



HAL
open science

Le cycle varisque dans les Pyrénées : tectonique et thermicité

Michel de Saint Blanquat, Bryan Cochelin, Baptiste Lemirre, Stéphanie Duchêne, Yoann Denèle

► **To cite this version:**

Michel de Saint Blanquat, Bryan Cochelin, Baptiste Lemirre, Stéphanie Duchêne, Yoann Denèle. Le cycle varisque dans les Pyrénées : tectonique et thermicité. *Géochronique*, 2019, RGF-Pyrénées l'autopsie d'un orogène, 152, pp.16-20. hal-02560163

HAL Id: hal-02560163

<https://hal.science/hal-02560163>

Submitted on 14 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°	Reçu le	1 ^{er} lecteur	2 ^e lecteur	3 ^e lecteur	4 ^e lecteur	5 ^e lecteur	Nb ca + esp
1b	4/11/19	N.S.	D.R.	F.Deb			

Le cycle varisque dans les Pyrénées : tectonique et thermicité

Les terrains paléozoïques et plus anciens des Pyrénées constituent une boutonnière qui permet de voir, sous les dépôts méso-cénozoïques et à travers la structuration de la chaîne alpine, une petite partie d'une zone externe de l'orogène varisque. Du fait du caractère poly-orogénique des Pyrénées, les rapports initiaux entre les différentes unités anté-mésozoïques n'ont pas été nécessairement préservés. Suivant une distinction relative au cycle alpin, on peut distinguer trois zones dans lesquelles affleurent des roches anté-mésozoïques, du nord au sud, les massifs Nord-pyrénéens dans la zone nord-pyrénéenne, la zone axiale, et la zone des "têtes plongeantes" (Noguères). Elles sont toutes trois constituées 1) d'un socle composé de migmatites, de paragneiss et d'orthogneiss, qui résultent de l'action d'un métamorphisme et d'une tectonique varisque sur un matériel sédimentaire et magmatique d'âge précambrien et paléozoïque inférieur ; 2) d'une série sédimentaire protérozoïque supérieur à carbonifère supérieur déformée et peu métamorphisée ; 3) d'un ensemble de roches plutoniques de composition variée, d'âge carbonifère supérieur à permien ; 4) d'une série volcano-sédimentaire discordante d'âge carbonifère supérieur à permien.

Historique et état des lieux avant le RGF

Toutes les recherches, antérieures à 1995, sur le cycle varisque dans les Pyrénées ont été synthétisées dans 'le grand livre bleu', également appelé la Synthèse Pyrénées (Barnolas et Chiron, 1995). Le but de cette synthèse était de "*décrire les successions lithologiques du Paléozoïque des Pyrénées pour tenter s'en dégager la dynamique de sédimentation*" et de "*présenter les caractères et l'évolution des grands phénomènes tectoniques, métamorphiques et magmatiques associés à l'orogénèse varisque*". Le constat fait à la fin de ce travail par les principaux rédacteurs est résumé par A. Autran dans le chapitre 'Réflexions géodynamiques finales' : "*les étapes et les conditions dynamiques des déformations orogéniques dans cette zone externe de la chaîne varisque ne font toujours pas l'objet d'un consensus*". Entre les travaux de la Synthèse et ceux du RGF, quelques travaux ont étudié la structure et l'histoire des Pyrénées varisques. Ils ont notamment précisé la signification de la structure générale de la chaîne formée de dômes à cœur migmatitique qui apparaissent en fenêtre sous des roches peu métamorphiques à fabrique verticale. Dans le massif de l'Aston, cette structure témoigne d'un découplage qui a permis l'écoulement latéral de la croûte moyenne migmatitique dans une direction formant un angle élevé par rapport à la direction de convergence à tendance plus ou moins nord-sud (Denèle

N°	Reçu le	1 ^{er} lecteur	2 ^e lecteur	3 ^e lecteur	4 ^e lecteur	5 ^e lecteur	Nb ca + esp
1b	4/11/19	N.S.	D.R.	F.Deb			

et al., 2009). Des plutons de composition variée sont intrusifs dans ces deux niveaux structuraux et se sont mis en place dans le cadre de l'épisode majeur de déformation régionale, entre 310 et 295 Ma (la D2 des auteurs).

