme de 1884, vu du nord-ouest. Localisation : Figs. 2 (10 km au sud-ouest d'Alhama) et 4B. Flèche simple sur la faille nord-bétique NE–SW : chevauchement initial ; flèche double : rejeu extensif. Les dépôts miocènes sont recoupés par une faille normale-dextre NW–SE près d'Alcaucin. Pour des détails cartographiques, voir [3] et [17].

**Figure 3.** The area of the earthquake epicentre, viewed from the northwest. Location: Figs. 2 (10 km south-west of Alhama) and 4B. Simple arrow on the northeast-trending North Betic fault: initial thrusting; double arrow: extensional reactivation. The Miocene deposits are affected by a northwest-trending dextral normal fault close to Alcaucin. For mapping information, see [3] and [17].



**Figure 4.** Localisation de l'épicentre par rapport aux structures tectoniques majeures. **A.** « Carte schématique montrant la structure de la chaîne Bétique » (extrait de [9], figure 20, redessinée). Les bandes en grisé soulignent les directions structurales reconnues par Barrois et Offret. Le pli refermé autour de Vélez-Málaga est une extrapolation abusive, mais les principales fractures tardives sont correctement mises en place. **B.** Schéma structural moderne de la partie centrale des cordillères Bétiques (d'après [31]), complété par la zone épiscopentrale du séisme de 1884 tirée de [9]. La flèche localise le panorama de la Fig. 3. Ligne épaisse avec dents dans le compartiment de toit : faille nord-bétique. Pointillé grossier : flyschs. Blanc : Néogène.

**Figure 4.** Epicentre location with respect to main tectonic structures. **A.** 'Carte schématique montrant la structure de la chaîne Bétique' (from [9], figure 20, redrawn). The grey stripes mark the structural trends recognised by Barrois and Offret. The Vélez-Málaga regional fold is an incorrect extrapolation, but the main late faults are correctly recognised. **B.** Recent structural map of central Betic Cordilleras (after [31]), with the 1884 earthquake 'epicentre' after [9]. Large arrow: location of Fig. 3. Bold line with teeth in the hanging-wall: North-Betic Fault. Dotted: flyschs. White: Neogene basins.

seront surtout appelées à se manifester au dehors, dans la région Bétique, les modifications d'équilibre, ou les actions des forces souterraines ». On relèvera avec intérêt que les trois grandes fractures citées par Barrois et Offret coïncident sensiblement avec celles que représentent les auteurs modernes [33] au travers des nappes bétiques et de leur soubassement subbétique (Fig. 4B). Quant au grand tectonicien que fut Marcel Bertrand, il fait preuve d'inconstance, mais aussi d'une remarquable intuition. À son retour d'Andalousie, il écrit [11], contredisant MacPherson [30] : « L'étude de l'Andalousie ne fournit aucun argument sérieux en faveur de la théorie qui cherche à relier les grands tremblements de terre à d'anciens mouvements orogéniques. D'une manière générale, si ce lien existait, l'existence des tremblements de terre dans une région montagneuse indiquerait, non pas que les forces de plissement y continuent leur action, mais au contraire qu'elles ont cessé, et *« que les effets de distension ont succédé aux efforts de compression... »* (souligné par nous). On sait aujourd'hui l'importance considérable qu'a revêtue l'extension tardi-orogénique dans les Cordillères [31, 39]. Cependant, neuf ans plus tard [12, p. 17], l'opinion de M. Bertrand s'inversera, et il verra dans les tremblements de terre « la suite et comme un dernier écho de cette mobilité exceptionnelle du sol dont nous avons retrouvé les traces dans toute la période Tertiaire ».

Dans le cas particulier étudié, le foyer, à 10–20 km de profondeur sous l'épicentre, pourrait, en fait, être associé à l'une des failles verticales visibles en surface (Fig. 3) et qui font partie d'un système de décrochements actifs, en conformité avec la compression actuelle Ibérie–Afrique, dirigée NNW–SSE (Fig. 4B). L'allongement est–ouest de la zone épiscopentrale (Fig. 2) semble plaider, cependant, pour un foyer associé à des failles ayant cette même direction. Il pourrait s'agir de l'accident nord-bétique lui-même, sous réserve que son pendage s'accroisse fortement en profondeur, comme c'est le cas à l'est de Grenade. Dans la mesure où les travaux récents de tomographie sismique [36] montrent que la croûte ibérique tend à s'enfoncer, précisément à l'aplomb de la région épiscopentrale, pour passer sous celle d'Alboran, on est tenté d'attribuer l'événement de 1884, soit au cisaillement entre les deux croûtes affrontées (c'est-à-dire au prolongement en profondeur de l'accident nord-bétique), soit à des tensions dans la croûte ibérique, tensions liées à sa flexion.

### 2.3. Appréciation des observations sismologiques de la « Mission d'Andalousie »

Bien que composée essentiellement de « géologues » (c'est Fouqué, chef de la Mission, qui le souligne [21]), l'expédition française a effectué de remar-

quables observations macrosismiques. Les membres de la mission manquaient pourtant de moyens d'investigation adaptés, tant conceptuels qu'instrumentaux. Sans recourir explicitement à la notion d'échelle d'intensité, ils ont délimité des zones sur la base de l'importance des dommages observés (Fig. 2), zones qui ne diffèrent guère des courbes isoséistes modernes [37], présentées dans le cartouche de la Fig. 2. La meilleure résistance des constructions fondées sur le « socle », par rapport aux édifices de qualité égale construits sur des formations plus récentes, a été bien notée, de même que ce que nous appellerions aujourd'hui les « effets de site », notamment le « contact entre deux « sols » différents ».

