

Avant-propos

Yoann DENÈLE et Julien BERGER

GET, Université Toulouse-III-Paul-Sabatier, Toulouse, France

L'idée de cet ouvrage collectif est issue de la demande que nous a adressée Sylvie Leroy en septembre 2018, responsable du thème « Dynamique de la lithosphère continentale » de la collection SCIENCES chez ISTE Editions, de coordonner un ouvrage sur la chaîne varisque. Il nous a semblé alors adapté de proposer un ouvrage sur cette chaîne de montagnes en focalisant sur les massifs français, tout en évitant de s'imposer des limites géographiques strictes, afin de poser notamment le cadre paléogéographique et géodynamique. Cet ouvrage ayant pour ambition de toucher un large public d'enseignants et d'étudiants, nous avons choisi de proposer des chapitres se basant sur les avancées récentes en recherche, mais avec une certaine dose de vulgarisation, tout en incluant des descriptions détaillées de secteurs clés des massifs varisques en France.

Chaque chapitre de cet ouvrage est une œuvre d'auteur. Il n'aurait donc pas pu voir le jour sans l'implication des différents auteurs de chapitre qui se sont impliqués avec enthousiasme et passion dans ce travail collectif. Pour chaque chapitre, le ou les auteurs assument la responsabilité de leur chapitre respectif qui expose avant tout leur vision personnelle, tout en tenant compte des autres opinions. La relative diversité des points de vue reflète bien les débats en cours et montre que l'étude de la chaîne varisque n'est pas figée, mais reste un domaine actif des sciences de la Terre. La science avance très vite, et comme la finalisation de cet ouvrage a demandé plus de temps que prévu, avec des écarts significatifs concernant les périodes de rédactions de certains chapitres, il nous semble important de préciser ici les dates de réception des premières versions des différents chapitres, afin qu'ils puissent être inscrits dans leur cadre historique, notamment vis-à-vis des publications récentes ou actuelles, dont les auteurs des chapitres n'ont pas pu intégrer

La chaîne varisque en France 1,

coordonné par Yoann DENÈLE et Julien BERGER. © ISTE Editions 2023.

les résultats. Le maillot jaune de cet ouvrage est ainsi décerné au chapitre 4 du volume 1, dont la première version a été proposée au mois d'août 2019 ; le chapitre 2 du volume 1 et le chapitre 1 du volume 2 ont été envoyés en février 2020 ; et enfin, la période courant sur la fin de l'année 2020 et le début de l'année 2021 a été la plus prolifique avec la réception, successivement, des chapitres 1 et 3 du volume 1 et les chapitres 3, puis 2 du volume 2. La relecture globale et la finalisation de l'introduction et de la conclusion, étapes semées d'embûches, ont engendré la soumission de ce projet fin 2021.

« Il ne faut pas s'imaginer, même aujourd'hui, que dans l'étude de l'histoire naturelle, on doive se borner uniquement à faire des descriptions exactes et à s'assurer seulement des faits particuliers ; c'est à la vérité, et comme nous l'avons dit, le but essentiel qu'on doit se proposer d'abord, mais il faut tâcher de s'élever à quelque chose de plus grand et plus digne encore de nous occuper, c'est de combiner les observations, de généraliser les faits, de les lier ensemble par la force des analogies, et de tâcher d'arriver à ce haut degré de connaissances où nous pouvons juger que les effets particuliers dépendent d'effets plus généraux. » (Buffon, *Histoire naturelle*, édition de 1749)

Introduction

Yoann DENÈLE et Julien BERGER

GET, Université Toulouse-III-Paul-Sabatier, Toulouse, France

Les roches qui forment le socle des régions de France, et plus largement de l'Europe occidentale, d'une partie de l'Amérique (Appalaches), et de l'Afrique du Nord (Meseta) datent essentiellement de l'Édiacarien au Carbonifère. Elles sont formées ou transformées durant une période orogénique majeure qui se déroule durant le Dévonien et le Carbonifère, dénommée **varisque**, mais le terme **hercynien** peut également la qualifier pour des raisons historiques. Rappelons qu'à la fin du XIX^e siècle, le terme « varisque », en référence au nom latin *Curia Variscorum* de la ville de Hof, en Bavière, a été suggéré par le géologue autrichien **Eduard Suess** (1831-1914). Ce terme est alors introduit pour décrire une chaîne de montagnes antépermienne d'Europe centrale, dont les directions structurales permettaient de la différencier des chaînes, également paléozoïques, armoricaines et ibériques. Durant la même période, **Marcel Bertrand** (1847-1907) proposa, en référence à la forêt antique d'Europe centrale *Hercynia silva*, le terme hercynien pour caractériser l'ensemble de ces domaines dont la formation semblait synchrone. Cependant, en 1924, **Hans Stille** (1876-1966) emploie le terme de « varisque » pour décrire le même système. Ainsi, les termes « varisque » et « hercynien » ont été utilisés par la suite par les géologues, qu'ils soient respectivement plutôt d'influence anglo-saxonne ou latine, avant que les sciences géologiques soient progressivement dominées par l'utilisation des termes anglo-saxons ; et ainsi, que « varisque » devienne officieusement le terme scientifique de référence.