Les questions avant le RGF

L'image de départ des Pyrénées varisques pour le chantier RGF- Pyrénées est donc celle d'un segment crustal caractérisé par une déformation majeure synchrone d'un métamorphisme de haute température et d'un magmatisme de nature variée (basique, intermédiaire et acide). Les modalités de la déformation majeure (style, intensité, cinématique), et sa distribution dans l'espace, verticalement entre les différents niveaux structuraux, et horizontalement de part et d'autre de la faille nord-pyrénéenne, sont encore sujet à discussions. De plus, l'origine du métamorphisme, ainsi que les sources et le contexte de genèse du magmatisme restent inexplicables, ce qui ne facilite pas l'interprétation géodynamique. Cet épisode de HT tardi-varisque est connu ailleurs à peu près au même âge dans la chaîne varisque (Massif central, Bohême, Ivry, Corse, Calabre...) où il succède à une évolution orogénique 'classique' marquée en particulier par la genèse et l'exhumation de roches de haute pression. Dans les Pyrénées, ce n'est pas le cas. L'épisode de HT 'intercepte' une première phase de faible intensité (nappes de couverture; la D1 des auteurs) qui produit un épaississement crustal modéré (pas de roches métamorphiques de haute pression identifiées). Bien que tout ceci permette de positionner les Pyrénées dans les zones externes de l'orogène varisque, il reste que la singularité du segment pyrénéen est la prédominance de cet événement de HT-BP et des phénomènes associés (déformation, magmatisme). Le pic thermique est synchrone de la transition entre sédimentation syn- et post- orogénique ; une grande partie de l'histoire varisque pyrénéenne peut donc être qualifiée de 'post-orogénique' et déborde largement sur le Permien.

Les principales questions scientifiques que l'on se posait avant le début du RGF étaient celles du contexte tectonique et géodynamique régional et de l'histoire thermique à l'échelle lithosphérique, ou autrement dit celles de la singularité et de la place des Pyrénées dans l'orogène varisque. Dans ce qui suit, nous nous focaliserons donc sur les apports du RGF concernant la déformation, le métamorphisme et le magmatisme.

Les travaux du chantier RGF

Tectonique

N°	Reçu le	1 ^{er} lecteur	2 ^e lecteur	3 ^e lecteur	4 ^e lecteur	5 ^e lecteur	Nb ca + esp
1b	4/11/19	N.S.	D.R.	F.Deb			

Une étude structurale qualitative et quantitative, couplée à une étude cinématique a été réalisée sur l'ensemble du socle paléozoïque des Pyrénées. Elle s'est basée sur une étude de terrain et une compilation exhaustive et inédite des structures, harmonisées à l'échelle de toute la chaîne des Pyrénées. À partir de ces données, le champ de déformation régional varisque de ces massifs paléozoïques a été construit afin d'en extraire l'état des contraintes durant les différentes phases de déformation connues (Cochelin *et al.*, 2017 ; 2018a). L'analyse de ce champ de déformation dans la zone axiale montre que la déformation transpressive régionale résulte d'un raccourcissement Nord-Sud entre 310 et 290 Ma. La déformation est répartie entre une zone supérieure de la croûte en épaissement et une croûte moyenne affectée par du fluage latéral (fig. 1a). Une zone d'attachement agit en tampon entre ces deux domaines aux dynamiques radicalement différentes. Le fluage latéral combiné aux forces gravitaires au sein de la croûte moyenne, peu dense car partiellement fondue, permet la mise en place de dômes extensifs dans un contexte régional de convergence (fig. 1a). Le refroidissement progressif favorise 1) le couplage entre ces deux domaines et 2) la localisation de la déformation au sein de bandes de cisaillement transpressives sub-verticales. Pourtant situées à l'avant-pays de la chaîne varisque, les Pyrénées enregistrent donc une déformation typique d'une lithosphère chaude entre 310 et 290 Ma, synchrone de la fermeture de syntaxes orogéniques, telles que l'arc ibéro-armoricain (fig. 1b). Après relâchement des contraintes au cours du Permien (à partir de 290 Ma), la lithosphère semble avoir gardé un comportement rhéologique anormalement chaud au niveau des Pyrénées, permettant la formation de dômes anatectiques extensifs en profondeur et de bassins sédimentaires en demi-grabens en surface, tels qu'illustrés dans le Pays Basque (Saspiturry *et al.*, 2019) ou supposé dans les massifs nord-pyrénéens (St Blanquat, 1993 ; Lemirre, 2018).