Moins claire est la distinction que les membres de la mission croient pouvoir faire sur la nature des premiers mouvements tels qu'ils ont été ressentis : « trépidations » (= mouvements verticaux) ou oscillations (= mouvements horizontaux). Alors que les auteurs, en étudiant les observations sur les heures rapportées pour le début du phénomène, arrivent à la conclusion que ces données sont probablement sujettes à caution, en raison de « l'inégalité des impressions reçues et surtout du trouble inspiré par la surprise ou la terreur », les observations sur les premiers mouvements (qui pourraient souffrir du même défaut) sont à la base même des conclusions les plus importantes : les « mouvements trépidatoires » sont censés caractériser la zone présentant les dégâts les plus graves, ou zone épiscopentrale, alors qu'à « l'extérieur de cette dernière les mouvements oscillatoires », moins destructeurs, auraient prédominé. Il faut mettre ces conceptions en rapport avec les idées que les membres de la mission se font du tremblement de terre : ils restent marqués, pour la plupart (en dehors de Barrois et Offret, comme on l'a dit), par l'idée d'une relation intime entre tremblements de terre et phénomènes magmatiques, d'où le caractère « étendu » de la source, qui se reflète dans l'épicentre au sens des auteurs. Il est vrai que les seules traces de rupture laissées en surface par le séisme andalou semblent avoir été limitées à des phénomènes gravitaires secondaires, tel le glissement de terrain de Guevejar [2]. La grande faille nord-bétique (Figs. 3 et 4) n'apparaîtra qu'en 1885, à la suite de travaux cartographiques détaillés, appuyés par des concepts inconnus.

Les membres de la Mission regrettent de n'avoir pas pu disposer d'instruments précis, adaptés à l'étude des tremblements de terre. Il est vrai qu'à l'époque, il n'y avait que quelques sismoscopes en service, principalement en Italie et au Japon, pays pionniers en la matière. Le barreau aimanté des magnétomètres, là où il en existait, mimait les masses inertes des sismomètres à venir. Les auteurs ont essayé d'en tirer le meilleur parti, tout en restant prudents sur la cause réelle de l'excitation des appareils : infimes

mouvements du « sol » (explication privilégiée) ou phénomènes électromagnétiques engendrés par le séisme. La frustration des auteurs est grande de ne pas disposer d'indications horaires suffisamment précises. L'interruption d'une communication télégraphique entre deux opérateurs (l'un à Vélez-Málaga, l'autre à Malaga) donne lieu à un calcul intéressant [2, pp. 22–23] : les secousses sismiques provoquent l'interruption de la correspondance à Vélez-Málaga ; l'opérateur de Málaga « s'étonne de cet arrêt subit » puis, 4 à 6 s plus tard, ressent à son tour la secousse, d'où il est conclu « que l'ébranlement se serait propagé avec une vitesse [...] comprise entre 1500 et 2200 m s<sup>-1</sup> » (sic). La différence des distances entre les opérateurs et l'épicentre est proche de 25 km, d'où l'on tire une vitesse de propagation des secousses comprise, en fait, entre 4,2 et 6,2 km s<sup>-1</sup>. Les tables de propagation de Jeffreys et Bullen [25] indiquent une différence de temps de propagation entre Alhama de Granada (lieu proche de l'épicentre probable), d'une part, Vélez-Málaga ou Malaga, d'autre part, de 4,3 et 7,1 s pour les ondes P<sub>g</sub> et S<sub>g</sub>, respectivement (soit 5,6 km s<sup>-1</sup> pour les premières et 3,4 km s<sup>-1</sup> pour les secondes). On est bien dans la marge d'erreur probable de l'évaluation, forcément peu précise, de la différence des temps, et il est vraisemblable que c'est l'onde S<sub>g</sub> qui a perturbé l'un et l'autre des opérateurs. Nous ignorons pourquoi les auteurs de la mission ont déduit d'une observation pertinente une vitesse de propagation évidemment trop faible.

Les auteurs cherchent aussi à évaluer la vitesse de propagation des ondes sismiques à plus grande distance de l'épicentre : ils utilisent les heures auxquelles les magnétomètres ont été affectés à Lisbonne, Greenwich et Wilhelmshaven, et l'heure de référence donnée par l'observatoire de San Fernando, près de Cadix. Ici encore, les vitesses de propagation calculées par les auteurs sont sensiblement inférieures à celles que donnent les tables de Jeffreys et Bullen.

Enfin, les auteurs raisonnent longuement sur le moment exact où les secousses auraient affecté un lieu précis de la zone ou bien y auraient été ressenties, pour arriver à la conclusion que les observations rapportées sont inexploitable : il est illusoire d'attendre une précision métrologique pour des observations horaires collectées dans des villages. Les auteurs auraient sans aucun doute aimé exploiter de meilleures données temporelles pour tracer des isochrones, lieux des points atteints à un instant donné par les ondes progressives, et remonter ainsi à l'épicentre (à la définition floue pour eux, à la fois point dont on cherche la « position » et étendue dont on voudrait préciser la « forme »).

Les membres de la mission sont frustrés par la quasi-absence d'observations instrumentales. Dès leur retour en France, certains d'entre eux [23] entrepren-

ent de construire des instruments pour enregistrer les tremblements de terre (rides générées à la surface d'un bain de mercure par l'agitation du récipient solidaire du sol) et tentent, sans grand succès, des mesures de la vitesse de propagation des ondes sismiques, en prenant pour source le marteau-pilon de 100 tonnes des forges du Creusot. Une recommandation a même été faite de constituer un parc d'instruments de réserve, prêts à être acheminés et déployés dans une région où aurait eu lieu un séisme pour en étudier ce qui s'appellera plus tard les « répliques » [21] : idée clairvoyante, certes, mais pure utopie à l'époque, puisque les instruments n'existaient pas et que ceux qui seraient construits bientôt ne seraient guère transportables.