Le relief des régions françaises est marqué par des chaînes de haute montagne aux sommets aigus (Alpes, Pyrénées), de grands domaines de moyenne montagne (Massif central, Vosges) ou de basses collines aux sommets arrondis (Massif armoricain, Ardennes) et par de vastes plaines (Bassins parisien et aquitain). La dualité du style de relief

dans les secteurs montagneux est parfois associée, dans la littérature générale, à l'âge des phénomènes orogéniques ayant affecté ces massifs (varisque *versus* alpin). Cette simplification ne rend pas compte de la richesse de l'histoire géologique de la France. Elle ne permet pas de considérer certains traits morphologiques particuliers, tels que la dichotomie entre le relief peu accentué de collines et de vallons du Massif armoricain qui culmine à 384 m au Tuchen Gador et les reliefs escarpés des Cévennes qui atteignent pratiquement 1 700 m d'altitude au mont Lozère. Ces deux ensembles de relief sont pourtant, en apparence, préservés des phénomènes orogéniques alpins, et montrent à l'affleurement des roches déformées et métamorphisées durant la période varisque, et pourraient ainsi être considérés comme appartenant aux « massifs anciens de France ». Il faut prendre en compte que la formation des chaînes de montagnes du cycle alpin a entraîné le développement de hauts reliefs dans les domaines internes à croûte épaissie (Alpes, Pyrénées), et de grands bassins subsidents d'origine flexurale dans les domaines externes (Bassin aquitain, bassin du sud-est). Mais également que le relief de la France est contrôlé au premier ordre par le développement, de l'Éocène terminal au début du Miocène, d'un domaine discontinu à croûte amincie autour de l'arc alpin (*rift* ouest-européen), ainsi que de la marge du golfe du Lion. Les fossés d'effondrement de ces systèmes de *rift*, à forte charge sédimentaire (grabens du Rhin et de la Limagne dans le *rift* ouest-européen, graben d'Alès sur la marge du golfe du Lion) sont entourés par des sommets de moyennes altitudes (Vosges, partie orientale et méridionale du Massif central), qui appartiennent *lato sensu* aux épaules des systèmes de *rift*, sur lesquelles le socle varisque a été mis à nu. L'exhumation et l'incision de ces domaines semblent en outre contrôlées par une dynamique profonde (courants ascendants mantelliques), comme l'atteste le magmatisme mio-pliocène (Cantal, Aubrac), voire quaternaire (chaîne des Puys) dans le Massif central. Mais probablement, également les évidences de soulèvements significatifs sur la même période. La formation des montagnes cévenoles est ainsi liée, au premier ordre, à une exhumation lente, mais significative, au Cénozoïque, sur la bordure de systèmes de *rift* associés à une dynamique mantellique particulière. La comparaison avec les processus essentiellement épirogéniques subis par le Massif armoricain depuis le Permien explique la différence de topographie entre ces deux systèmes. Ainsi, contrairement aux Pyrénées et aux Alpes, qui forment des chaînes de montagnes au sens structural et morphologique, il ne faut pas considérer en géographie physique de chaîne de montagnes varisque. Il faut considérer, au contraire, des **massifs varisques** (Massif armoricain, Massif central, Vosges) entourés par des domaines de bassins (Bassins parisien et aquitain) et formant parfois des noyaux discontinus au cœur des chaînes de montagnes (Alpes, Pyrénées). Ce que ces massifs peuvent avoir actuellement de relief ne doit rien, ou presque, au soulèvement orogénique initial. Néanmoins, si la formation de la chaîne varisque il y a plus de 300 Ma a peu ou pas d'influence sur le relief de la France, il n'en reste pas moins que les roches du socle témoignent de **l'édification d'une chaîne de montagnes majeure** à la fin du Carbonifère, qui se déployait en Europe sur plus de 3 000 km de long et 700 km de large. Le relief de cette paléochaîne de montagnes, bien que sujet à des débats, était sans nul

doute significatif, et a eu une influence remarquable sur l'évolution climatique de la Terre au Carbonifère et au Permien. Sur la base de 7 chapitres indépendants, c'est l'histoire de cette paléochaîne de montagnes, mais aussi de l'évolution des idées la concernant qui sont abordées dans cet ouvrage à travers la description des massifs de socle de France.

