



Programme du Référentiel Géologique de la France (RGF) Méthode de Cartographie des événements géologiques : application du Référentiel évènementiel au massif des Pyrénées

Rapport Final

BRGM/RP-70980-FR
Janvier 2023

1.89 3740.46 -625.5



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Programme du Référentiel Géologique de la France (RGF) Méthode de cartographie des événements géologiques : application du Référentiel événementiel au massif des Pyrénées

Rapport final

BRGM/RP-70980-FR
Janvier 2023

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public (Recherche) du BRGM 2005-XXX-XX

B. Le Bayon, M. Padel, B. Issautier, T. Baudin, F. Cagnard, H. Tissoux, F. Lacquement, S. Grataloup,
C. Prognon, D. Rambourg, J. Stéphane-Perrey, I. Bernachot, A. Hertout

Avec la collaboration de

B. Monod, H. Bauer, A. Plunder, Y. Vernhet, L. Beccaletto, S. Gabalda et tous les étudiants du
chantier RGF Pyrénées

Vérificateurs :

Bernard Monod¹ / Didier Lahondère²

¹ Géologue régional Occitanie

² Directeur adjoint DGR

Date : 22/06/2021

Signatures :



Approbateur :

Christophe Didier

Directeur DGR

Date : 12/01/2023

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : histoire géologique / événement géologique / référentiels / géologie numérique / base de données / Système d'information / carte géologique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Le Bayon, B. Padel M., Issautier I., Baudin T., Cagnard F. Tissoux H., Prognon C., Lacquement F., Grataloup S., Stéphan-Perrey J., Hertout A. (2023) – Programme du Référentiel Géologique de la France (RGF) - Méthode de cartographie des événements géologiques : application du Référentiel événementiel au massif des Pyrénées. Rapport final. BRGM/RP-70980-FR, p., ill., fig., tabl., ann., CD.

© BRGM, **2021**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le développement de la cartographie géologique évènementielle et l'élaboration d'un référentiel des évènements géologiques pyrénéens ont constitué deux objectifs majeurs du chantier Pyrénées, réalisé dans le cadre du programme du Référentiel Géologique de la France (RGF). Le concept de cartographie géologique évènementielle, initié au cours du démonstrateur RGF-Vosges-Rhin, a été développé et appliqué dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées. Ces développements ont permis de construire une méthodologie précise s'appuyant sur la constitution d'une base de données et l'utilisation d'outils opérationnels.

La première tâche du chantier RGF-Pyrénées a consisté à établir le référentiel lithostratigraphique à partir d'un travail préliminaire d'homogénéisation des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 des Pyrénées. Cette première étape a servi de point de départ pour l'élaboration d'un référentiel des évènements géologiques et des cartes qui en découlent.

L'architecture de la base de données abritant le référentiel des évènements géologiques (base Access "référentiel des évènements"), ainsi que les outils permettant de lier ce référentiel aux géométries de la carte géologique des Pyrénées (Add in "Cartographie évènementielle" dans ArcGis), ont été développés dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées, dans le but de générer des cartes évènementielles de façon "semi-automatique". Ces bases de données et outils ont vocation à être intégrés au système d'information du sous-sol du BRGM.

Ce rapport présente, dans une première partie, le contexte, les objectifs et les chantiers du programme RGF. La méthodologie d'application de cette approche est présentée dans la seconde partie du rapport. Le référentiel des évènements géologiques des Pyrénées est détaillé dans une troisième partie. Ce référentiel est hiérarchisé et contient des descriptions synthétiques et détaillées de chacun des grands évènements géologiques identifiés dans les Pyrénées, enrichies par des avancées scientifiques majeures acquises, en particulier, dans le cadre des travaux de recherche (Masters, Thèses) financés par les projets RGF-Pyrénées et Orogen (BRGM-Total-CNRS).

L'approche géologique évènementielle a été présentée à Pau, en juin 2019, lors d'un colloque de restitution des travaux du chantier RGF-Pyrénées. Elle a reçu un accueil très positif, à la fois de la communauté universitaire, des représentants des tutelles et des participants industriels, ce qui constitue un encouragement à poursuivre cette démarche dans le cadre des chantiers RGF-Alpes et RGF-Bassin de Paris. La direction du BRGM souhaite également que cette approche novatrice soit adoptée dans les nouveaux chantiers RGF, dans le but de poursuivre la construction d'un référentiel évènementiel à l'échelle de la France et de la promouvoir auprès de la communauté internationale. Les points importants retenus à l'issue du chantier RGF-Pyrénées sont (i) d'être en capacité de connecter toutes les données géologiques des différentes bases de données, (ii) de proposer de nouveaux produits d'informations géologiques adaptés aux besoins, qu'ils soient scientifiques ou appliqués et (iii) de mettre à jour et valoriser la nouvelle carte géologique à l'échelle 1/50 000, laquelle devient le document cartographique de référence pour l'ensemble de la région Pyrénées.

Sommaire

1. Le programme RGF	11
1.1 CONTEXTE ET MOTIVATIONS	11
1.2 LES OBJECTIFS DU RGF	12
1.3 LA MÉTHODOLOGIE DU RGF	12
1.4 LES CHANTIERS DU RGF	13
2. L'approche RGF dans le chantier Pyrénées	14
2.1 UN OBJECTIF : LA MISE EN COHÉRENCE DES DONNEES GEOLOGIQUES	14
2.2 ETAT DES LIEUX.....	14
2.3 LE RÉFÉRENTIEL LITHOSTRATIGRAPHIQUE HIÉRARCHISÉ.....	15
2.3.1 Les principes de réalisation du référentiel lithostratigraphique	15
2.3.2 Identification des unités lithostratigraphiques.....	17
2.3.3 Le référentiel lithostratigraphique des Pyrénées	18
2.3.4 La carte géologique RGF des Pyrénées	19
2.4 LE RÉFÉRENTIEL STRUCTURAL	27
2.5 LES DONNÉES GÉOLOGIQUES PONCTUELLES ET LEURS BASES DE DONNÉES RESPECTIVES.....	29
2.5.1 La base de données Geofield	29
2.5.2 La base de données géochronologiques.....	30
2.5.3 Interprétation des environnements et processus géologiques.....	30
3. Le Référentiel des événements géologiques.....	32
3.1 L'HISTOIRE DES ROCHES À TRAVERS LA SUCCESSION D'ÉVÈNEMENTS GÉOLOGIQUES : COMMENT CARACTÉRISER UN ÉVÈNEMENT GÉOLOGIQUE ? 32	32
3.2 LE RÉFÉRENTIEL DES ÉVÈNEMENTS GÉOLOGIQUES : NOTION DE HIÉRARCHIE, ÂGES, ORDRES.....	35
3.3 DIFFÉRENTS TYPES D'ÉVÈNEMENTS GÉOLOGIQUES	38
3.4 LES MODÈLES GÉOLOGIQUES DANS L'APPROCHE ÉVÈNEMENTIELLE..	38
3.5 PROCESSUS ET ÉVÈNEMENTS GÉOLOGIQUES : L'EXEMPLE DES ENVIRONNEMENTS DE DÉPÔT, DES FACIÈS MÉTAMORPHIQUES OU DES HORIZONS D'ALTÉRATION	39
3.6 LES ÉVÈNEMENTS GÉOLOGIQUES COMME LIENS ENTRE LES DIFFÉRENTES BASES DE DONNÉES GÉOLOGIQUES	40
4. Cartographie géologique des événements	41
4.1 REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE DES ÉVÈNEMENTS	42
4.2 APPROCHE EVENEMENTIELLE ET STRATIGRAPHIE SEQUENTIELLE.....	45

4.3 LES ZONES STRUCTURALES ET DOMAINES PALÉOGÉOGRAPHIQUES DANS L'APPROCHE EVENEMENTIELLE	46
5. Perspectives d'utilisation de la carte évènementielle.....	48
5.1 UNE APPROCHE PRÉDICTIONNELLE DANS LE DOMAINE DES RISQUES (EX : CARTE PRÉDICTIONNELLE DE SUSCEPTIBILITÉ DE PRÉSENCE D'AMIANTE)	48
5.2 UNE APPROCHE PRÉDICTIONNELLE DANS LE DOMAINE DES RESSOURCES MINÉRALES.....	49
5.3 UNE APPROCHE SOURCE TO SINK ET "SÉQUENTIELLE"	49
5.4 UNE RECONSTITUTION DES PALÉOGÉOGRAPHIES EN LIEN AVEC LES CLIMATS DU PASSÉ	50
6. Conclusions.....	51
7. Bibliographie	53