### 3. Résultats géologiques et minéralogiques de la Mission d'Andalousie

#### 3.1. Résultats stratigraphiques et structuraux

Parmi les innombrables résultats originaux apportés par la mission, nous nous contenterons d'évoquer ceux d'entre eux qui ont conditionné l'évolution des connaissances sur les cordillères Bétiques [39]. Un premier acquis fondamental est l'opposition reconnue entre, au sud de la ligne Ronda–Grenade, la « chaîne Bétique » (s.s.), faite de terrains anciens et/ou métamorphiques, et au nord, la zone sédimentaire jurassico-crétacée. Cette dernière est individualisée [15] sous le nom de « zone plissée subbétique », qui « doit son origine à un refoulement d'ensemble des assises mésozoïques et joue par rapport à la chaîne bétique le même rôle [...] que les chaînes subalpines par rapport aux zones alpines du Dauphiné ». On peut s'étonner que les charriages n'aient pas été soupçonnés par Marcel Bertrand dans le Subbétique méridional, son secteur d'étude, alors même qu'il venait de lancer sa célèbre interprétation en nappe du « double pli de Glaris » [41], mais il est vrai que les coupes sont moins explicites dans le Subbétique que dans l'Helvétique ! En revanche, les principaux stades de la tectonique des Cordillères sont reconnus par la mission. Si la phase anté-Éocène que propose Bertrand se réduit, en fait, à de légers mouvements dans des portions restreintes du Subbétique, l'âge Miocène inférieur de la structuration majeure est bien reconnu, comme aussi l'effondrement, au début du Pliocène, de « l'axe médian » entre Andalousie et Rif marocain.

Le contraste entre « Subbétique » et « Bétique » apparaît dans la stratigraphie du Trias, le seul système dont les dépôts soient présents dans la plupart des unités des deux zones. Dans le Subbétique, ce sont des « marnes irisées [...] analogues à celles du Nord de l'Europe », où le Muschelkalk est daté près de Priego,



le Keuper au Chorro : tout cela ressortit au « domaine germanique » du Trias. À l'inverse, dans le Bétique, c'est une accumulation de roches carbonatées, déjà datées du Trias dans la Sierra de Gador, et dont Barrois montre [5] qu'elles se retrouvent bien plus à l'ouest, dans les Alpujarras, grâce à la découverte de fossiles de *Megalodon* au sein des « dolomies de Lenteji ». Ces puissantes masses calcaro-dolomitiques plus ou moins cristallines caractérisent le Trias du « domaine alpino-dinarique ». En outre, Bertrand et Kilian [13] découvrent, près de la route Grenade–Diezma, des faciès « mixtes » dont l'étude, disent-ils, « présenterait un grand intérêt au point de vue du raccordement des deux faciès du Trias ».

Les terrains jurassiques et crétacés révèlent au jeune Kilian un monde de faits insoupçonnés. L'un des plus notables est la découverte du Lias inférieur à Ammonites à Alhama de Granada [14], c'est-à-dire de ce faciès qui, on le saura plus tard, annonce l'ouverture de l'Atlantique médian et de l'océan alpin, et caractérise la partie externe d'une zone paléogéographique, la « Dorsale calcaire », émiétée de Gibraltar jusqu'en Sicile. Dans le même registre, Kilian [26] a montré que les « diorites » ou « diabases andésitiques » observées au nord de Grenade par Gonzalo y Tarin [24] traversent, en les modifiant, les couches du Lias supérieur fossilifère : on reconnaît là un volcanisme sous-marin, lié à l'amincissement crustal du domaine subbétique médian, lors de l'ouverture atlantique. On doit aussi à Kilian deux annexes paléontologiques sur les faunes du Jurassique supérieur, en particulier sur le gisement du « Tithonique de la Fuente de los Frailes », qui conservent, plus d'un siècle après, toute leur valeur documentaire [27]. Bertrand et Kilian [15] ont su voir que la discordance alléguée entre calcaires jurassiques et marnes crétacées était d'origine mécanique, par disharmonie entre matériaux de compétence différente. Par contre, en attribuant un âge Crétacé inférieur aux marnes colorées du Subbétique, ils rejetèrent, bien à tort, l'intuition de Taramelli [40], qui les rapprochait de la *Scaglia* italienne, d'âge Crétacé supérieur !

Les terrains tertiaires littoraux retinrent spécialement l'attention de Bergeron [35]. Les marnes bleues du célèbre gisement de Los Tejares près de Malaga, que Domingo de Orueta, en 1875, avait rangées à tort dans le Miocène supérieur, sont replacées dans le Pliocène, comme Scharenberg l'avait estimé antérieurement (« marnes subapennines »). Entre Fuenigrola et Estepona, à ces marnes sont associés des sables *bizcornil*, dont la riche faune possède un caractère « atlantique » dominant, avec des espèces de mer profonde. Ainsi, « il est permis d'admettre qu'à l'époque pliocène » (soit il y a 4 à 5 Ma), « il y avait déjà communication entre la Méditerranée et l'Atlantique », grâce à l'ouverture du détroit de Gi-

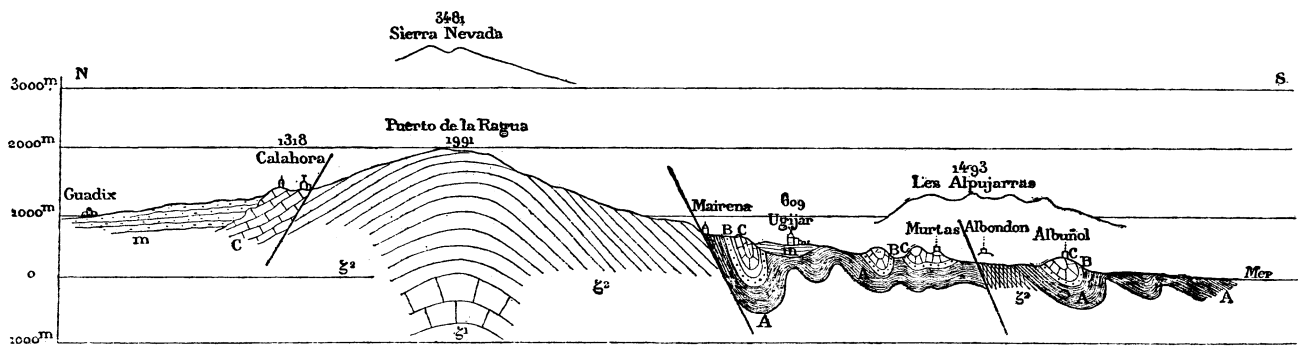
braltar, jusqu'alors inexistant. Trente ans plus tard, Bergeron [10] devra revendiquer la paternité de cette importante conclusion, que Marcel Bertrand [12] évoquait comme sienne, en ajoutant : « La Méditerranée a ainsi passé momentanément (à la fin du Miocène) à l'état d'une vaste Caspienne, sur les bords de laquelle on ne trouve plus que des dépôts saumâtres, [et où] l'évaporation a entassé des centaines de mètres de gypse ».