L'étude des chaînes anciennes doit tenir compte de plusieurs spécificités. Premièrement, le géologue doit restaurer un système ayant subi des transformations importantes au cours d'événements géodynamiques postérieurs. Dans le cas de la chaîne varisque, et notamment pour sa branche européenne, il s'agit de restaurer le système atlantique, et plus particulièrement le golfe de Gascogne, ainsi que les systèmes alpins. Dans cet ouvrage, cette problématique n'est pas attaquée de manière frontale dans un chapitre consacré. Retenons que si la restauration de l'ouverture du golfe de Gascogne est relativement simple, ce n'est pas forcément le cas des chaînes pyrénéo-alpines et des bassins marginaux méditerranéens. Surtout lorsqu'il s'agit de déterminer la position précise à la limite Carbonifère-Permien de massifs isolés, tels que les Maures et les massifs cristallins des Alpes, de Corse et des Pyrénées. Ainsi, les corrélations entre ces massifs et les différentes unités de la branche principale de la chaîne varisque en France (Massif central et Massif armoricain) ne sont, pour l'heure, pas clairement établies. Ce qui explique que ces massifs isolés soient traités séparément dans les différents chapitres de cet ouvrage. Une autre particularité de l'étude des orogènes anciens est de considérer un système pour lequel le [cadre géodynamique](#) est difficile à établir. Tout simplement, car les plaques lithosphériques impliquées et leur cinématique ne peuvent pas être aussi clairement définies que dans les systèmes cénozoïques. Dans ces systèmes récents, nous disposons d'un enregistrement géophysique, notamment dans les fonds océaniques préservés, qui permet de déterminer la cinématique des plaques sur de longues périodes de temps. Comme cela est illustré dans le chapitre 2, volume 1, qui synthétise le contexte paléogéodynamique de la chaîne varisque, les contraintes géodynamiques sont essentiellement issues de la confrontation entre les données paléomagnétiques qui permettent de déterminer des paléolatitudes, et les données « géologiques », et notamment géochronologiques, paléontologiques et géochimiques. Malgré toutes ces informations, le canevas géodynamique évolutif au cours de la formation d'un orogène aussi considérable que le varisque reste incomplet. La comparaison avec les systèmes plus récents dans lesquels ce canevas est bien contraint permet de faire évoluer les idées. En outre, la reconstitution d'un orogène ancien nécessite de considérer des données issues principalement de la croûte moyenne et inférieure. En effet, si dans les chaînes plus récentes, tels les systèmes péri-téthysiens (exemple : Alpes, Himalaya), le niveau structural supérieur, marqué par une association de plis et de failles (*fold and thrust belt*) affectant des roches peu métamorphiques, est le plus souvent à l'affleurement. Ce n'est pas le cas du cœur des chaînes anciennes, pour lesquelles le niveau structural inférieur, marqué par des roches à déformation pénétrative (ductile) et de haut degré métamorphique, est le plus souvent observé. Cette configuration