Liste des figures

- Figure 1 : Emprise du chantier RGF Pyrénées : 59 coupures à 1/50 000 dont 2 feuilles encore non validées par le CCGF (St Paul de Fenouillet, et Aspet) et une carte manquante (Ax-Les-Thermes). Cette dernière coupure a été réalisée au cours du chantier et la maquette a été présentée en 2019 lors du colloque final de restitution du chantier RGF. 15
- Figure 2. Architecture du référentiel lithostratigraphique. A gauche, l'arborescence du référentiel, avec 5 niveaux de hiérarchie et à droite les attributs principaux d'une unité lithostratigraphique..... 17
- Figure 3. Extrait de GRL. Exemple de la formation des marnes de Sainte-Suzanne. Cet extrait nous permet de visualiser les différents champs qui permettent de définir une ULS (ID, Age, Type, Description etc.) 18
- Figure 4. Cartes 1/50 000 du chantier RGF Pyrénées : 58 coupures à 1/50 000 vectorisées et une manquante en 2014, la feuille d'Ax-Les-Thermes. Cette dernière coupure a été réalisée au cours du chantier et la maquette a été présentée en 2019 lors du colloque final de restitution du chantier RGF. 20
- Figure 5. a) carte RGF Pyrénées avec identification des problèmes non résolubles faute de nouvelles acquisitions (traits de couleur noir). b) Extrait d'un croisement entre 4 cartes 50 000 (1050-1051 au nord et 1068-1069 au sud), les lignes rouges montrent les zones non harmonisables en l'état..... 22
- Figure 6 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "supergroupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées 24
- Figure 7 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "groupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées 24
- Figure 8 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "sous-groupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées 25
- Figure 9 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "formations / membres" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées 25
- Figure 10. Extrait de la carte lithostratigraphique, accompagnées de leurs légendes. 26
- Figure 11 : Aperçu de l'architecture du référentiel structural et des attributs associés aux entités structurales. 28
- Figure 12. Extrait de la couche structurale pour les Pyrénées Orientales, avec identification et caractérisation des structures majeures..... 28
- Figure 13 : Diagramme montrant les relations entre les points d'observation et la description géologique dans l'application GEOFIELD. L'application interne Geofield permet de gérer les données issues d'observations et de mesures sur le terrain, d'échantillons, voire d'analyses en laboratoire. Chaque entité géologique est décrite par une liste de termes issus des registres du BRGM qui sont standardisés et communs aux différentes applications du BRGM. Les registres du BRGM sont conçus pour être compatibles avec les normes européennes et internationales (normes GeoSciML et INSPIRE). 30
- Figure 14. Aperçu des relations entre les référentiels (en bleu), la description géologique d'une entité géologique et les entités cartographiées. Les géométries correspondent à différentes entités géologiques qui peuvent être des unités lithotectoniques/paléogéographiques (Référentiel des domaines) ou des unités lithostratigraphiques (Référentiel lithostratigraphique). Une polyligne peut correspondre à une unité structurale (Référentiel structural). Les événements géologiques (référentiel des événements géologiques) sont liés à une entité géologique, dont il faut d'abord réaliser une description du métamorphisme / de l'altération / de la sédimentation / du magmatisme / de la tectonique. En ce sens,

une entité géologique peut avoir de nombreux attributs successifs de processus/environnement, qui peuvent être liés (ou non) à des événements géologiques du référentiel..... 31

- Figure 16 : Exemple de succession dans le temps d'évènements géologiques amenant à la représentation de 5 caissons différents dans la légende d'une carte géologique à partir de 2 unités lithostratigraphiques originelles. Bien que simplement représentés par une couleur dans une légende de carte géologique classique, ces caissons ont vécu de 0 à n évènements en commun. Avec la cartographie événementielle, les caissons dans la légende des cartes contiennent les informations sur l'ensemble des évènements géologiques que les formations géologiques ont rencontrés. 33
- Figure 17 : Lien entre la donnée factuelle (brute), et la donnée interprétée ainsi que leur usage dans la chaîne de production des référentiels lesquels rendent compte des modèles géologiques et de l'état de la connaissance. 34
- Figure 18 : Modélisation du concept d'évènement géologique dans le modèle conceptuel de données de GeoSciML (<http://geosciml.org/>). 35
- Figure 19 : Vue simplifiée des types d'évènements géologiques à différents ordres et de leur hiérarchie. 37
- Figure 20 : L'évènement géologique est le liant de toutes les informations géologiques. Les données sont « factuelles », les évènements sont interprétatifs. Un ou plusieurs évènements géologiques peuvent être observés sur un échantillon ou un affleurement. Ces évènements peuvent être représentés par des mesures (mesures structurales), des analyses (pétrologiques, géochimiques, géochronologiques). 40
- Figure 21 : De la carte géologique (issue du référentiel lithostratigraphique) vers les cartes géologiques événementielles (issues du référentiel événementiel). 42
- Figure 22 : Cartes événementielles. Il est possible de générer une carte pour chaque étape de l'histoire géologique subie par les roches (ici t1 à t4), car toutes ces entités géologiques (représentées par des polygones, polygones et points) portent des attributs distribués dans différentes bases de données et liés à un même évènement géologique, défini dans le Référentiel des événements géologiques..... 44
- Figure 23 : Illustration schématique de l'application du concept d'évènement géologique pour la lithostratigraphie et la stratigraphie séquentielle. A) Carte géologique (lithostratigraphique) schématique, avec coupe transversale (X/Y/Z) et diagraphe schématique des points X et Z, avec trois formations principales (Fm A, Fm C, Fm B) et leurs membres respectifs. Les limites lithostratigraphiques sont représentées par des limites de faciès correspondant à un certain environnement de dépôt le long d'un transect comme illustré en C). B) la même carte et la section transversale de A) sont analysées et interprétées en terme de séquence de dépôt pour représenter les différentes surfaces clés (MFS/ES ou SB) et les traces du système régressif et transgressif. Ces éléments géologiques sont caractéristiques des séquences de dépôt liées au dépôt des différentes formations représentées en A). Ces deux types d'évènements géologiques (dépôt des formations et séquences génétiques qui leur sont liées) sont enregistrés dans le Référentiel d'évènements en D, permettant de proposer une séquence complète d'évènements associés à différents processus (tectonique, dépôt, etc.), pour dessiner l'histoire géologique de la phase 1 de syn-divergence..... 46
- Figure 24 : Le référentiel des domaines géologiques inclut les domaines structuraux hiérarchisés en unités tectonostratigraphiques permettant d'établir un schéma structural des massifs étudiés. Ce référentiel contient également les domaines paléogéographiques et leur sous catégories qui permettent une reconstruction paléogéographique comme par exemple, dans une période donnée, situer la paléo-bordure d'un bassin et son dépôt-centre. 47

Figure 25 : Vue générale sur les différentes bases de données et référentiels du RGF (partie gauche de la figure), et les exemples de documents géologiques associés (partie droite de la figure). 51

Liste des annexes

Annexe 1 Brève histoire de la carte géologique : héritage et évolutions.	55
Annexe 2 Cartes lithostratigraphiques hiérarchisées des Pyrénées	57
Annexe 3 Cartes évènementielles des Pyrénées.....	64
Annexe 4 Calendrier des évènements dans le massif des Pyrénées	75

1. Le programme RGF

1.1 Contexte et motivations

Dans son rôle de Service géologique national, le BRGM est notamment en charge d'acquérir, de gérer et de diffuser la connaissance géologique du territoire. La base de cette connaissance est livrée historiquement sous forme de deux supports principaux que sont les cartes géologiques d'une part (à différentes échelles) et les logs de forages interprétés d'autre part.

Dès la fin du XXème siècle, l'arrivée des nouvelles technologies informatiques ont fortement impacté les modes d'acquisition, de stockage, de représentation et de diffusion des informations géologiques qui étaient jusqu'alors restituées sous forme de documents papier. Les cartes géologiques et les logs de forages ont alors été numérisés (entre 2000- 2005) et ont pu, dès lors, être utilisés, pour les premières, par les logiciels SIG (système d'information géographique), ce qui est aujourd'hui la norme.

Les années 2000 ont également vu le développement de la modélisation géologique 3D dont les outils sont devenus aujourd'hui incontournables dans toutes les simulations numériques traitants des usages du sous-sol (circulation, diffusion, propagation...). Tous les modèles géologiques 3D sont d'abord construits à partir de l'interpolation de points de contacts (entre des formations géologiques) répartis dans l'espace et provenant d'observations directes de terrain, de cartes géologiques et/ou de logs de forages. Ces modèles peuvent également être améliorés par l'apport de données géophysiques complémentaires.

Dès les années 2010, les nombreux retours d'expérience sur la réalisation des modèles géologiques 3D ont montré que les cartes géologiques et les logs de forages n'étaient pas suffisamment adaptés à ces nouvelles technologies. En effet, bien que numérisés, ces documents ne restituaient rien de plus que les informations du format papier initial en l'absence de véritables bases de données et l'ensemble des informations à disposition souffrait d'un manque de cohérence et d'homogénéité. La collecte, la sélection et la mise en cohérence des données pouvaient, à elles seules, représenter plus de la moitié du temps consacré à la réalisation du modèle 3D.

La modélisation 3D, étant elle-même un moyen de mise en cohérence des données, permet de modifier et d'améliorer, en retour, la qualité des cartes et des logs de forages. Ces améliorations se doivent donc d'être sauvegardées, de même que les modèles 3D dont elles sont issues. Se posait la question du stockage des modèles 3D et de la conservation de leurs liens avec les données initiales (réactualisées) dont ils dépendent. Il s'agissait dès lors de concevoir un système d'information géologique capable d'entraîner une chaîne de production de modèles 3D, en tout point du territoire, depuis l'acquisition jusqu'à la diffusion. C'est l'objectif du programme RGF.

Les modèles géologiques ne constituent évidemment pas le seul livrable envisagé et nombre d'utilisateurs professionnels préfèrent travailler directement sur des données « brutes » validées. Cependant, satisfaire aux exigences de la modélisation 3D, étape ultime de la représentation géométrique des corps géologiques, permet *a fortiori* de répondre à tout autre type de demande en termes de diffusion d'information (« qui peut le plus, peut le moins » selon Aristote).

C'est pour répondre à ce défi scientifique et technologique que le Référentiel géologique de la France (RGF) a été conçu et adopté dans la stratégie scientifique du BRGM dès 2012 (BRGM/DS - 2012-071). Le RGF est depuis régulièrement mentionné dans les rapports de l'HCERES.

1.2 Les objectifs du RGF

Le RGF a pour but de livrer une connaissance géologique pour répondre aux besoins de la recherche, de l'enseignement et des domaines des géosciences appliquées qui traitent des usages du sous-sol profond ou superficiel.