## 3.2. Résultats minéralogiques et pétrographiques

### 3.2.1. D'étranges « roches filoniennes », ou les méfaits d'un paradigme

Dans le mémoire de Barrois et Offret [9], une première surprise est de voir l'étude des « roches filoniennes » placée en tête, avant celle de leur encaissant. Sans doute est-ce le reflet de la primauté attachée à l'époque à la pétrographie magmatique par rapport à la pétrographie métamorphique, et aussi de l'idée que les séismes, et même le soulèvement des montagnes, pouvaient avoir une cause « éruptive ». Deuxième surprise, ce que nos auteurs appellent « filons acides » et décrivent comme des « nœuds, glandules ou nappes généralement quartzeux, recoupant les roches cristallophylliennes, au dépôt (sic) desquelles ils sont nettement postérieurs » ne sont autres que ce qu'on nomme aujourd'hui des veines d'exsolution, qui résultent, en fait, de réactions métamorphiques au sein de l'encaissant. Barrois et Offret observent que ces « filons » contiennent, associés au quartz, les mêmes minéraux que les schistes alentour, par exemple l'andalousite rose (reconnue depuis déjà un siècle) dans les « glandules quartzeux » des micaschistes à minéraux, ou le chloritoïde et la chlorite dans ceux des schistes de Motril. Ils notent « qu'il convient de rapporter à un même phénomène la formation des mêmes minéraux dans le filon et dans la roche encaissante ». Hélas, ils donnent une interprétation fautive de ces observations exactes : « L'association dans ces filons de l'andalousite ou du chloritoïde à des minéraux fluorés, boratés, titanés [tourmaline, ilménite] et l'abondance des inclusions fluides des quartz rattachent leur formation à des phénomènes d'émanation ». Autrement dit, Barrois et Offret, à la suite de leur aîné Michel-Lévy, se satisfont d'inscrire leurs observations au crédit du paradigme régnant, celui du « métamorphisme exhalatif ».

Barrois et Offret rangent aussi dans les roches filoniennes les « granulites gneissiques », riches en tourmaline et en orthose, « interstratifiées [dans les micaschistes] en lits de quelques centimètres à plusieurs mètres d'épaisseur ». Cette interstratification trouble nos savants, qui notent n'avoir « jamais pu observer [...] aucun filon transverse permettant d'établir l'origine éruptive de cette granulite gneissique ». Et



**Figure 5.** Coupe de la Sierra Nevada selon Barrois et Offret [9]. La forme anticlinale et la situation profonde des « schistes cristallifères » ( $\zeta^2$ ) de la Sierra Nevada sont reconnues. Les « dolomies de l'étage inférieur des gneiss » ( $\zeta^1$ ) n'existent pas (il s'agit probablement d'une projection erronée à partir de massifs de calcaires métamorphiques triasiques avoisinants). Les assises au nord et au sud de l'anticlinal sont considérées comme sa couverture stratigraphique effondrée. Les « schistes de Motril » (A) et les « schistes et calcaires d'Albuñol » (B) sont attribués au Cambrien (« étage des phyllades »), alors qu'il s'agit surtout de Permo-Trias, associé aux « calcaires de Gador » (C), datés, eux, du Trias. L'anticlinal et sa « couverture » alléguée correspondent, en fait, à deux complexes de nappes, les Nevado-Filabrides et les Alpujarrides (cf. Fig. 4B).

**Figure 5.** Cross-section of the Sierra Nevada massif after Barrois and Offret [9]. The deep position of the Sierra Nevada 'schistes cristallifères' ( $\zeta^2$ ) and their anticlinal geometry are correctly observed. The 'dolomies de l'étage inférieur des gneiss' ( $\zeta^1$ ) do not exist (probably a false projection of neighbouring Triassic carbonate massifs). The formations above the anticline are regarded as its faulted stratigraphic cover. The 'schistes de Motril' (A) and 'schistes et calcaires d'Albuñol' (B) are ascribed to the Cambrian ('étage des phyllades'), while they mainly consist of Permian–Triassic levels associated to the 'calcaires de Gador' (C), correctly dated from the Triassic. In fact, the anticline and its 'cover' correspond to two nappe complexes, the Nevado-Filabrides and Alpujarrides, respectively (see Fig. 4B).

pour cause : il ne s'agit pas de filons responsables du métamorphisme, mais d'anciennes roches éruptives ou sédimentaires affectées par celui-ci. Il n'est pas jusqu'aux serpentinites de la Sierra Nevada ou de la Serrania de Ronda, dont il sera question plus loin, qui ne tombent dans la catégorie filonienne ! Cependant, Michel-Lévy et Bergeron [33] auront l'occasion de cartographier de véritables filons au sud-ouest de Torremolinos, identifiés sous la rubrique « diorite », qui « passent aux porphyrites », et « percent indistinctement les schistes cristallophylliens, archéens et cambriens ». Ce sont, en effet, des filons post-orogéniques miocènes.