est liée, en partie, aux phases tardives qui ont entraîné une exhumation de ce niveau structural lors du retour à l'équilibre de la croûte orogénique préalablement épaissie et gravitationnellement instable. Cette configuration est accentuée par l'histoire méso-cénozoïque qui a pu engendrer localement une exhumation importante, ainsi qu'une érosion significative des unités varisques (épaule de *rift*, zones internes des chaînes pyrénéo-alpines). Ainsi, l'étude des roches et des affleurements qui ont enregistré l'édification de la chaîne varisque (et dans les orogènes anciens de manière générale) fait appel nécessairement à des spécialités des sciences de la Terre qui permettent d'étudier ce niveau structural inférieur. C'est notamment le cas de la pétrologie magmatique et métamorphique, de la tectonique ductile et de la géochronologie haute température. Cet état de fait explique que quatre chapitres de cet ouvrage collectif soient dévolus à synthétiser ce type d'étude, que ce soit concernant le magmatisme précollisionnel (chapitre 3, volume 1), le métamorphisme et les déformations précoces (chapitre 4, volume 1) ou le magmatisme (chapitre 1, volume 2) et les déformations (chapitre 2, volume 2) tardi-orogéniques. Dans le niveau structural supérieur préservé, les archives sédimentaires sont partielles, elles s'observent essentiellement dans des domaines spatialement restreints, majoritairement localisés en périphérie de la chaîne (domaines externes : Ardennes, Pyrénées-Cantabre). Dans cet ouvrage, un collectif d'auteur propose, dans le chapitre 3, volume 2, une synthèse exhaustive des données sédimentaires associées au cycle varisque et montre, entre autres, la puissance de cet enregistrement comme vecteur de notre compréhension de l'évolution morphologique de la chaîne. Néanmoins, la rareté des archives sédimentaires préservées dans les domaines internes, et notamment des archives associées aux phases précoces de la construction orogénique, implique que l'analyse de ces domaines est largement dépendante de l'évolution des méthodes géochronologiques. Mais aussi de notre capacité à interpréter les résultats qu'elles prodiguent. Cet ouvrage ne contient pas de chapitre dédié à la géochronologie de la chaîne varisque. Néanmoins, ce qui constitue en apparence une lacune est aussi un avantage, car tous les chapitres décrivent les données géochronologiques et les discutent à la lumière des connaissances issues du terrain, qui sont des contraintes indispensables pour interpréter les « âges absolus ». Bien entendu, les différents spécialistes qui ont rédigé les chapitres de cet ouvrage n'ont pas forcément la même façon d'interpréter ces âges, ce qui emmène des controverses, qui sont ainsi illustrées.

Tous les chapitres de cet ouvrage soulignent l'apport des données analytiques pour contraindre l'histoire de la chaîne varisque. Nonobstant, l'étude des chaînes de montagnes reste toujours aussi dépendante d'observations de terrain de qualité qui doivent poser le cadre général des études analytiques, qu'elles soient paléomagnétiques, géochronologiques, géochimiques ou géophysiques. Les analyses de terrain sont dépendantes de la qualité des affleurements qui ne sont pas homogènes dans les massifs français. Sans entrer dans les détails liés aux microclimats, les massifs varisques qui ont subi une exhumation récente au cœur des chaînes de montagnes (zone axiale des Pyrénées et massifs

crystallins dans les Alpes) bénéficient d'excellentes qualités d'affleurements qui permettent d'étudier les structures des roches avec une bonne continuité. C'est également le cas dans les parties orientales et méridionales du Massif central affectées par une exhumation lente, mais significative, au Cénozoïque, notamment. Dans le Massif armoricain, les lignes de côte présentent d'excellentes conditions d'affleurements, mais laissent place à des paysages bocagers dans l'arrière-pays, dans lesquels il est rare de pouvoir observer le *substratum* rocheux. Le schéma est assez proche dans le Massif central occidental, où les affleurements se font rares sur les plateaux cristallins arénitisés. Dans ces domaines, l'accumulation d'observations sur des affleurements temporaires (carrières, grandes infrastructures routières ou ferroviaires) a heureusement permis de produire un travail de cartographie remarquable, sans lequel toute synthèse sur la chaîne varisque en France semblerait incongrue.

Dans le [chapitre 1, volume 1](#), [Olivier Vanderhaeghe](#), professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, présente l'histoire de l'évolution des méthodes et des concepts appliqués à la chaîne varisque, et ainsi de notre vision de cette paléochaine de montagnes. Cet historique permet de souligner également l'influence de l'étude de cette chaîne ancienne comme source d'inspiration dans l'histoire des sciences de la Terre. Les premiers développements méthodologiques concernent la [cartographie et la stratigraphie](#). L'apparition des premières [cartes géologiques synthétiques](#) à l'échelle des états au début du XIX^e siècle (États-Unis d'Amérique, Grande-Bretagne, puis France) est ainsi suivie du développement de cartes plus détaillées, à l'échelle régionale, à la fin du XIX^e et début du XX^e siècle. L'étude des roches au [microscope optique](#) sera progressivement développée durant la seconde moitié du XIX^e siècle et permettra de développer l'analyse des minéraux et des structures à l'échelle microscopique, méthodes indispensables pour étudier les roches de socle. Ces développements méthodologiques permettent de faire évoluer un certain nombre de concepts. Dans les concepts anciens, s'il en est un qui ressort dans la chaîne varisque avant l'avènement de la tectonique des plaques, c'est bien la théorie des [géosynclinaux](#) qui a été introduite à partir de l'étude des Appalaches au début du XIX^e siècle. Les géosynclinaux sont définis comme des domaines immergés, accumulant de grandes quantités de roches sédimentaires et qui localisent la déformation et les effets du métamorphisme, constituant ainsi un lieu privilégié pour la transformation des roches. Ce concept permet d'expliquer l'association de 3 types de roches dans les chaînes de montagnes, les roches primitives, les roches de transitions et les roches sédimentaires. Dans le cadre géosynclinal, parfois en contradiction avec ce paradigme, les concepts de zonéographie du métamorphisme, de déplacements horizontaux d'unités tectoniques (nappes) ou de fusion partielle (migmatites) trouvent également leur source dans la chaîne varisque au milieu du XX^e siècle. Par la suite, la géologie va subir [la révolution de la tectonique des plaques](#) à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Si cette théorie est initialement développée à distance des massifs varisques, puisqu'essentiellement issue des observations géophysiques du globe, elle va vite être adaptée à l'étude de cette chaîne, et