L'objectif du RGF est double, il s'agit d'une part 1) de créer un système d'information géologique permettant le stockage, la gestion et la diffusion des données géologiques, et d'autre part 2) d'organiser, de traiter et de valoriser les données géologiques elles-mêmes par leur mise en cohérence et la réalisation de produits innovants (type modèles 3D) et plus adaptés aux besoins socio-économiques et de la recherche.

Le système d'information géologique a vocation à jouer un rôle de mémoire géologique nationale, de transmettre aux futures générations la connaissance scientifique acquise jusqu'à présent et d'être en capacité d'intégrer toute nouvelle information (cartographique, forage, analytiques etc...). Dans le futur, il est prévu que ces informations puissent provenir de sources diverses (universités, bureaux d'études ...) complétant celles produites par le BRGM.

Établir un « référentiel géologique » à l'échelle du territoire national constitue donc, pour le BRGM et pour l'Etat, un véritable investissement d'avenir. En rationalisant notre réservoir d'information géologique sur le sous-sol, nous serons en mesure de capitaliser et de rentabiliser cette connaissance par l'intégration des données nouvelles issues des multiples travaux géologiques. Le BRGM aura alors la capacité de mettre à disposition des acteurs de la société une donnée fiable et pertinente, sur l'ensemble du territoire.

1.3 La méthodologie du RGF

La chaîne de production de connaissance géologique peut être représentée par un flux de plusieurs types de données qui s'associent et se combinent entre elles pour aboutir à de nouveaux produits à différents degrés d'élaboration dont le stade ultime est le modèle 3D. Ce dernier est le plus souvent dédié aux simulations numériques en 4D, appliquées généralement aux processus d'écoulement ou de propagation de matière, d'ondes ou de chaleur.

Modéliser des objets géologiques nécessite au premier ordre d'identifier des objets et d'en connaître leur situation spatiale (en surface et en profondeur), ainsi que leur forme. Les objets géologiques sont identifiés en tant qu'unités lithostratigraphiques (ULS) et déclarés dans un « référentiel lithostratigraphique » qui concerne l'ensemble du territoire français. Chacune de ces unités porte une fiche d'identité (nom, âge de formation) ainsi qu'une description géologique.

Les surfaces de contact originelles entre les ULS ou les contacts anormaux tels que les failles (s.l.) constituent également des objets géologiques déclarés en tant qu'unité structurale (US) dans un référentiel structural dédié. Les deux référentiels, lithostratigraphique et structural, permettent dès lors d'identifier les objets géométriques à modéliser.

La modélisation 3D consiste à interpoler, par différentes méthodes mathématiques, des points de contacts entre les objets géologiques. Ces points d'interface entre les ULS sont généralement issus des cartes géologiques et des forages, mais ils peuvent aussi provenir d'autres documents interprétés tels que des coupes géologiques, des profils sismiques ou autres données géophysiques. Ceci montre l'importance de la mise en cohérence des données car tous les points de contact entre deux ULS, pour être reconnus dans une construction 3D, doivent porter un code unique, quel que soit le support dont ils sont issus. C'est pourquoi la première tâche du RGF consiste à réaliser des référentiels lithostratigraphiques et structuraux qui homogénéisent la nomenclature des unités géologiques à travers le territoire.

Les méthodes d'interpolations géologiques en 3D sont nombreuses et ne cessent d'évoluer, les plus populaires étant les méthodes dites implicites et basées sur des outils géostatistiques. On constate cependant aujourd'hui que la modélisation de systèmes géologiques complexes ne peut

se satisfaire de seuls points de contact répartis dans un espace mais nécessitent aussi des données d'orientation des surfaces de contact. Ces mesures d'orientations structurales figurent sur les cartes géologiques ou au travers de quelques forages orientés mais, pour permettre la lisibilité des documents cartographiques, leur quantité a été réduite au minimum. Elles sont trop peu nombreuses pour contraindre véritablement la géométrie des modèles.

Ceci souligne la nécessité, pour le BRGM, de se doter d'une base de données de mesures structurales, c'est l'une des fonctionnalités de l'outil Geofield (présenté ultérieurement). Ces mesures d'orientation structurale (stratification, contact, failles, filon, plis...) sont acquises sur le terrain, dans des secteurs parfois peu accessibles, et leur capitalisation est un élément essentiel dans la chaîne de production de données géologiques.

Les points de contact entre les ULS et les mesures structurales constituent par conséquent des données fondamentales, nécessaires à l'élaboration d'un modèle géologique 3D. Une fois les volumes numériques constitués, ceux-ci seront alors en mesure d'accueillir tout type d'information portant sur les propriétés physico-chimiques de ces objets modélisés, adaptées aux fonctions et aux usages des simulations numériques.

Toutes ces informations de premier ordre indispensables à la modélisation 3D sont issues de l'observation de terrain et peuvent se classer selon 2 types : i) Ces observations directes (expériences perceptives ou sensibles) par le géologue, dont dérivent les cartes géologiques et la description des forages et ii) les observations instrumentales qui mesurent les propriétés des roches et les restituent sous forme de données numériques. Ce second type de données relevant des mesures géophysiques nécessite néanmoins une interprétation « géologique » des données qui peut avoir, comme l'observation perceptive, un caractère subjectif. Les mesures physiques appliquées à la géologie sont donc également relatives et ne se distinguent pas, sur ce plan, de l'observation directe. Par contre ces valeurs mesurées sont beaucoup plus adaptées aux traitements informatiques que ne le sont les descriptions naturalistes.

1.4 Les chantiers du RGF

A l'échelle nationale, les données géologiques de base du territoire sont accessibles à travers 1070 cartes géologiques à l'échelle du 1/50 000, 800 000 forages déclarés dans la BSS et 6000 forages majoritairement pétroliers (acquis depuis 1929). Ces données, à faible niveau d'interprétation, sont aussi complétées par plus de 360 000 km de lignes sismiques (acquises depuis 1945) ainsi que par d'autres données géophysiques couvrant l'ensemble ou parties du territoire (magnétiques, électro-magnétiques, radiométriques, gravimétriques, etc.).

Compte tenu du volume d'informations considérable, la mise en cohérence de l'ensemble de ces données ne pouvait être réalisée concomitamment sur l'ensemble du territoire. Cette mise en cohérence géologique a été planifiée sur des secteurs géographiques plus réduits : les chantiers régionaux. Il est entendu que cette notion de « chantier » ne correspond pas à un périmètre administratif mais à une entité géologique reconnue comme telle (ex : Vosges, chaîne des Alpes, chaîne des Pyrénées, Bassin parisien...).

Même si une grande part de l'information géologique doit se décliner et répondre à des demandes socio-économiques spécifiques sur des secteurs localisés, la géologie, à l'instar de toute autre science, ne peut être applicable que si elle se nourrit de recherche. Les chantiers RGF constituent ce lieu d'ancrage dans la recherche où s'établit une étroite collaboration scientifique avec le milieu académique sous forme de travaux de thèses ou de masters. Ces derniers sont initiés au travers d'appels à manifestation d'intérêts auprès de la communauté des géosciences. Ainsi, avec le RGF, le BRGM a pu renforcer sa collaboration historique avec les chercheurs universitaires et du CNRS, construite et entretenue dans le cadre du programme de lever de la carte géologique de la France à 1/50 000 (1968 – 2012).

Après la réalisation, en 2012-2013, d'un démonstrateur sur la région Vosges-Fossé rhénan qui a permis de mettre au point les différentes étapes et les différents outils et méthodes à utiliser lors d'un chantier RGF (Gabalda et al., 2013, Rapport BRGM RP-63008-FR), le conseil scientifique du RGF a choisi la chaîne des Pyrénées et ses avant-pays comme premier grand chantier du programme.

Ce chantier scientifique a été une opportunité pour (i) mettre en cohérence les données régionales (cartographiques, forages ou autres données géophysiques), (ii) acquérir de nouvelles données multi-sources et (iii) proposer une reconstruction temporelle haute résolution de l'évolution du domaine pyrénéen au cours des 600 derniers millions d'années (Ma). C'est autour de ces questions majeures que s'est fédérée la communauté scientifique rassemblant, autour d'un même objet géologique (Les Pyrénées), l'ensemble des disciplines des Sciences de la Terre. Cette synergie a permis d'intégrer des projets tels que les ANR Pyramid et Pyrope et de bénéficier de l'engagement d'une vingtaine de laboratoires de recherche. À travers ce chantier, de très nombreuses thématiques géoscientifiques ont été abordées et ont interagi les unes avec les autres.

La chaîne pyrénéenne, issue de deux orogénèses, l'une varisque, l'autre alpine, constitue l'objet stratigraphiquement le plus complet de la géologie française, depuis l'Ediacarien (fin de Protérozoïque) jusqu'au Quaternaire.

L'annexe 1 présente une brève histoire de la carte géologique, qui permet de comprendre son héritage et son évolution, depuis les premières cartes géologiques jusqu'au RGF ainsi que le concept de cartographie des évènements géologiques.

2. L'approche RGF dans le chantier Pyrénées

2.1 *Un objectif : la mise en cohérence des données géologiques*

L'objectif principal du RGF est de mettre en cohérence l'ensemble des données géologiques. Dans le RGF Pyrénées, cette mise en cohérence passe par la constitution de 3 grands Référentiels. Un référentiel lithostratigraphique afin d'y rattacher l'ensemble des caissons des cartes géologiques (1/50 000) et l'ensemble des tronçons de forages (BSS/LOGISO) ; un référentiel structural pour y rattacher les structures majeures (contacts anormaux) figurant sur les cartes géologiques ou recoupées en forage ; et un référentiel évènementiel permettant de faire le lien entre les référentiels (lithostratigraphique, structural et domaine (ce dernier encore non développé sur les Pyrénées)), et les données ponctuelles (diagnostics mesures et analyses). Ce processus de mise en cohérence, initié et développé dans le chantier Pyrénées, sera présenté en détail dans ce chapitre.