### 3.2.2. Une vision « neptuno-huttonienne » du métamorphisme

Après les « roches filoniennes », Barrois et Offret [9] abordent dans leur mémoire les « roches sédimentaires et cristallophylliennes ». Titre en soi révélateur : les auteurs sont sous l'influence des théories « neptuniennes » de Werner (le dépôt des roches cristallines et cristallophylliennes dans l'océan primitif), qu'ils marient vaille que vaille aux théories de Hutton et de ses adeptes (Dolomieu, Cordier, Élie de Beaumont, etc.) sur le rôle du « feu central » et de ses « émanations » ou « exhalaisons ». La disposition des schistes de la Sierra Nevada, qu'ils voient comme un « bombement anticlinal unique, compliqué sur ses bords par de petits plis et des failles subordonnées » (Fig. 5), leur paraît être en parfait accord avec les théories « neptuno-huttoniennes » : au cœur, les terrains les plus anciens, « primitifs ou archéens », qui

sont aussi les plus métamorphiques, ayant d'abord subi les « émanations » des magmas profonds ; à l'extérieur, des terrains dont l'âge décroît avec le degré de métamorphisme. On sait aujourd'hui que la coupe est bien plus complexe et inclut des nappes diverses, des sauts et des inversions du degré métamorphique, etc. Cependant, écrivent nos auteurs, « la composition minéralogique des roches qui constituent la Sierra Nevada nous paraît plus difficile à expliquer que leur disposition stratigraphique : [...] les éléments [d'aspect] clastique font défaut, le quartz, les micas, la tourmaline, le grenat [se] présentent tous [comme] des éléments authigènes : [ces roches] rappellent ainsi, d'une part, certaines roches métamorphisées au contact des granites (Bretagne) et, d'autre part, des roches des régions très accidentées (Alpes, Ardennes), dont le métamorphisme est rapporté à des actions mécaniques ». En somme, on peut dire que le concept moderne de métamorphisme à la fois thermique, syntectonique et contrôlé par les fluides est déjà là, mais que son usage est trop timide (en tout cas dans l'école française, car le géologue anglais Ansted [4], par exemple, suggérait dès 1859 que les marbres dolomitiques de la Sierra Blanca puissent être des calcaires jurassiques métamorphiques). On peut voir dans ce blocage conceptuel l'effet de l'ignorance, dans laquelle on se trouvait alors, de l'ampleur des empilements tectoniques dans les chaînes de montagnes. Il faudra encore un demi-siècle pour que le concept de nappe de charriage permette de s'affranchir entièrement du « métamorphisme géosynclinal ».

Du coup, que d'hésitations pour attribuer un âge aux terrains rencontrés ! Barrois et Offret notent, à propos des schistes de la Sierra Nevada, que leur « âge primitif, admis par tous les auteurs, n'est pas suffisamment établi ». Ces mêmes auteurs constatent le passage des schistes cristallins de Motril aux schistes satinés d'Albuñol, qui sont associés à des quartzites, à des gypses et à des calcaires dolomitiques, la concordance de ceux-ci avec les calcaires triasiques de Gador et, enfin, « la ressemblance des schistes satinés avec les roches triasiques des Alpes occidentales ». En 1885 [5], ces arguments les conduisent à proposer, avec certitude pour les schistes d'Albuñol, de manière plus hypothétique pour ceux de Motril, un âge Triasique. Hélas, un an plus tard, ils cèdent à l'opinion d'un âge Cambrien, « avec tous les auteurs antérieurs ! » Ils passent finalement à côté de l'idée d'un métamorphisme post-triasique, autrement dit alpin. Ainsi, il y a pour eux deux groupes de calcaires dolomitiques : ceux, rares, qui sont datés du Trias, comme à Gador [24] ou à Lenteji [5], et ceux qui, n'ayant pas livré de fossiles et considérés comme plus cristallins, sont rangés dans le « terrain cambrien » ou dans le « terrain primitif ». Fâcheux raisonnement, que l'observation de micas recristallisés dans les dolomies fossilifères de Lenteji ne suffit pas à ébranler ! Michel-Lévy et Bergeron [35] écrivent, quant à eux, à propos des marbres dolomitiques de la Sierra Blanca et d'Ojen : « Certains auteurs en ont fait des calcaires jurassiques métamorphiques. [...] Les coupes que nous avons relevées ne laissent aucun doute, et nous nous rangeons absolument à l'opinion exprimée par MacPherson et adoptée par Gonzalo y Tarin [d'un âge Archéen = primitif]. » Nos auteurs comparent ces marbres à ceux du Monte Leone, au sommet des gneiss du Simplon, mais pas plus dans les Alpes qu'en Andalousie, on n'avait reconnu à cette époque le rôle du métamorphisme alpin dans la transformation de ces anciens calcaires mésozoïques.

### 3.2.3. Une pétrographie toute descriptive

Barrois et Offret à l'est, Michel-Lévy et Bergeron à l'ouest, tous fournissent une description des roches métamorphiques d'une remarquable précision, en l'illustrant d'admirables micrographies en couleurs. Il n'est pas jusqu'aux minuscules inclusions fluides (« inclusions liquides ») au sein des cristaux, qui ne soient soigneusement notées (cf. la théorie du métamorphisme d'imbibition !), avec leurs bulles mobiles et, parfois, dans certains quartzites, des trémies de sel. On est frappé par le luxe de détails avec lequel sont précisés les caractères optiques des minéraux rencontrés. Des développements particuliers concernent le chloritoïde, un minéral alors à la mode (Lacroix venait de le décrire à partir d'échantillons alpins et ardennais), le « mica dur » en lamelles

vertes, jusque-là confondu en Andalousie avec la chlorite. Aucun des minéraux que l'on connaît aujourd'hui dans les séries métamorphiques andalouses n'a échappé à ces experts en microscopie optique, à l'exception de la carpholite magnésienne, il est vrai très rare, et dont l'intérêt comme marqueur métamorphique n'a été reconnu qu'un siècle plus tard. Les « amphibolites à amphiboles sodifères » (*alias* schistes bleus à glaucophane) et les éclogites sont reconnues pour la première fois dans la Sierra Nevada. Barrois note que l'amphibole bleue possède les mêmes caractères optiques que celle de l'île de Groix. Et nos auteurs saisissent l'occasion de citer les occurrences, rares à cette époque, de la glaucophane dans le monde : première leçon d'anatomie comparée des chaînes de montagnes, étendue des Alpes à la Nouvelle-Calédonie. De même, les éclogites associées aux serpentinites du Mulhacen (Sierra Nevada) sont-elles rapprochées par Barrois de ce qu'il connaît à l'embouchure de la Vilaine. Les auteurs, cependant, ne peuvent aller au-delà de ces descriptions et comparaisons, car la signification des minéraux en termes de pression et température est encore tout à fait ignorée.