ce, dès le milieu des années 1970. Durant cette période, différentes propositions vont émerger au sujet de l'identification des zones de sutures, et ainsi des blocs continentaux et océans en présence au cours de l'évolution de l'orogénèse varisque, et donc concernant son contexte paléogéographique.

Dans le [chapitre 2, volume 1](#), [Jean-Marc Lardeaux](#) et [Karel Schulmann](#), professeurs, respectivement dans les Universités de Nice et de Strasbourg, proposent une synthèse concernant [le contexte paléogéographique et paléogéodynamique de la chaîne varisque](#). Dans ce chapitre, indispensable à la compréhension de l'évolution de cette chaîne de montagnes, ces deux auteurs synthétisent les données lithotectoniques à l'échelle des grandes unités, les contraintes paléontologiques, paléoclimatiques et minéralogiques (provenance des zircons), mais aussi les modèles paléomagnétiques modernes. Ils soulignent ainsi les points de repères incontournables et les questions ouvertes concernant la géodynamique évolutive. Il est ainsi montré que la chaîne varisque résulte de la convergence, au Dévonien et au Carbonifère, des deux méga-plaques, Laurussia et Gondwana, dont la collision a mené à la formation de la Pangée, au Carbonifère supérieur. Plusieurs microcontinents et domaines océaniques, dont le dimensionnement et la géométrie varient en fonction des reconstructions, sont mis en évidence entre Laurussia et Gondwana. La « valse » de ces microcontinents (Avalonia, Armorica-Barranda) qui appartient à ce que certains auteurs qualifient de « ruban continental varisque », situés en périphérie nord de Gondwana, au Cadomien, avant d'être translatés en direction de Laurussia, au cours d'un épisode de *rifting* majeur au Cambro-Ordovicien, est ainsi mise en évidence. L'implication de ces domaines dans la construction de la chaîne a entraîné la formation de quatre zones lithotectoniques (avant-chaîne nord, rhéno-hercynienne, saxo-thuringienne, moldanubienne). Ces zones traduisent autant d'unités paléogéographiques dont l'accrétion, au cours de la collision continentale faisant suite à la fermeture d'au moins deux domaines océaniques dans deux zones de subduction à pendage opposé, a progressivement édifié la chaîne varisque. Les données de haute résolution sur la période 360-280 Ma suggèrent des variations importantes dans la cinématique des méga-plaques, et notamment une réorganisation cinématique majeure, en lien avec une rotation anti-horaire de Laurussia, au début du Permien. Ces données soulignent ainsi que l'effondrement gravitaire de la chaîne n'est pas la cause exclusive des phénomènes d'extension post-orogéniques. Enfin, les études paléogéographiques montrent l'existence d'un domaine océanique, la Paléotéthys, entre Gondwana et les microcontinents nord-Gondwaniens, qui serait en subduction dès le Viséen, mais dont l'impact sur l'évolution de la chaîne varisque est encore trop souvent ignoré.