2.2 *Etat des lieux*

L'emprise du chantier RGF-Pyrénées correspond à 59 cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 dont deux n'étaient pas encore validées par le CCGF et une carte était en cours de maquettage (Ax-les-Thermes) au début du projet en 2014 (Figure 1). 26 cartes ont été publiées entre 1963 et 1980, 23 cartes de 1980 à 2000 et 7 entre 2000 et 2019. Cet échelonnement de l'édition des cartes sur une longue période a induit des incohérences entre les différentes coupures portant sur :

- les âges des roches : datations imprécises du fait de technologies devenues obsolètes,

- l'identification d'unités géologiques, avec des degrés de détails de représentation qui varient d'une carte à l'autre, contiguës ou non : ainsi, par exemple, il est possible que les terrains correspondant au Dévonien inférieur ne soient représentés que par une seule unité indifférenciée sur une carte et par plusieurs unités sur une autre.
- une incohérence géométrique où le passage d'un contour d'une unité géologique d'une carte à l'autre est discontinu et montre alors un décalage plus ou moins important, qu'il s'agisse de ligne de contact entre unités ou de failles ;
- un changement de nom ou de notation pour une même formation ou structure, etc. qui passe d'une carte à l'autre,
- des levés incomplets, où des formations superficielles ne sont pas cartographiées par exemple.

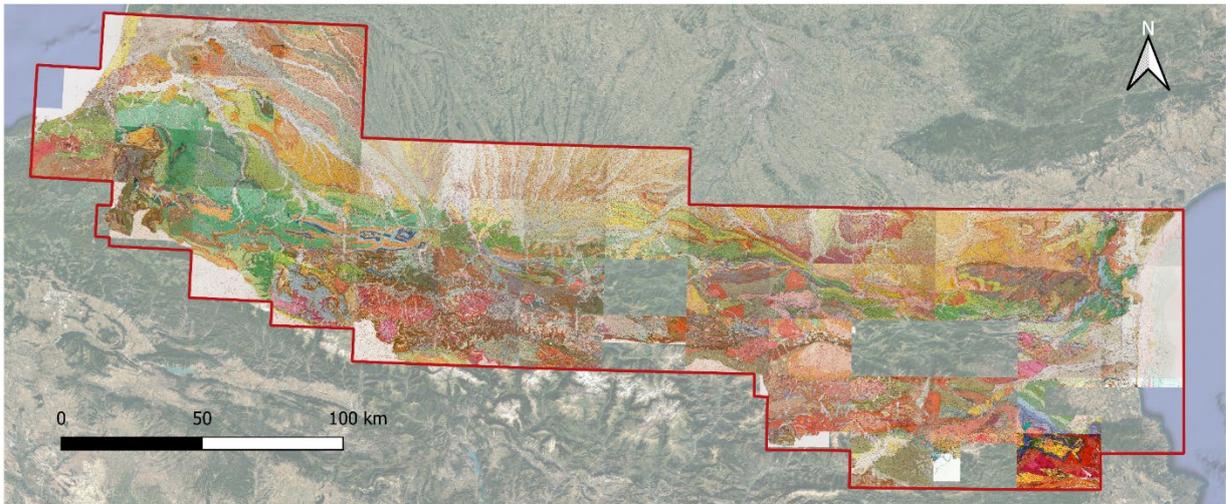


Figure 1 : Emprise du chantier RGF Pyrénées : 59 coupures à 1/50 000 dont 2 feuilles encore non validées par le CCGF (St Paul de Fenouillet, et Aspet) et une carte manquante (Ax-Les-Thermes). Cette dernière coupure a été réalisé au cours du chantier et la maquette a été présentée en 2019 lors du colloque final de restitution du chantier RGF.

2.3 Le référentiel lithostratigraphique hiérarchisé

2.3.1 Les principes de réalisation du référentiel lithostratigraphique

Le référentiel lithostratigraphique est un lexique qui a pour but d'identifier par un nom et un code unique les unités lithostratigraphiques qui composent le territoire français. Ces unités peuvent se rencontrer aussi bien sur les cartes géologiques que dans les logs de forages.

L'unité lithostratigraphique est ici utilisée au sens strict comme établi par la Commission internationale de Stratigraphie (ICS - <https://stratigraphy.org/guide/litho>) et correspond à tout « ensemble de roches qui est défini et reconnu sur la base de ses propriétés lithologiques ou d'une combinaison de propriétés lithologiques et de relations stratigraphiques ». **Une unité lithostratigraphique peut être constituée de roches sédimentaires, ignées ou métamorphiques. Les unités lithostratigraphiques sont définies et reconnues par des caractéristiques physiques observables et non par leur âge présumé, la période qu'elles représentent, l'histoire géologique présumée ou le mode de formation.** L'étendue géographique d'une unité lithostratigraphique est entièrement contrôlée par la continuité et l'étendue de ses caractéristiques lithologiques diagnostiques » (Salvador et al., 1994).

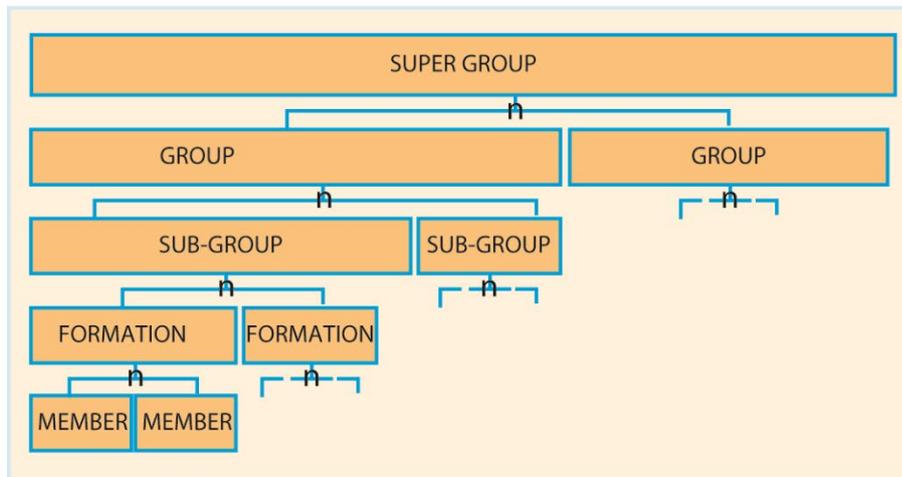
Ces unités lithostratigraphiques apparaissent dans la légende de chaque carte géologique sous la forme de caissons (rectangle de couleur qui porte la notation, le nom, l'âge de la formation géologique représentée).

Le référentiel lithostratigraphique possède d'autre part une structure hiérarchisée qui permet le regroupement des unités décrites sur la carte ou en forage. Suivant les normes de la Commission internationale de stratigraphie, dont nous reprenons ici les définitions, la hiérarchie utilisée est la suivante :

- *Supergroupe* : Ensemble de Groupes.
- *Groupe* : Ensemble de Sous-Groupes.
- *Sous-groupe* : Ensemble de Formations. Il faut noter ici que la notion de Sous-groupe n'est pas toujours indispensable. Le Sous-groupe est un groupe qui a une localisation géographique particulière (ex : petit bassin) permettant et justifiant sa distinction. Lorsque la distinction n'est pas nécessaire, le Sous-Groupe porte alors le nom du Groupe (pour des besoins informatiques).
- *Formation* : elle correspond au caisson de carte géologique. C'est l'unité primaire de la classification lithostratigraphique. Les formations sont les seules unités lithostratigraphiques formelles dans lesquelles la colonne stratigraphique devrait partout être complètement divisée sur la base de la lithologie. Le contraste de lithologie entre les formations requis pour justifier leur établissement varie avec la complexité de la géologie d'une région et les détails nécessaires à la cartographie géologique pour l'élaboration de son histoire géologique. L'épaisseur des formations peut aller de moins d'un mètre à plusieurs milliers de mètres.
- *Membre* : inclus dans un caisson (formation) de la carte géologique. Il possède des propriétés lithologiques qui le distinguent du reste de la formation qui le contient. Aucune norme fixe n'est requise pour l'étendue et l'épaisseur d'un membre. Une formation n'a pas besoin d'être systématiquement divisée en membres. Certaines formations peuvent être complètement divisées en membres ; d'autres peuvent n'avoir que certaines parties désignées comme membres. Les formes géométriques des membres (ou de formations) peuvent être continues, en lentilles ou en languettes (partie saillante d'une unité lithostratigraphique qui s'étend au-delà de son corps principal).

Chaque unité lithostratigraphique est définie par un nom, un type (membre, formation, sous-groupe, groupe et supergroupe), un âge de début et de fin, une description, une ou plusieurs lithologies, une puissance, des références, et une « symbologie » (couleur sur la carte) (Figure 2). Pour ce qui concerne ces attributs, le vocabulaire utilisé a été formalisé au sein des registres BRGM (<https://infoterre.brgm.fr/page/registres-geologiques-brgm>).

LITHOSTRATIGRAPHIC REFERENCE SYSTEM



UNIT ATTRIBUTES

Lithostrat. Unit
Id
Name
Rank
Age<
Age>
Description
Lithologies
Thickness
References
Symbology

Figure 2. Architecture du référentiel lithostratigraphique. A gauche, l'arborescence du référentiel, avec 5 niveaux de hiérarchie et à droite les attributs principaux d'une unité lithostratigraphique.

Il faut noter que l'âge des unités lithostratigraphiques des Pyrénées fait appel à un référentiel chronostratigraphique, adapté à la géologie française, qui a été établi dans le cadre du démonstrateur RGF Vosges-Rhin (Gabalda et al., 2013) et qui fait aujourd'hui partie intégrante du système d'information géologique du BRGM. Ce référentiel chronostratigraphique se base sur les chartes existantes (BRGM/USGS) et intègre une nouvelle charte chronostratigraphique pour le Quaternaire réalisé par le BRGM (Tissoux et al., 2020).