Les relations chronologiques entre les minéraux sont aussi observées, comme l'inclusion de la staurotide dans le grenat, de celui-ci dans l'andalousite, et l'altération du grenat par la biotite ou la chlorite. La structure foliée et plissée des roches à petite échelle fait l'objet de quelques observations pertinentes. Des bandes de cisaillement intrafoliaires typiques sont représentées par Barrois et Offret [9] sous le nom de « ridement de schistes cristallifères entre des feuilletés restés plans ». De même, à l'échelle microscopique, les « glandules » d'andalousite sont-elles décrites alignées dans le clivage schisteux, et les prismes de sillimanite couchés et étirés dans la schistosité. Une excellente description est donnée des ombres abritées (avant la lettre) des grenats, qui « fournissent encore une autre preuve des pressions inégales auxquelles ils ont été soumis dans les roches : ils ont traîné dans la roche postérieurement à sa formation, et le sillon qu'ils ont laissé a été rempli [...] par des prismes enchevêtrés de quartz ». Cependant, l'exploitation de ces observations pour l'interprétation du métamorphisme ne va pas au-delà : l'époque est celle de la géologie descriptive.

### 3.2.4. Les péridotites de Ronda et leur contexte

Dans la Serrania de Ronda, Michel-Lévy et Bergeron [32–35] vont se trouver confrontés à deux problèmes majeurs : celui, récurrent, des superpositions anormales et celui, particulier à ce secteur, de la présence de grandes masses de péridotites au sein des schistes cristallins. Comme Barrois et Offret plus à l'est [5–9], Michel-Lévy et Bergeron vont traverser, sans les voir, les contacts de nappes au sein de ces

piles métamorphiques. En particulier, le chevauchement des schistes de Malaga sur les schistes cristallins de la Serrania de Ronda leur échappe. Pour eux, « les schistes argileux moins cristallins à conglomérats ou arkoses et phanites » de Malaga passent par « gradations insensibles » aux « micaschistes à minéraux » sous-jacents. N'identifiant pas la présence de Trias métamorphique entre les deux ensembles, ils attribuent les micaschistes au « terrain primitif », et les schistes argileux au « terrain cambrien », confortés en cela par de mauvaises empreintes de prétendus *Nereites cambriensis*, et sans retenir les arguments de divers auteurs en faveur d'un âge Silurien à Carbonifère des schistes de Malaga, âge aujourd'hui bien établi.

S'agissant des péridotites, dont MacPherson [28] venait de donner « des descriptions approfondies », rendant ainsi « un service signalé à la science », Michel-Lévy et Bergeron [35] vont sensiblement dépasser leur prédécesseur par la richesse de leur description minéralogique. Ils donnent le détail des propriétés optiques de tous les minéraux présents. La microstructure aussi les intéresse et ils notent une disposition particulière des péridots « en bandes parallèles [...], un caractère distinctif des roches volcanites [sic] de la Serrania de Ronda ». Nous appelons aujourd'hui foliation cette fabrique particulière, propre aux péridotites mantelliques (tectonites) comme celles de Ronda. Ils observent aussi, dans leurs lames minces, la transformation progressive des péridots et pyroxènes en minéraux serpentiniteux, rejoignant MacPherson pour conclure que les serpentinites se forment par « décomposition » (par hydratation) des roches à péridot. Il faut savoir qu'à l'époque, la chose n'était pas acquise, et certains parlaient d'« éruption de serpentine » ayant métamorphisé le terrain crétacé en marbres dans la Sierra Bermeja !

Quant à l'origine des roches à péridots, Michel-Lévy et Bergeron adoptent une interprétation magmatique, bien dans l'esprit de l'époque. Malgré l'abondance de leur échantillonnage, ils considèrent que ces « roches riches en péridot » sont essentiellement des norites, roches magmatiques de la famille des gabros : « la lherzolite n'en est qu'un cas particulier » ; selon eux, on a affaire à un ensemble de roches magmatiques en filons et dykes de toutes tailles, recoupant les terrains anciens (Archéen et Cambrien allégués). Les terrains permien, triasiques et plus récents sont postérieurs à ces « intrusions » pour nos auteurs, qui font litière d'une suggestion de MacPherson en faveur d'un âge Jurassico-Crétacé. De même rejettent-ils fermement l'idée « plusieurs fois émise que la serpentine de la Serrania de Ronda constituerait des enclaves stratiformes dans les terrains cristallophyl-liens »... idée pourtant bien plus proche de la vérité géométrique que celle de filons. Ce qui dérange cependant nos auteurs, c'est « le faible métamorphisme

de contact développé par les norites à leur voisinage », mis à part « le grenat [...], fréquent dans les gneiss limitrophes ». Cette dernière allusion sans conviction concerne ce que nous savons aujourd'hui être des écailles de granulites entraînées avec les écailles de péridotite, elles-mêmes arrachées au manteau sous-continental. Il est piquant de constater que la vision « intrusive » de Michel-Lévy et Bergeron retrouvera une seconde vie près d'un siècle plus tard sous la forme de la théorie du « diapir mantellique néogène », en vogue auprès de plusieurs auteurs dans les années 1970–1980, avant d'être abandonnée.

#### 4. Conclusion

Le tremblement de terre de 1884 en Andalousie est, avec ceux de 1680 et de 1829, l'un des grands séismes ayant affecté la chaîne Bétique. Le développement scientifique en Europe explique l'intérêt qui lui fut porté, à une époque où l'Espagne (comme la plus grande partie du monde) était, géologiquement parlant, encore mal connue. En l'absence de tout moyen instrumental, les missions française et italienne furent réduites à l'observation des effets de la catastrophe, à partir desquels furent dressées des cartes d'isoséistes, parmi les premières de ce type. Le ré-examen du document atteste sa fiabilité, comme celle de l'estimation, peu au-dessous de 10 km, de la profondeur du foyer. En revanche, la cause du séisme resta conjecturale et divisa les missionnaires : à la tentative d'explication par une « éruption volcanique avortée » (Fouqué), seuls Barrois et Offret opposèrent l'hypothèse tectonique du jeu de fractures. Aujourd'hui, la relation du séisme de 1884 avec des failles liées à l'affrontement des croûtes ibérique et d'Alboran peut être logiquement envisagée.