Dans le [chapitre 3, volume 1](#), [Julien Berger](#), maître de conférences à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, propose une synthèse des caractéristiques du [magmatisme précollisionnel](#). Cet auteur illustre, entre autres, que la lithosphère des unités impliquées dans la

construction de la chaîne varisque a été profondément affectée par des événements géodynamiques pré-orogéniques lors du **cycle cadomien**, mais aussi lors d'un **épisode cambro-ordovicien**, qui reste encore largement mal compris. Les marqueurs de ce magmatisme cambro-ordovicien correspondent à des cortèges ophiolitiques, mais aussi à des massifs de roches basiques, d'associations acido-basiques (le fameux complexe leptyno-amphibolitique), et surtout de roches acides qui affleurent sous la forme de massifs d'orthogneiss, dont la présence ubiquiste est une caractéristique de la chaîne varisque. Dans ce chapitre, les différents **massifs ophiolitiques** reconnus sont décrits et étudiés à la lumière d'avancées scientifiques récentes issues des fonds océaniques (dorsales, pieds de marges) qui ont montré que l'association de roches basiques et ultrabasiques ne traduisait pas forcément la présence d'une paléodorsale. La présence de **sutures océaniques** dans les massifs varisques de France est ainsi testée. Cette **synthèse des données cartographiques, géochronologiques et géochimiques sur le magmatisme cambro-ordovicien** en France met en évidence un magmatisme extrêmement varié qui traduit soit une subduction active depuis le Cadomien, impliquant des domaines arrière-arc, soit, et ce qui paraît l'hypothèse la plus probable, un étirement crustal au cours d'une phase de *rifting*, et localement d'accrétion océanique, affectant un manteau fertile, hérité de la subduction cadomienne. L'impact de ce magmatisme de marges continentales, remarquable par l'abondance de roches acides, implique que la chaîne varisque ne peut plus être considérée simplement comme étant le résultat de la convergence de domaines de marges à socle cadomien. **La compilation des âges U-Pb sur zircons** traduit la formation d'une croûte transitionnelle, et donc présentant un caractère en partie « juvénile », dans les marges continentales cambro-ordoviciennes. Ce chapitre permet également de faire le point sur le magmatisme dévonien qui traduit la formation d'arcs continentaux, mais aussi, localement, de bassins arrière-arc au cours d'une période de subduction active.

Dans le **chapitre 4, volume 1**, Michel Faure, professeur à l'Université d'Orléans, décrit de manière exhaustive les évidences de **métamorphismes et de déformations précoces dans la chaîne varisque française**. Cet auteur propose ainsi une synthèse des caractéristiques des phases de subduction et de collision, ayant eu lieu au Dévonien et au Carbonifère. Les évidences de ces phases précoces sont surtout observées dans le domaine moldanubien de la chaîne, et notamment dans le Massif central et le domaine sud-armoricain pour la branche principale en France. Dans le Massif central, le domaine moldanubien est marqué par un empilement de nappes, avec notamment un allochtone supérieur (unité supérieure des gneiss) qui se rencontre sous forme de klipptes tectoniques ; un allochtone inférieur (unité inférieure des gneiss) et une unité para-autochtone qui s'observent sous forme de fenêtres tectoniques dans le Limousin, ou au front de la chaîne, dans la partie méridionale du Massif central, et à proximité du domaine d'avant-pays. Quatre événements tectonométamorphiques précoces sont reconnus dans la branche principale, D₀, D₁, D₂, D₃. Les phases D₀ et D₁, mises en évidence dans l'allochtone supérieur, correspondent, respectivement, à un épisode d'enfouissement sous des conditions

de HP et à un stade d'exhumation. Les gradients géothermiques contemporains de l'épisode d'enfouissement, compris entre 7 et 15 °C/km, sont typiques des zones de subduction, avec un pic pouvant atteindre 3 GPa, représentant ainsi un enfouissement des unités à plus de 90 km de profondeur. La rétro-morphose associée à l'épisode D₁ traduit la mise en nappe précoce à vergence vers le sud-ouest dans un prisme crustal se formant à la faveur d'un épisode de subduction continentale. Cette subduction implique des unités strictement continentales (granulites de haute pression) et de transition continent-océan (éclogites du complexe leptyno-amphibolitique) de la marge ordovicienne de Gondwana. Les événements D₂ et D₃ sont associés à la collision continentale et sont exprimés essentiellement dans la marge gondwanienne, illustrant un contraste de résistance avec la lithosphère d'Armorica, davantage marquée par l'orogénèse cadomienne. La phase D₂ est associée à un métamorphisme barrovien, avec une inversion des isogrades métamorphiques dans l'unité inférieure des gneiss, qui souligne le charriage toujours actif de l'unité supérieure des gneiss. L'étirement associé à cet événement présente une direction longitudinale par rapport aux zones de sutures, suggérant une forte composante oblique de la déformation collisionnelle, qui reste encore mal comprise. Les événements tectonométamorphiques associés à la phase D₃ sont localisés dans la partie sud de la branche principale, illustrant la propagation de la déformation collisionnelle vers l'avant-pays méridional. Si la chronologie absolue des événements D₁, D₂ et D₃ est relativement bien contrainte entre 380 et 340 Ma, l'âge de l'événement de HP (D₀) est discuté à la lumière des datations les plus récentes qui semblent converger vers une estimation de cet événement au Dévonien supérieur (380-360 Ma). Ce chapitre permet également de faire le point sur les massifs varisques français isolés, tels que Maures, Corse et massifs cristallins des Alpes, et qui enregistrent des épisodes précoces impliquant des phénomènes de subduction et de collision tout à fait comparables à la branche principale.