N°	Reçu le	1 ^{er} lecteur	2 ^e lecteur	3 ^e lecteur	4 ^e lecteur	5 ^e lecteur	Nb ca + esp
1b	4/11/19	N.S.	D.R.	F.Deb			

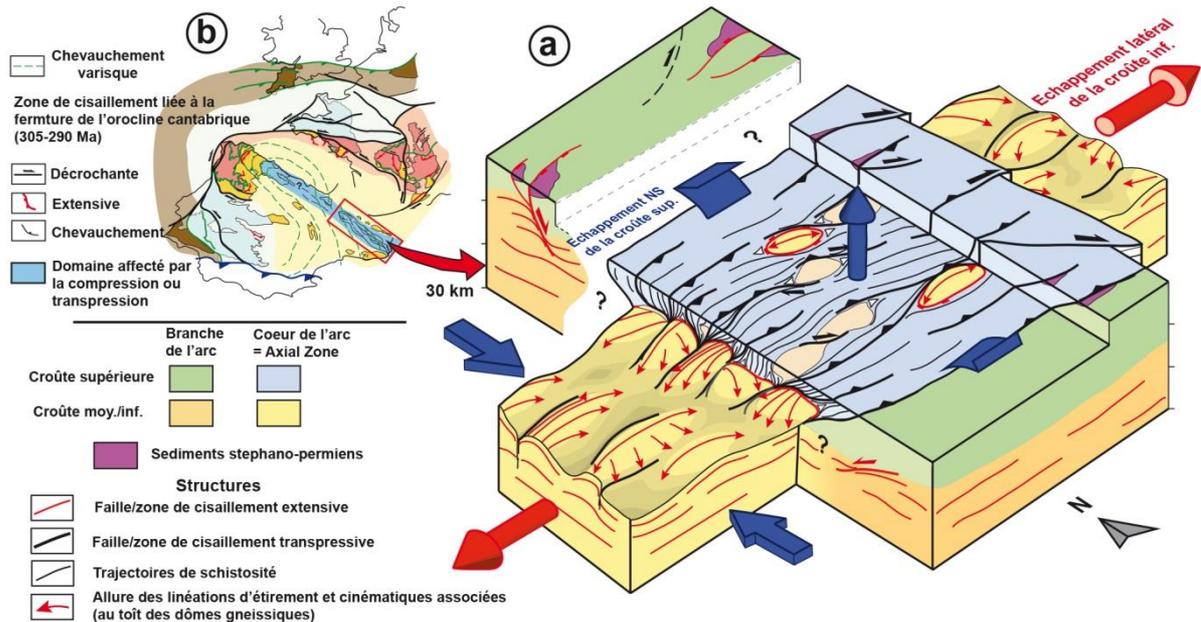


Fig. 1. – Bloc-diagramme illustrant le partitionnement vertical de la déformation dans la croûte des Pyrénées, lié à la fermeture de l’orocline cantabrique : a) modèle conceptuel de déformation par extrusion verticale et nord-sud de la croûte supérieure et extrusion latérale de la croûte moyenne-inférieure, ainsi que leur relation avec les déformations décrochantes et extensives observées au niveau des branches de l’arc ibéro-armoricain ; b) position des Pyrénées dans l’arc ibéro-armoricain, illustrant la localisation de la déformation transpression/compressive observée au cœur de l’orocline cantabrique.

L’excellente continuité du champ de déformation interroge sur l’ampleur des déplacements supposés de nappes de socle lors de la collision pyrénéenne depuis le Crétacé supérieur. Les nouvelles observations de terrain ont permis de préciser qu’en dehors de la bordure ouest et sud de la Zone Axiale, le socle n’est affecté que par des réactivations mineures, y compris dans les Pyrénées centrales où le chevauchement de Noguères ne peut être enraciné en profondeur (Cochelin *et al.*, 2018b). Ce dernier correspondrait plutôt à un décollement localisé dans le Paléozoïque supérieur, impliquant des quantités de raccourcissement moindres durant la collision pyrénéenne que celles calculées précédemment.

Métamorphisme et magmatisme

Les Pyrénées sont caractérisées par un épaissement crustal modéré et un épisode métamorphique de haute température – basse pression (HT-BP) associé à un magmatisme tardi-orogénique abondant. Des reliques d’un métamorphisme de type barrovien antérieur qui pourrait être lié à un épaissement de la croûte orogénique ont parfois été décrites. Une étude pétrostructurale a été réalisée sur des micaschistes situés sous l’orthogneiss ocellé ordovicien au cœur du massif du Canigou (Pyrénées-Orientales, France) (Hoym de Marien *et al.*, 2019). Ces