Partant du principe que les séismes ont un lien avec la constitution géologique régionale, les membres de la mission se lancèrent dans ce qui fut le premier lever géologique, publié à l'échelle 1:600 000, de la partie centrale de la chaîne Bétique. Il en résulta une moisson de résultats stratigraphiques, structuraux ou minéralogiques importants, parmi lesquels les suivants firent date dans la connaissance de la chaîne : (1) distinction entre une partie septentrionale, faite de roches sédimentaires plissées, avec un Trias argilo-salifère, et que Marcel Bertrand nomma « Subbétique », à l'image du « Subalpin » dauphinois, et une partie méridionale, essentiellement cristalline, avec un Trias carbonaté de type alpin, à laquelle l'appellation « Bétique » fut réservée ; (2) première identification, dans le Bétique, du Lias de type Dorsale calcaire, qui signe l'ouverture téthysienne ; (3) découverte, dans le Bétique de la Sierra Nevada, de glaucophanites et d'éclogites, témoins de la subduction alpine ; (4) âge

Miocène inférieur du plissement majeur ; (5) âge Pliocène de l'ouverture du détroit de Gibraltar. Cependant, la disposition en grandes nappes de charriage resta ignorée jusque vers 1925, bien qu'un membre de la mission, Marcel Bertrand, eût proposé cette notion dans les Alpes, précisément en 1884. Autre chose singulière, la découverte de *Megalodon* triasiques par Barrois dans des dolomies cristallines des Alpujarras n'amena pas, en dépit de provisoires hésitations, la remise en cause du dogme de l'âge ancien (Archéen à Cambrien) de la quasi-totalité de l'axe montagneux.

La «Mission d'Andalousie» apparaît au total comme une exceptionnelle réussite. À la manière d'une expédition scientifique moderne, une équipe de

géologues aux spécialités diverses a pris à bras le corps une chaîne de montagnes fort mal connue et, en un court laps de temps (moins de deux mois, un tour de force, compte tenu des moyens de transport de l'époque !), en a fourni une description géologique quasi exhaustive. La portée des observations sismologiques a, cependant, été limitée par l'absence de moyens instrumentaux et l'étude des échantillons géologiques par la faiblesse des moyens alors disponibles, microscope optique (que nos auteurs maniaient, certes, avec une *maestria* enviable) et analyses chimiques à la pailleasse. Enfin (surtout ?), l'exploitation des observations se trouva entravée par tout ce qui faisait défaut alors en matière de concepts géologiques fondamentaux.

**Remerciements.** Les auteurs remercient Christiane Cavaré et Philippe Olivier (Toulouse) pour leur assistance technique, et Carlos Sanz de Galdeano (Grenade) pour ses avis sur l'interprétation du panorama (Fig. 3).

## Références

- [1] Collectif (Instituto Geográfico Nacional), El terremoto de Andalucía del 25 de diciembre de 1884, Madrid, 1980, 139 p.
- [2] Collectif (Académie des sciences de Paris), «Mission d'Andalousie» : études relatives au tremblement de terre du 25 décembre 1884 et à la constitution géologique du sol ébranlé par les secousses, Mém. Acad. Sci. Paris 30 (2) (1889), 772 p., 42 pl.
- [3] Alonso Chaves F.M., V. García-Dueñas, M. Orozco, Fallas de despegue extensional miocenas en el área de Sierra Tejada (Béticas centrales), Geogaceta 14 (1993) 116–118.
- [4] Ansted D.T., On the geology of Malaga and the southern part of Andalusia, J. Quart., Proc. Geol. Soc. Lond. 15 (1859) 585–604.
- [5] Barrois C., A. Offret, Sur la constitution géologique de la Sierra Nevada, des Alpujarras et de la Sierra de Almirante, C. R. Acad. Sci. Paris 100 (1885) 1060–1064.
- [6] Barrois C., A. Offret, Sur la structure stratigraphique de la chaîne Bétique, C. R. Acad. Sci. Paris 102 (1886) 1341–1344.
- [7] Barrois C., A. Offret, Sur les schistes micacés primitifs et cambriens du Sud de l'Andalousie, C. R. Acad. Sci. Paris 103 (1886) 174–176.
- [8] Barrois C., A. Offret, Sur les schistes et gneiss amphiboliques et sur les calcaires du Sud de l'Andalousie, C. R. Acad. Sci. Paris 103 (1886) 221–223.
- [9] Barrois C., A. Offret, Mémoire sur la constitution géologique du Sud de l'Andalousie, de la Sierra Tejada à la Sierra Nevada, in : Académie des sciences de Paris (Ed.), «Mission d'Andalousie» : études relatives au tremblement de terre du 25 décembre 1884 et à la constitution géologique du sol ébranlé par les secousses, Mém. Acad. Sci. Paris 30 (2) (1889) 79–169.
- [10] Bergeron J., Sur l'âge de la formation du détroit de Gibraltar, Bull. Soc. géol. France (4) 9 (1909) 228–229.
- [11] Bertrand M., Note sur l'Andalousie (sans titre), Bull. Soc. géol. France (3) 13 (1885) 474–476.
- [12] Bertrand M., Notice sur les travaux scientifiques de M. Marcel Bertrand, Gauthier-Villars, Paris, 1894, 35 p.
- [13] Bertrand M., W. Kilian, Sur les terrains secondaires et tertiaires de l'Andalousie (provinces de Grenade et de Malaga), C. R. Acad. Sci. Paris 100 (1885) 1057–1060.
- [14] Bertrand M., W. Kilian, Sur les terrains jurassiques et crétacés des provinces de Grenade et de Malaga, C. R. Acad. Sci. Paris 102 (1886) 186–188.
- [15] Bertrand M., W. Kilian, Études sur les terrains secondaires et tertiaires dans les provinces de Grenade et de Malaga, in : Académie des sciences de Paris (Ed.), «Mission d'Andalousie» : études relatives au tremblement de terre du 25 décembre 1884 et à la constitution géologique du sol ébranlé par les secousses, Mém. Acad. Sci. Paris 30 (2) (1889) 377–579.
- [16] Botella F. de, Observations sur les tremblements de terre de l'Andalousie du 25 décembre 1884 et semaines suivantes, C. R. Acad. Sci. Paris 100 (1885) 196–197.
- [17] Boulin J., Les zones internes des cordillères Bétiques de Málaga à Motril (Espagne méridionale), Trav. Lab. Géol. Fac. Sci. Univ. Paris, Ann. Hébert et Haug, 1970, 237 p., 1 carte.
- [18] Fernández de Castro M., J.P. Lasala, D. de Cortázar, J. Gonzalo y Tarín, Informe dado cuenta del estado de los trabajos en 7 de marzo de 1885, Bol. Comisión Mapa geol. España 12 (1885).
- [19] Fouqué F., Premières explorations de la mission chargée de l'étude des récents tremblements de terre de l'Espagne, C. R. Acad. Sci. Paris 100 (1885) 598–601.
- [20] Fouqué F., Relations entre les phénomènes présentés par les tremblements de terre de l'Andalousie et la constitution géologique de la région qui en a été le siège, C. R. Acad. Sci. Paris 100 (1885) 1113–1120.
- [21] Fouqué F., Le tremblement de terre de l'Andalousie du 24 [sic] décembre 1884, Ass. Sci. Fr., Bull. hebd. XII 311 (2) (1886) 371–388.
- [22] Fouqué F., et al., Rapport sur les mémoires des membres de la mission française d'Andalousie, C. R. Acad. Sci. Paris 103 (1886) 1355–1358.
- [23] Fouqué F., A. Michel-Lévy, Expériences sur la vitesse de propagation des secousses dans les sols divers, in : Académie des sciences de Paris (Ed.), «Mission d'Andalousie» : études relatives au tremblement de terre du 25 décembre 1884 et à la constitution géologique du sol ébranlé par les secousses, Mém. Acad. Sci. Paris 30 (2) (1889) 57–77.
- [24] Gonzalo y Tarín, Edad geológico de las calizas metalíferas de la Sierra Gador en la provincia de Almería, Bol. Com. Mapa geol. España 9 (1882) 97–111.