Dans le chapitre 1, volume 2, Arnaud Villaros, Oscar Laurent, Simon Couzinié et Jean-François Moyen, respectivement docteur en sciences de la terre, chargé de recherche au laboratoire Géosciences Environnement Toulouse, enseignant à l'Université de Lorraine et professeur à l'Université de Lyon, décrivent les évidences et les implications du métamorphisme haute température et magmatisme syn- à tardi-orogénique dans la chaîne varisque en France. Dans ce chapitre, la prépondérance de terrains ayant été affectés par un métamorphisme de haute température et la présence de larges massifs granitiques est mise en évidence à partir de cartes synthétiques. La synthèse des données pétrologiques et géochronologiques de ces terrains montre que le premier épisode de métamorphisme de haute température (désigné M₂) affecte les roches profondes des zones internes autour de 360-340 Ma, c'est-à-dire lors de leur exhumation associée à la formation de nappes crustales. Cet épisode métamorphique synchrone de la phase compressive principale (D₂) est qualifié de syn-orogénique. Par la suite, entre 330 et 290 Ma, les unités varisques subissent un nouvel épisode métamorphique de haute température qui va entraîner la formation d'une grande quantité de migmatites d'abord à biotite stable (stade

désigné M_3), puis une déstabilisation totale des biotites et spatialement associées à des **granulites** de BP (stade désigné M_4). Ces derniers événements métamorphiques étant synchrones d'événements extensifs affectant la zone interne de la chaîne sont qualifiés de tardi-orogéniques. Les roches métamorphiques de haute température s'étant développées lors des stades M_3 et M_4 sont spatialement et temporellement associées à de nombreux massifs de granitoïdes. Les granites d'origine crustale sont majoritaires, ils regroupent des leucogranites peralumineux à deux micas, et des granites peralumineux à biotite et cordiérite, dont la source s'est formée à plus haute température. Mais des plutons de granitoïdes calco-alcalins potassiques, roches localement nommées **vaugnérîtes** ou **durbachites**, s'observent également. La signature de ces plutons implique une source mantellique préalablement enrichie par du matériel crustal. Ces associations montrent que le volume important de migmatites et de plutons d'origine crustale dans les massifs varisques de France traduit un phénomène de **maturation thermique** d'une croûte continentale épaissie, mais ce processus n'est pas exclusif, et il est maintenant clairement établi qu'il est assisté par des phénomènes de fusion affectant le manteau. Dans l'est du Massif central, la migration des plutons du nord vers le sud entre 335 et 300 Ma suggère un processus de **délamination asymétrique du manteau lithosphérique** lors des phases tardi-varisques. Dans ce contexte, la séquence de mises en place des magmas, à une latitude donnée, traduit la **migration du front de fusion** depuis la base vers le sommet de la croûte orogénique.

Dans le **chapitre 2, volume 2, Yoann Denèle et Bryan Cochelin**, respectivement maître de conférences à l'Université Paul Sabatier de Toulouse et post-doctorant au laboratoire State Key à Nanjing, décrivent les évidences de **déformation tardi-orogénique** ayant entraîné une **réorganisation structurale de la chaîne varisque au Carbonifère supérieur**. Ce chapitre constitue une synthèse des données structurales dans les unités formées au Carbonifère supérieur (plutons, migmatites M_3 et M_4) de la branche principale en France, mais aussi dans les Pyrénées et dans le domaine Cantabre. Les structures tardives identifiées, d'ampleur crustale, voire lithosphérique, se développent entre 320 et 295 Ma, c'est-à-dire 40 Ma après le début de la collision continentale, et sont majoritairement localisées au sud de la faille de Nort-sur-Erdre, qui est considérée comme une zone de suture dévonienne majeure (Armorica – Gondwana). Elles affectent une croûte orogénique thermiquement mature, comme en attestent les évidences, sur la même période, d'un enregistrement métamorphique de haute, voire ultra-haute température, associé à une généralisation des phénomènes de fusion crustale, et à la mise en place de larges volumes de magmas. La diversité des structures tardives (**zones de cisaillement, zones de fluages, détachements, dômes gneissiques, oroclines**), associées à cet enregistrement thermique, illustre un partitionnement de la déformation dans une partie significative du « ruban continental varisque », dont la lithosphère, encadrée par les méga-continentaux Laurussia et Gondwana qui lui imposent un mouvement de convergence oblique, est affaiblie par des phénomènes de délamination. La déformation pointée par ces structures est qualifiée dans ce chapitre d'épisode de restructuration, car elle a un impact de premier ordre sur la structure de la chaîne varis-