2.3.2 Identification des unités lithostratigraphiques

Si les règles de hiérarchisation lithostratigraphique sont simples *a priori*, la réalisation du référentiel *a posteriori* rencontre quelques difficultés du fait que la distinction des unités reste à l'appréciation des auteurs de chaque carte. Ainsi une formation notée F1 sur une carte (ou forage) peut sur une autre carte être représentée par 3 formations notées F2, F3 et F4. Afin de respecter le principe de conservation des données du RGF, nous serons dans l'obligation de déclarer 4 formations dans le référentiel lithostratigraphique : la formation F1 (non différenciée) ainsi que les Formations F2, F3 et F4. Et plus encore si d'autres combinaisons se présentent tels que par exemple F3 et F4 regroupés en F5 sur une autre carte (forage). Il faut noter que les formations indifférenciées n'ont pas valeur de Sous-groupe ou de Groupe. Les différents niveaux d'identification des formations entre les cartes géologiques conduisent donc à une multiplication des formations déclarées dans le Référentiel, qu'il est cependant nécessaire de maintenir dans une vision de modélisation 3D. De même, si l'on veut rechercher, sur carte ou en forage, la formation F3, il faudra aussi afficher la formation F1 qui contient F3 sans toutefois préciser son emplacement.

En résumé, le référentiel lithostratigraphique ne contient pas uniquement des formations irréductibles (indivisibles), mais aussi de nombreuses autres formations, dites indifférenciées, qui regroupent tout ou partie des précédentes. Ces relations d'équivalence complexes (ontologiques) ont été prises en compte dans la conception de l'outil de gestion du référentiel lithostratigraphique (GRL) (Figure 3).

L'application de gestion des référentiels lithostratigraphiques (GRL) a aujourd'hui permis de remplacer une ancienne base (base Access) utilisée pour le chantier RGF Pyrénées. L'ensemble du travail a donc été basculé lors de la mise en service de cette application en 2020-2021. Même si cette application peut encore évoluer avec l'amélioration de certaines fonctionnalités, celle-ci

est maintenant totalement opérationnelle pour la saisie des ULS développés au sein des nouveaux chantier RGF. Sa connexion directe avec les géométries (cartes, forages, etc.) est aussi opérationnelle (2022) avec l'utilisation d'un plug-in développé dans QGIS (logiciel SIG en open source).

Lithologie	Qualifiants	Minéraux	Fossiles	Dominante
Calcaire	Gréseux			<input type="checkbox"/>
Marne	Silteux, Micacé, Noir, Grisé			<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 3. Extrait de GRL. Exemple de la formation des marnes de Sainte-Suzanne. Cet extrait nous permet de visualiser les différents champs qui permettent de définir une ULS (ID, Age, Type, Description etc.).

2.3.3 Le référentiel lithostratigraphique des Pyrénées

Identification des formations et membres de la carte RGF Pyrénées

Le chantier Pyrénées contenait, après assemblage des 58 cartes géologiques, 4323 unités lithostratigraphiques, provenant de l'addition de l'ensemble des caissons.

La réalisation du référentiel lithostratigraphique a consisté à regrouper les unités considérées comme identiques entre les cartes sous une même dénomination et à l'inverse, de distinguer lorsque nécessaire des unités qui étaient cartographiées comme identiques.

Au final, 1942 formations (dont 1471 représentées sur la carte géologique RGF des Pyrénées) et 760 membres (dont 607 figurent sur la carte géologique RGF des Pyrénées) ont été déclarées dans le référentiel lithostratigraphique de la France pour représenter l'ensemble des terrains compris dans l'emprise du chantier RGF Pyrénées.

Le nombre total de formations figurant sur l'ensemble des cartes géologiques à 1/50 000 agglomérées a donc été divisé par 3 sur la carte finale du RGF. Ce chiffre qui paraît encore très élevé est du fait de :

- la conservation de toutes les unités indifférenciées qui figurent sur les cartes géologiques.
- la différenciation de chaque corps magmatique (pluton) qui a eu pour effet de limiter la diminution du nombre des formations (§ suivant).

Création de nouvelles unités lithostratigraphiques

Créer de nouvelles unités lithostratigraphique paraît à première vue contre intuitif compte tenu de la démarche du RGF qui consiste plutôt à fusionner des formations identiques en une seule unité lithostratigraphique et donc à réduire le nombre d'unités. Néanmoins, une exception existe pour les roches magmatiques qui ont souvent été cartographiées en un objet unique en fonction de leur faciès. Par exemple un monzogranite peut être noté γ^{3CA} quelle que soit sa localisation, c'est-à-dire indistinctement du corps plutonique auquel il appartient. Or, chaque pluton a sa propre histoire, et il est important de pouvoir le distinguer en tant que tel. Ainsi il est nécessaire de déclarer une formation *Monzogranite du Pluton de Quérigut*, par exemple, et une formation *Monzogranite du pluton de Millas* et de la même façon pour chacun des plutons de la zone du chantier RGF. Cette opération ne peut se réaliser que sur un support cartographique puisqu'il faut alors directement sélectionner les polygones de la carte qui seront attribués à la nouvelle formation. Les différents faciès qui composent un pluton sont ici considérés comme des membres de cette formation conformément aux normes définies plus haut.

Hiérarchisation des unités lithostratigraphiques

La hiérarchisation des unités lithostratigraphiques a été réalisée au fur et à mesure de la déclaration des formations géologiques. Cette hiérarchisation se calque sur la reconnaissance des grands cycles géodynamiques qui justifient les regroupements des unités lithostratigraphiques élémentaires (formations et membres) dans un même contexte de genèse. Par exemple, on peut regrouper toutes les intrusions granitiques qui se sont produites à la fin de l'orogénèse hercynienne. Ces cycles emboîtés se précisent d'années en années, grâce à l'acquisition de données qui s'affinent avec l'amélioration continue des méthodes d'analyses, comme les données biostratigraphiques, géochronologiques et géochimiques. De cette évolution technologique découlent parfois des différences d'interprétation d'une carte à l'autre. Le travail réalisé lors du chantier RGF-Pyrénées a donc consisté en premier lieu à apporter de la cohérence et à réorganiser les briques lithostratigraphiques des différentes cartes afin d'harmoniser ces modèles. Par exemple, les cycles Panafricain et Varisque ont bénéficié de nouvelles données (analyses stratigraphiques et datations) acquises lors de la thèse de Maxime Padel, réalisée dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées. D'autres regroupements d'unités lithostratigraphiques ont profité des retombées des travaux les plus récents, comme l'ANR Pyramid ou le programme CONVERGENCE (BRGM, CNRS, TOTAL), pour redéfinir par exemple la phase d'ouverture des bassins créacés nord-pyrénéens ou leur inversion lors des phases de convergence puis de collision. Les formations concernées sont alors affectées à l'un ou à l'autre de ces groupes (dépôts en ouverture de bassins, ou en fermeture). On touche déjà là à une approche par événements géologiques qui s'enregistrent au travers de la genèse des roches, qu'elles soient de natures magmatique ou sédimentaire.

À l'issue du travail, le référentiel lithostratigraphique des Pyrénées constitue aujourd'hui un ensemble hiérarchisé qui se compose de : 304 Sous-groupes (regroupant les 1942 formations), 78 Groupes et 15 Supergroupes.

2.3.4 La carte géologique RGF des Pyrénées

Corrections des cartes 1/50 000 vectorisées

Lors de la vectorisation des cartes géologiques à 1/50 000 (initialement sous format papier), seuls les contours géologiques, les structures majeures et quelques données ponctuelles (mesures structurales, datations, indices miniers...) ont été vectorisés. Il n'y a eu aucune conservation des données « brutes », qu'elles soient cartographiques (minutes de terrain, dessins, ...) ou ponctuelles (points d'observations ou d'échantillonnage, fichiers de mesures, photographies, ...).

Cette vectorisation, semi-automatique pour l'essentiel, et réalisée dans le cadre du projet d'harmonisation départementale des cartes géologiques, a engendré certaines erreurs par rapport aux cartes initiales en termes de géoréférencement, codage et vectorisation. Une des premières tâches du chantier RGF-Pyrénées a donc été de corriger ces erreurs cartographiques dans chacune des 58 coupures à 1/50 000 (une manquante) pour obtenir un assemblage servant de base à la réalisation de la carte géologique RGF des Pyrénées (Figure 4).

Ces corrections numériques ont également été complétées par de nouvelles digitalisations de contours qui n'avaient pas été pris en compte lors de la numérisation des cartes géologiques. Il s'agit notamment des contours de polygones, apparaissant sous forme de surcharges (hachures ou pointillés), qui servaient à distinguer différents faciès métamorphiques ou d'altération sur les cartes papier.