- [25] Jeffreys H., K.E. Bullen, *Seismological tables*, Brit. Ass. Adv. Sci., Gray-Milne Trust, 1940, 50 p.
- [26] Kilian W., Sur la position de quelques roches ophitiques dans le Nord de la province de Grenade, *C. R. Acad. Sci. Paris* 101 (1885) 77–80.
- [27] Linares A., Hitos en el desarrollo de la Paleontología en Andalucía desde mediados del siglo XIX, *Comun. IX jorn. Paleontología*, Málaga, 1993, pp. I–XV.
- [28] MacPherson J., Memoria sobre la estructura de la Serranía de Ronda, Cádiz, 1874.
- [29] MacPherson J., Sur les tremblements de terre de l'Andalousie du 25 décembre 1884 et semaines suivantes, *C. R. Acad. Sci. Paris* 100 (1885) 136–137.
- [30] MacPherson J., Tremblements de terre en Espagne, *C. R. Acad. Sci. Paris* 100 (1885) 397–399.
- [31] Martínez-Martínez J.M., J.M. Azañon, Mode of extensional tectonics in the southeastern Betics (S.E. Spain). Implications for the tectonic evolution of the peri-Alborán orogenic system, *Tectonics* 16 (1997) 205–225.
- [32] Michel-Lévy A., J. Bergeron, Sur la constitution géologique de la Serranía de Ronda, *C. R. Acad. Sci. Paris* 100 (1885) 1054–1057.
- [33] Michel-Lévy A., J. Bergeron, Sur les roches éruptives et les terrains stratifiés de la Serranía de Ronda, *C. R. Acad. Sci. Paris* 102 (1886) 640–642.
- [34] Michel-Lévy A., J. Bergeron, Sur les roches cristallophylliennes et archéennes de l'Andalousie occidentale, *C. R. Acad. Sci. Paris* 102 (1886) 709–711.
- [35] Michel-Lévy A., J. Bergeron, Étude géologique de la Serranía de Ronda, in: Académie des sciences de Paris (Ed.), «Mission d'Andalousie» : études relatives au tremblement de terre du 25 décembre 1884 et à la constitution géologique du sol ébranlé par les secousses, *Mém. Acad. Sci. Paris* 30 (2) (1889) 174–375.
- [36] Morales J., I. Serrano, A. Jabaloy, J. Galindo-Zaldívar, D. Zhao, F. Torcal, F. Vidal, F. González-Lodeiro, Active continental subduction beneath the Betic Cordillera and the Alborán Sea, *Geology* 27 (1999) 735–738.
- [37] Muñoz D., A. Udías, Three large historical earthquakes in southern Spain, in: J. Mezcua, A. Udías (Eds.), *Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebic Region*, Monogr., Vol. 8, Inst. Geogr. Nac. España, 1991, pp. 175–182.
- [38] Noguès A.F., Phénomènes géologiques produits par les tremblements de terre de l'Andalousie du 25 décembre 1884 au 16 janvier 1885, *C. R. Acad. Sci. Paris* 100 (1885) 253–257.
- [39] Sanz de Galdeano C., La Zona Interna Bético-Rifeña (Antecedentes, unidades tectónicas y bosquejo de reconstrucción paleogeográficas), Monogr. Tierra Sur, Univ. Granada, 1997, 316 p.
- [40] Taramelli T., G. Mercalli, I terremoti andalusi cominciati il 25 dicembre 1884, *Atti R. Acc. Lincei (Roma)*, Mem. Cl. Sci. Fis. Mat. Nat., ser. III 4 (1886) 116–222.
- [41] Trümpy R., M. Lemoine, Marcel Bertrand (1847–1907) : les nappes de charriage et le cycle orogénique, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 327 (1998) 211–224.
- [42] Udías A., D. Muñoz, The Andalusian earthquake of 25 December 1884, *Tectonophysics* 53 (1979) 291–299.