que telle que nous la connaissons aujourd'hui. Cette déformation est notamment associée à des déplacements relatifs considérables (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres) entre les unités lithotectoniques, ou à l'intérieur de ces unités. Ces déplacements sont accommodés par la formation des décrochements ductiles, ainsi que par des phénomènes de rotation autour d'axes verticaux d'échelle orogénique (formation d'oroclines). Cette déformation conduit également à une réorganisation des différents niveaux structuraux de la croûte orogénique, marquée par l'exhumation rapide des migmatites dans des dômes gneissiques qui s'observent aussi bien dans la zone interne de la chaîne, que dans ce qui constituait, lors des stades précoces, l'avant-pays méridional.

Dans le [chapitre 3, volume 2](#), Markus Aretz, Élise Nardin, Frédéric Christophoul et Julien Denayer, respectivement maître de conférences à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, chargée de recherche au laboratoire Géoscience Environnement Toulouse, maître de conférences à l'Université Paul Sabatier de Toulouse et maître de conférences à l'Université de Liège, décrivent les [bassins sédimentaires et l'évolution du relief associés au cycle varisque en France et dans les pays limitrophes](#). Ce chapitre constitue une synthèse inédite des données sédimentaires concernant le cycle varisque lors des stades pré-orogénique (Silurien), syn-orogénique (Dévonien et Carbonifère inférieur), tardi-orogénique (Carbonifère supérieur) et post-orogénique (Permien inférieur). Ces données sédimentaires sont décrites dans tous les massifs varisques de France, mais aussi, afin de proposer une vision sur la dynamique des bassins, dans les zones limitrophes du nord de la France. Sur la base de *logs* ou de schémas lithostratigraphiques synthétiques, d'illustrations d'affleurements clés et de cartes variées, ces auteurs décrivent les successions sédimentaires et leurs implications en termes d'évolution du relief varisque. Les archives sédimentaires sont bien préservées dans les grands bassins périphériques, que ce soit au nord (Ardennes, Massif rhénan) ou au sud de la chaîne (Montagne Noire, Pyrénées). Ces archives montrent, malgré leur positionnement paléogéographique clairement distinct, une évolution sédimentaire étonnamment comparable. En effet, que ce soit sur [la marge de Laurussia](#) au nord ou de [Gondwana](#) au sud, l'histoire du cycle varisque est marquée par une transgression majeure au Silurien-Dévonien basal, puis par l'installation progressive de vastes plateformes à dominance carbonatées qui vont subir un épisode de réorganisation important au Dévonien supérieur, possiblement en lien avec la création de reliefs dans les zones internes de la chaîne. Dans les deux bassins, la transition depuis des systèmes de marges passives vers des bassins flexuraux d'avant-pays est clairement établie à partir du Viséen, période pendant laquelle la progression rapide du [faciès flysch](#), qui envahit et comble progressivement les bassins, montre clairement la présence de reliefs liés à la formation d'une chaîne de montagnes. La poursuite de cette évolution entraîne la formation de vastes bassins paraliques au Namurien et au Westphalien, notamment au nord de la chaîne, entraînant la formation de nombreuses couches de charbon.

Dans les parties plus internes de la chaîne, l'enregistrement sédimentaire au Dévonien et au Carbonifère est plus disparate et souvent incomplet, traduisant l'influence de la présence de reliefs précoces, mais discontinus, puisqu'une large partie des successions sédimentaires présentent des faciès marins. Enfin, la formation de bassins intramontagneux dans la zone interne de la chaîne, en contexte tectonique décro-extensif au Gzhélien, témoigne de la restructuration tardive de la chaîne. Les assemblages floristiques de ces bassins interrogent quant à l'amplitude du relief au cœur de la chaîne varisque, avant la formation des vastes plaines permienne qui signeront la fin de la vie de cette chaîne de montagnes.