N°	Reçu le	1 ^{er} lecteur	2 ^e lecteur	3 ^e lecteur	4 ^e lecteur	5 ^e lecteur	Nb ca + esp
1b	4/11/19	N.S.	D.R.	F.Deb			

travaux révèlent la présence de deux stades métamorphiques syntectoniques caractérisés par la cristallisation de la staurotide (M1) et de l'andalousite (M2), respectivement. Le grenat est stable au cours des deux étapes métamorphiques avec une période de résorption comprise entre M1 et M2. En utilisant les zonations du grenat et des pseudosections, un chemin prograde P–T est contraint avec une pression maximale à environ 6,5 kbar et 550°C. Ce trajet P–T, syntectonique par rapport à la première foliation S1, correspond à un gradient froid (~ 9°C / km), suggérant un épaississement modéré de la croûte. Le métamorphisme de moyenne pression M1 (barrovien) est suivi par le métamorphisme de HT-BP et le magmatisme, qui ont également fait l'objet d'une étude à l'échelle des Pyrénées (Lemirre, 2018 ; Cochelin *et al.*, 2018b ; Lemirre *et al.*, 2019). L'objectif de cette étude était de préciser la nature et la contribution des sources de chaleur potentielles à l'origine de l'anomalie thermique tardi-varisque. Une évaluation précise (1) de l'évolution spatio-temporelle de l'état thermique de la croûte, (2) de la chronologie entre le métamorphisme, la production et le transfert de magmas dans la croûte et (3) de la relation entre l'évolution tectonique tardi-orogénique et l'épisode de HT a été réalisée. Des estimations des conditions pression-température ont été obtenues par modélisation thermodynamique sur les principaux massifs granulitiques de la zone nord-pyrénéenne (massifs du Saint Barthélémy, de Bessède de Sault, du Castillon et d'Ursuya) (fig. 2a). Les résultats montrent un géotherme en deux parties au paroxysme de l'épisode de HT daté à 300 Ma, avec (1) de forts gradients atteignant 80 °C/km dans la partie supérieure et (2) des conditions isothermes dans la croûte moyenne avec des températures de l'ordre de 800°C (fig. 2b). Les données de géochronologie U-Pb sur zircon et monazite dans les roches métamorphiques mettent en évidence que la croûte moyenne, affectée par une déformation extensive, reste chaude et partiellement fondue pendant une vingtaine de millions d'années d'environ 300 Ma à environ 280 Ma. Une coupe nord-sud dans les Pyrénées Centrales, couplée à de la spectroscopie Raman sur matière carbonée permet de quantifier l'évolution de la température dans la couverture paléozoïque de la Zone Axiale. Les résultats indiquent que la croûte supérieure est également affectée par le métamorphisme régional HT-BP avec des températures supérieures à 500 °C dans les sédiments paléozoïques inf. et sup. hors des dômes tectono-métamorphiques. Les études géochimiques et géochronologiques (U-Pb sur zircon) dans les massifs du Chiroulet-Lesponne et de l'Aston soulignent une origine à la fois mantellique et crustale des magmas et montrent que le magmatisme est contemporain du métamorphisme, avec des âges compris entre environ 305 Ma à environ 290 Ma. Les données de modélisation numérique confirment la source mantellique de la chaleur avec un transfert de chaleur jusqu'à la croûte supérieure par la migration des magmas produits par la fusion partielle de la croûte inférieure à moyenne.

N°	Reçu le	1 ^{er} lecteur	2 ^e lecteur	3 ^e lecteur	4 ^e lecteur	5 ^e lecteur	Nb ca + esp
1b	4/11/19	N.S.	D.R.	F.Deb			

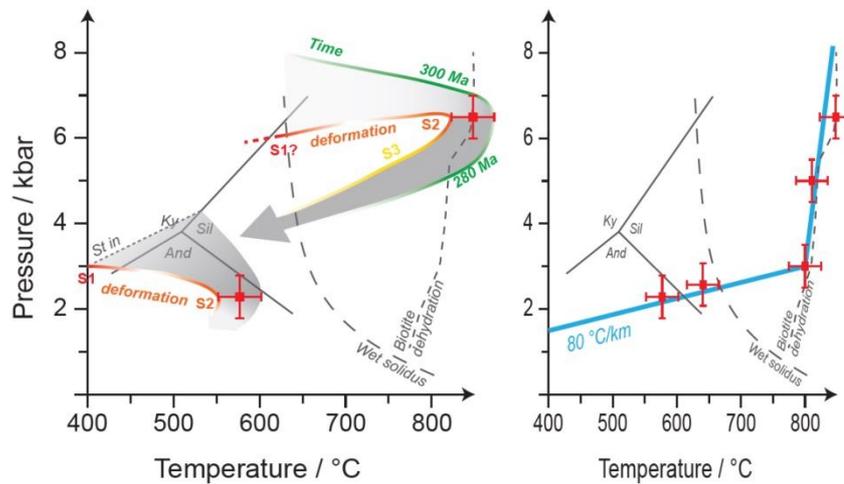


Fig. 2. – À gauche, diagramme pression- température montrant le chemin PTtd des granulites et des micaschistes du massif du St Barthélémy; à droite diagramme pression- température montrant le géotherme à 300 Ma dans ce même massif (Lemirre, 2018).