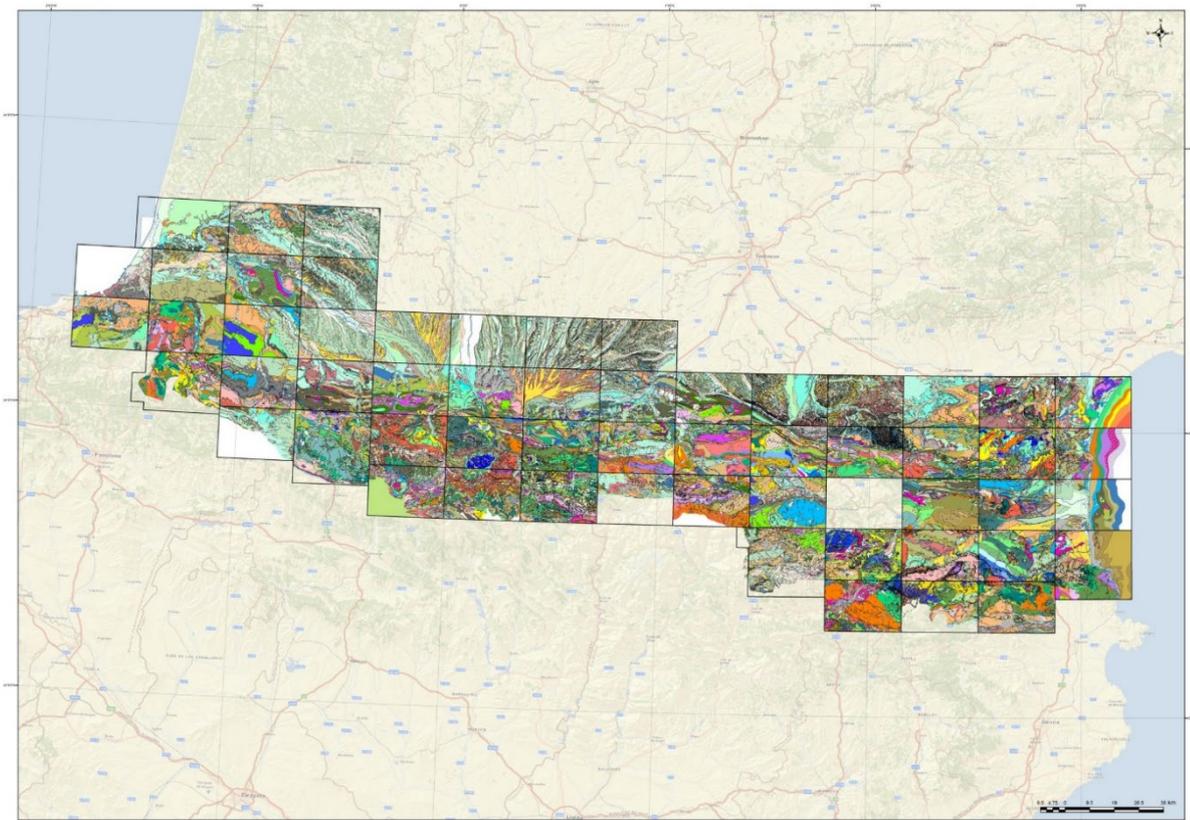


Figure 4. Cartes 1/50 000 du chantier RGF Pyrénées : 58 coupures à 1/50 000 vectorisées et une manquante en 2014, la feuille d'Ax-Les-Thermes. Cette dernière coupure a été réalisé au cours du chantier et la maquette a été présentée en 2019 lors du colloque final de restitution du chantier RGF.

Des cartes géologiques à 1/50 000 vers la carte géologique RGF-Pyrénées

Dans le cadre du chantier Pyrénées, tout ce travail d'harmonisation lithostratigraphique a été réalisé « en aveugle », sans visualisation dynamique sur la carte géologique des ULS déclarées ni des regroupements ces différentes unités. Faute d'outil disponible à l'époque, la restitution cartographique des ULS a nécessité l'intervention d'un géomaticien qui devait lier la géométrie (polygones) à chaque formation ou membre définis dans le référentiel lithostratigraphique.

La carte géologique RGF Pyrénées qui a résulté de ces différentes mises à jour est un document unique où les limites des cartes initiales (à 1/50 000) n'apparaissent plus ce qui permet une lecture continue des formations à travers la zone d'emprise du chantier. Cette dernière affirmation doit cependant être nuancée car certaines incohérences en limites des coupures ont

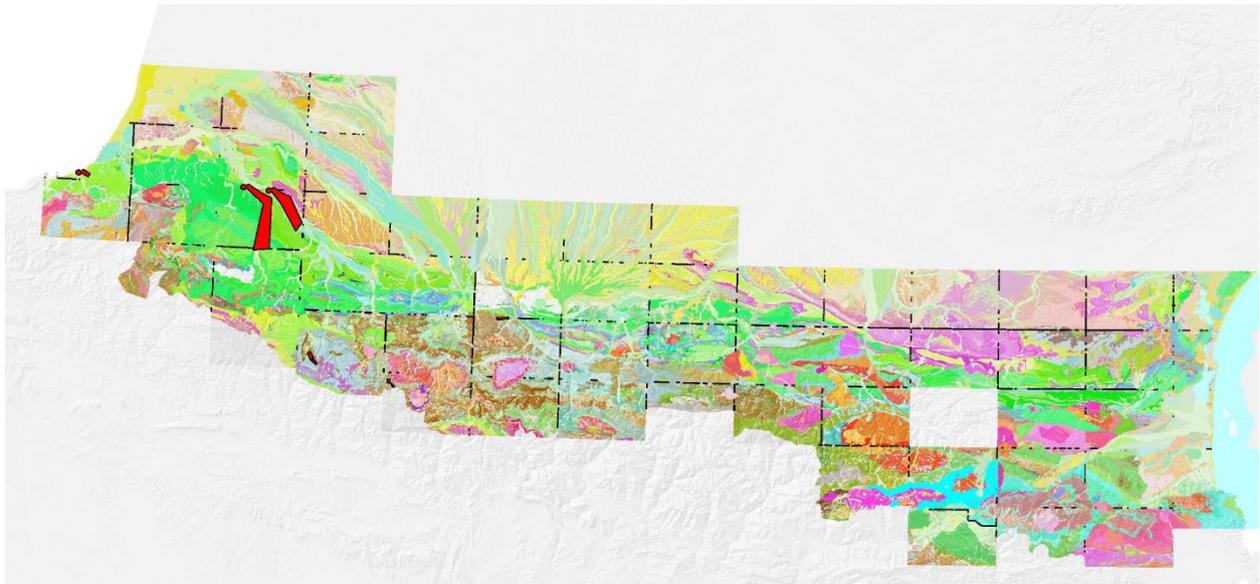
volontairement été maintenues, puisque non modifiables *a priori* sans acquisition de terrain et/ou d'analyses supplémentaires (c.f. § suivant).

Les corrections géométriques de la carte géologique RGF

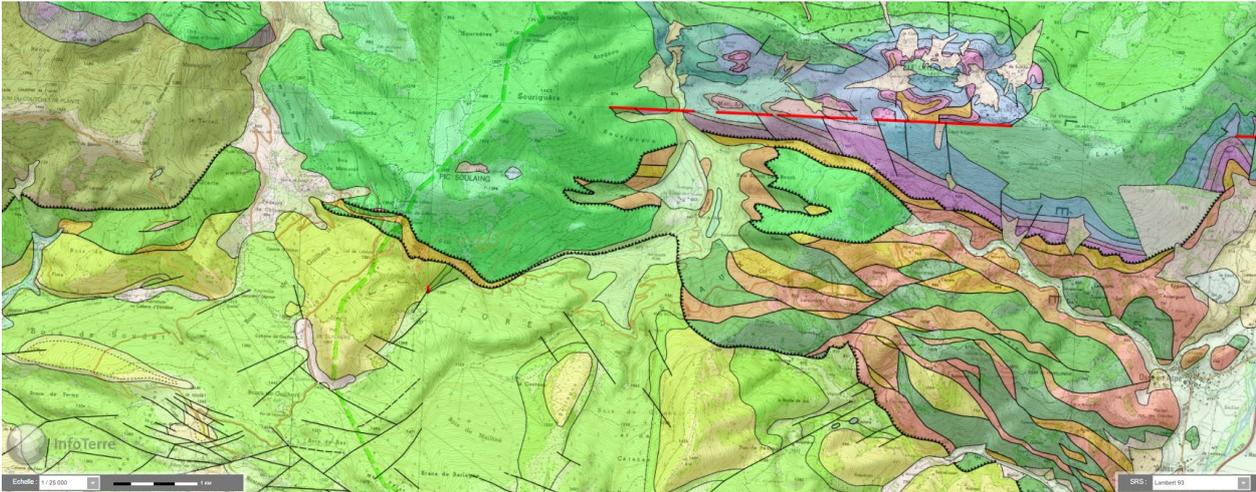
Assurer la continuité géométrique d'une formation d'une carte à l'autre nécessite une correction des contours. Dans de nombreux cas le décalage entre les cartes est négligeable et la correction, il s'agit plutôt d'un ajustement, est effectuée à l'aide d'images satellitaires, de MNT, de Google Earth (Street View) ou encore sur la base d'informations provenant de divers documents scientifiques.

Cependant, il existe aussi des incohérences majeures qui ne peuvent être levées sans un retour sur le terrain. Il peut s'agir de formations différentes qui se retrouvent face à face en limite de carte ou encore de formations détaillées sur une carte qui passent à une formation indifférenciée sur l'autre. Dans ce dernier cas, le principe du RGFest de conserver les données sources, même si celles-ci sont discordantes (Figure 5). Ces discordances peuvent signaler des structures ou accidents géologiques passés inaperçus et il est donc indispensable que tout utilisateur de la carte (surtout s'il veut réaliser un modèle 3D) dispose de l'état réel de la connaissance géologique du secteur sur lequel il intervient.

La nature de ces problèmes cartographiques non résolus a été identifiée comme un attribut à part entière de la base de données cartographique, et servira de guide pour une future mise à jour de cette dernière. Bien que l'ambition d'un chantier RGF soit d'éliminer au mieux les lacunes avérées de la carte géologique, ces interventions n'ont guère été possibles dans les Pyrénées, à l'exception de certaines interventions ciblées sur les formations superficielles.



a)



b)

Figure 5. a) carte RGF Pyrénées avec identification des problèmes non résolus faute de nouvelles acquisitions (traits de couleur noir). b) Extrait d'un croisement entre 4 cartes 50 000 (1050-1051 au nord et 1068-1069 au sud), les lignes rouges montrent les zones non harmonisables en l'état.