Synthèse

Ces nouvelles données sur la déformation, le métamorphisme et le magmatisme sont compatibles avec un modèle de délamination progressive du manteau lithosphérique. Initiée dans les zones internes de l’orogène, la délamination conduit à la remontée rapide de la limite asthénosphère – lithosphère. Ceci induit l’anomalie thermique et l’adoucissement rhéologique de la lithosphère qui permet de déformer la croûte varisque des Pyrénées de manière pénétrative et de partitionner la déformation verticalement. Le phénomène de délamination proposé, observable à l’échelle de toute la partie occidentale de l’Europe, se traduit à grande échelle par la fermeture des syntaxes orogéniques telles que l’arc ibéro-armoricain (fig. 1b). Ce nouveau modèle global qui intègre tectonique, métamorphisme et magmatisme, n’est pas sans conséquences sur d’autres processus, notamment la métallogénie. Les deux dernières thèses du RGF-Pyrénées, en cours à l’heure où nous écrivons ces lignes, lui sont d’ailleurs consacrées, l’une sur le germanium (et Pb-Zn) (Cugerone *et al.*, 2018) et l’autre sur l’or (Link *et al.*, 2019).

Les questions après le RGF

Le RGF a donc produit des avancées significatives sur la compréhension de l’orogène varisque dans les Pyrénées, et au-delà de cet aspect régional, sur des questions plus générales telles que celle de la haute température dans les chaînes de montagne : comment celle-ci contrôle leur déformation ; à quelle vitesse ; comment une chaîne se réchauffe puis se refroidit et comment elle se déforme en fonction de son régime thermique. Le consensus et l’intégration de différents domaines thématiques ont donc progressé ! Il reste cependant des efforts certains à produire sur

N°	Reçu le	1 ^{er} lecteur	2 ^e lecteur	3 ^e lecteur	4 ^e lecteur	5 ^e lecteur	Nb ca + esp
1b	4/11/19	N.S.	D.R.	F.Deb			

les relations entre le profond et la surface. Les histoires sédimentologiques et tectono-métamorphiques des Pyrénées varisques ne sont en effet pas encore suffisamment corrélées. Les travaux réalisés montrent une évolution tectono-métamorphique sensiblement différente entre les massifs nord-pyrénéens et la zone axiale, sans doute à mettre en relation avec un découplage tardif à post-orogénique entre les deux domaines, ce qui réactiverait la paléo-faille nord-pyrénéenne. La position géodynamique des Pyrénées telle que celle proposée dans Cochelin *et al.* (2017) et validée par les travaux de Lemirre (2018 ; Lemirre *et al.*, 2019) montre que les Pyrénées varisques sont sans doute singulières mais peut-être pas uniques, et que des informations intéressantes pourraient être extraites d'une comparaison entre Pyrénées, zone d'Ivrée, Calabre et Sardaigne par exemple. Une question posée par les travaux du RGF est celle du Permien, ou plutôt du ou « des Permien(s) ». Autrement dit : est-ce que le Permien est uniquement la fin du cycle varisque avec le retour à l'équilibre de la croûte et la reformation d'une lithosphère standard avec manteau lithosphérique ? Ou faut-il considérer plusieurs Permien(s), l'un tardif et post varisque et l'autre marquant le début du cycle alpin ? Il nous faut signaler enfin que bien comprendre le varisque pyrénéen permet de mieux contraindre ce qui s'est passé ensuite, en particulier l'évolution mésozoïque et l'hyper-extension crétacée. De fortes contraintes sur l'état de la lithosphère à la fin du cycle varisque, c'est-à-dire sur l'état initial de l'hyper-extension crétacée, sont apportées par les travaux du RGF cités ci-dessus.

M. de Saint Blanquat¹, B. Cochelin², B. Lemirre¹, S. Duchêne¹, Y. Denèle¹

¹Géosciences Environnement Toulouse, Univ. de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, 14 avenue Edouard Belin, 31400, France.

²Univ. d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, 1A Rue de la Ferrollerie, 45071 Orléans, France.