Les greffes cartographiques

- Dans le futur, la mise à jour de la carte géologique RGF, s'effectuera par le remplacement d'une surface cartographiée par une nouvelle. Il ne s'agit plus là d'une correction mais d'une véritable « greffe » cartographique. Ce fut le cas dans le chantier RGF Pyrénées où des nouveaux tracés ont été intégrés sur la carte géologique en remplacement des anciens contours. Ces nouveaux levés concernent principalement :
 - les formations sédimentaires mésozoïques du Pays basque (contours issus des travaux de Philippe Razin (Univ. Bordeaux) et collaborateurs),
 - des terrains quaternaires dans les Pyrénées centrales (contours et datations issus des travaux de Magali Delmas (Univ. Perpignan) et collaborateurs),
 - les apports des travaux de masters RGF et des géologues du BRGM sur les formations superficielles, essentiellement aux bordures des cartes originelles,
 - les terrains paléozoïques de certains massifs Pyrénéens (thèse RGF-Pyrénées de Bryan Cochelin sur le Varisque),
 - la carte géologique à 1/50 000 d'Ax-les-Thermes (Baudin et al., 2020).

Une carte harmonisée (RGF) multi-échelle

Le lien établi entre la carte (1/ 50 000) et le référentiel lithostratigraphique hiérarchisé, via l'attribution d'une ULS aux polygones, permet dorénavant de générer des cartes géologiques synthétiques contenant des informations à différents niveaux de regroupement, depuis des regroupements très généraux (cartes des supergroupes) jusqu'à des cartes détaillées (cartes des formations-membres). Ces différents niveaux hiérarchiques constituent une première étape vers les changements d'échelles. La carte des supergroupes correspond plutôt à une carte au 1/10 000 000^{ème} (Fig. 6) ; les groupes au 1/500 000^{ème} (Fig. 7) ; les sous-goupes au 1/250 000^{ème} (Fig. 8) ; les formation et membres au 1/50 000^{ème} (Fig. 9) qui est l'échelle des cartes originelles. L'ensemble de ces restitutions se fait avec la précision des contours des cartes géologiques à 1/50 000 quelle que soit leur échelle.

Dans le futur, la carte géologique RGF de France (1/50000) constituera donc le seul référentiel qui sera mis à jour et qui pourra se décliner dans des échelles différentes. Le « 250 000 » et le

« million » ne seront plus des documents indépendants mais seront des produits dérivés de cette carte harmonisée à 1/50 000.

Il subsiste néanmoins un verrou important à débloquent. Il concerne le lissage des contours des formations de la carte géologique. Ces derniers correspondent, par définition, à l'intersection des plans de contact entre les formations avec une topographie. La forme des contours géologiques dépend donc de la topographie utilisée pour dessiner la carte. Par exemple, il n'y aura pas lieu de dessiner un "V" topographique sur la carte si un talweg n'est pas représenté sur la topographie. D'un point de vue numérique, le lissage des contours géologiques doit se caler sur la forme des courbes topographiques ou du MNT. A notre connaissance de tels algorithmes de lissage automatique des contours géologiques en fonction du changement d'échelle des fonds topographiques (ou MNT) ne sont pas encore disponibles.

Cette question est importante car, dans le cadre d'une modélisation 3D, l'utilisation d'un MNT incompatible avec les contours géologiques peut amener à des modèles géométriques erronés. C'est le cas, en particulier, lorsque les contacts géologiques sont subparallèles à la surface topographique.

Les attributs de la carte géologique harmonisée (RGF)

Les informations concernant la description des unités lithostratigraphiques (descriptions des notices, analyses, lithologie, etc.) sont contenues pour l'instant sous forme de texte brut dans les champs ouverts du référentiel lithostratigraphique. Comme un lien informatique est établi entre le référentiel et les éléments géométriques de la carte, cette dernière peut être interrogée classiquement au moyen d'un logiciel SIG. Ces informations peuvent donc être accessibles dans les bases de données ou visualisées directement sur la carte RGF.

À NOTER : Les cartes suivantes (Figures 6, 7, 8, 9) sont présentées également en plus grande taille, en annexes de ce rapport. Sur ces figures, il a été décidé, pour des raisons de lisibilité, de ne pas afficher les contours géologiques (failles, limites géologiques, etc.) ni les légendes. Ces cartes simplifiées ont uniquement pour but d'illustrer le rendu des produits.

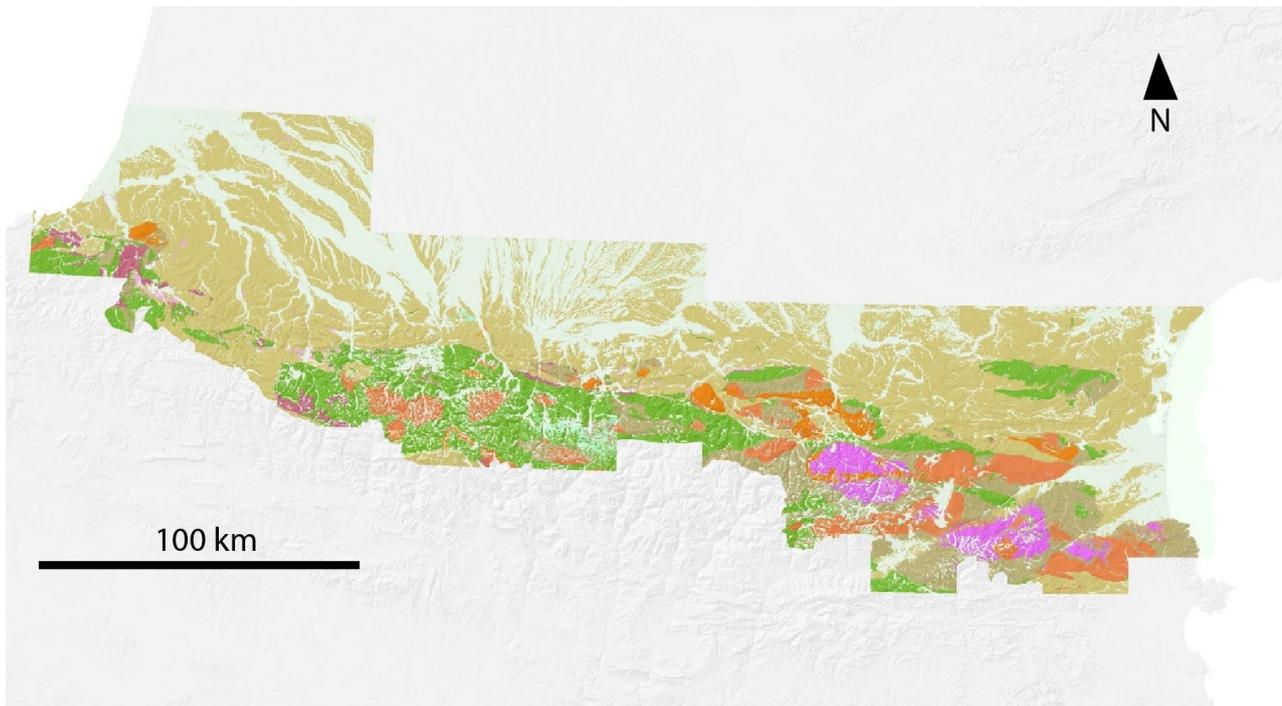


Figure 6 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "supergroupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées

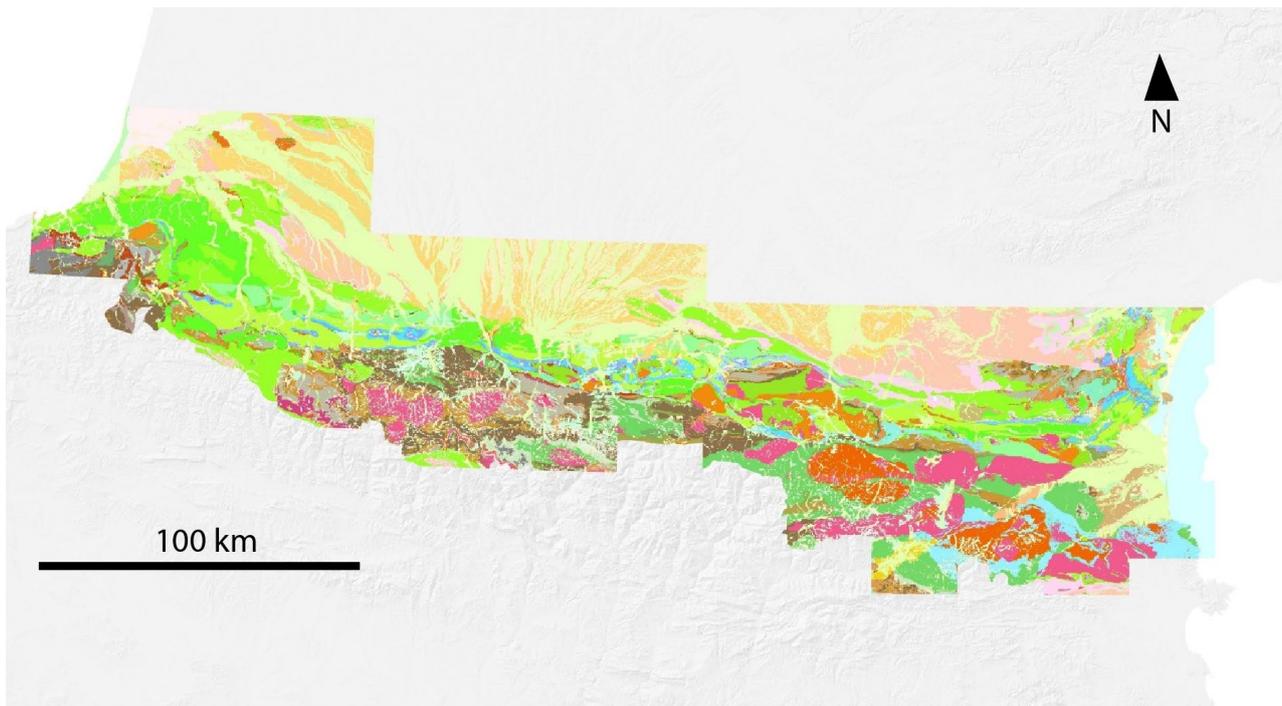


Figure 7 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "groupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées

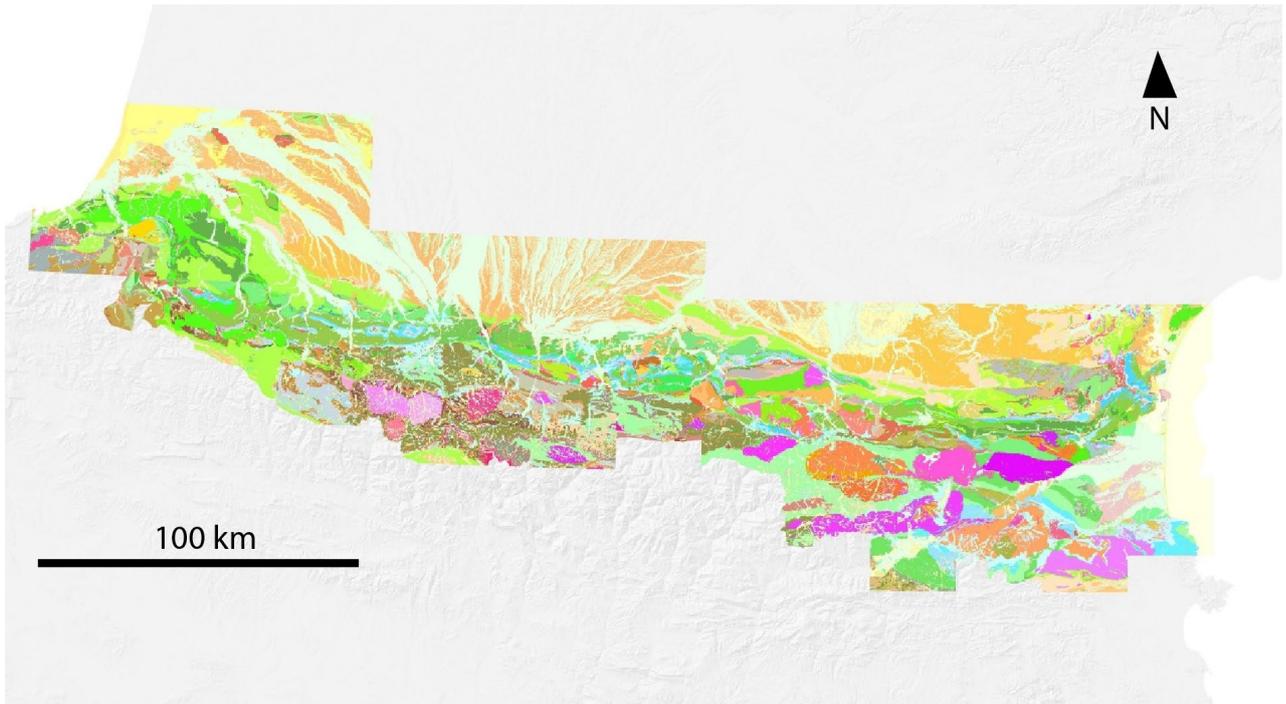


Figure 8 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "sous-groupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées

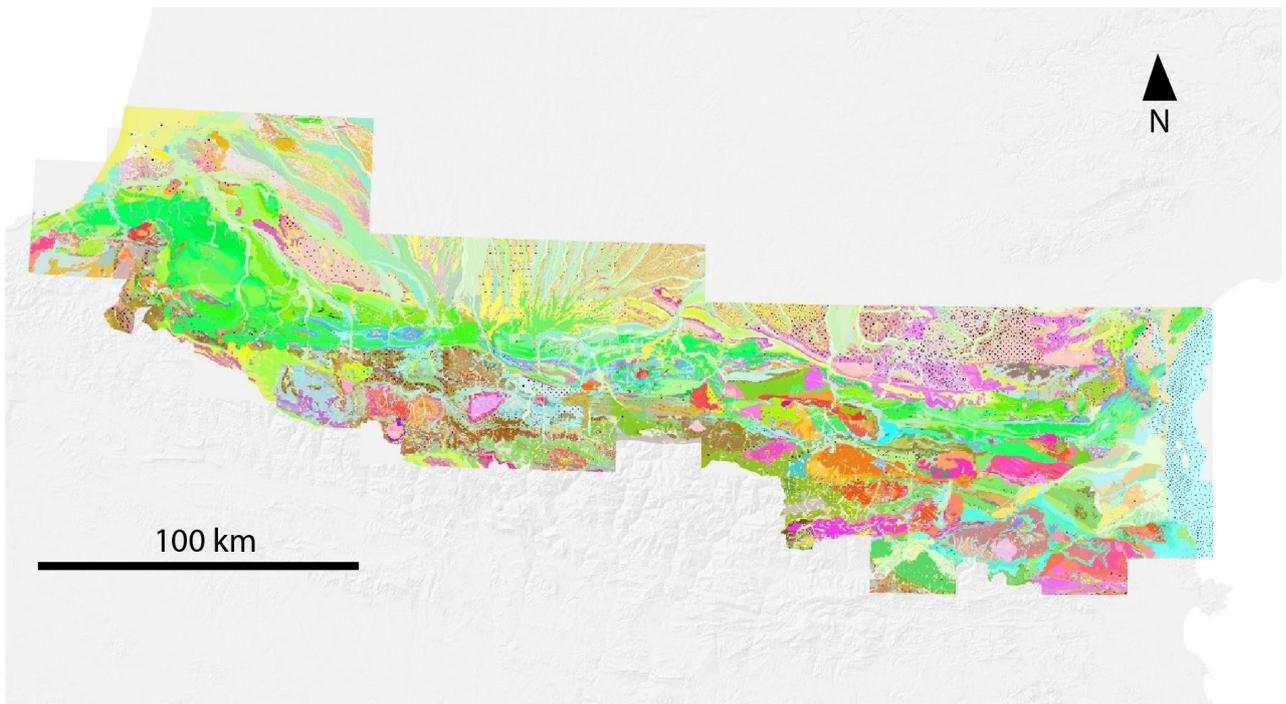


Figure 9 : Carte simplifiée des unités lithostratigraphiques de type "formations / membres" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées

La hiérarchisation de la carte géologique est illustrée sur la figure suivante (Figure 10) qui présente un extrait (sur l'ancienne coupure à 1/50 000 de Bagnère de Luchon) de la carte lithostratigraphique déclinée selon les 4 rangs hiérarchiques (Supergroupe/Groupe/Sous-Groupe/Formation/Membre) ainsi qu'un extrait de l'arbre hiérarchique du référentiel lithostratigraphique des Pyrénées.

2.4 Le Référentiel structural

Un Référentiel structural a également été créé pour la chaîne pyrénéenne à l'instar du référentiel lithostratigraphique. Ce référentiel a vocation à inventorier les principales surfaces de discontinuités tectoniques, les différents types de failles, qui découpent les objets géologiques (ULS). La structure de ce référentiel a été développée en s'inspirant d'autres initiatives européennes similaires (Hintersberger et al., 2017, Mantovani et al., 2020). Ce référentiel structural comprend également la hiérarchisation des différentes unités structurales (US). Chaque entité structurale est définie par : (i) des attributs principaux tels que : un Id numérique, un nom, un rang, un parent, (ii) des attributs de description de la structure : type de structure, orientation principale, pendage moyen, cinématique, direction de mouvement, type de déformation, âge principal de mouvement, âge absolu de mouvement, description synthétique, description détaillée et références (Figure 11), et par (iii) un lien avec des événements principaux permettant de donner des informations sur l'histoire géologique de la structure.

ATTRIBUTES	Description	Options
S_ID	Numéro unique de la structure	ID
S_Name	Nom unique de la structure	Texte
S_Rang	Rang hiérarchique de la structure	Large Scale Fault system; Fault System; Subfault System; Fault Set; Limite de Nappe
S_Parent	Parent hiérarchique de la structure	
Description		
TYPE_STR	Type de structure	Ex: Faille, Chevauchement, détachement, etc. Registre TYPE_STRUCTURE)
S_OR	Orientation de la structure	N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW.
S_DIP	Pendage de la structure	Vertical (90°–85°), steep (85°–60°), modest (60°–30°), low-angle (30°–5°), horizontal (5°–0°)
CIN-STR	Mouvement relatif des blocs entre eux, de part et d'autre de la structure	Ex: inverse, chevauchant, inverse dextre, etc. (Registre CINEMATIQUE_STRUCTURE)
CIN_DIR	Direction de mouvement du bloc supérieur	Top-to-N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW
CIN_DIR	Direction de mouvement du bloc supérieur	Nombre (0-360°)
DEF_TYPE	Type de déformation	Fragile, Ductile, Fragile-Ductile
AGE_STR	Age de la déformation principale	Chronostratigraphie (Ref Chronostratigraphique)
AGE_ABS	Age de la déformation principale, en âge absolu	Nombre
DESCR_SYNT H	Description synthétique de la structure	Texte
DESCR	Description détaillée de la structure	Texte
REF	Références bibliographiques (cartes, articles etc.)	Texte
Histoire Géologique		
EVT_ID	Le ou les événements principaux enregistrés par la structure	Référentiel des Evenements (n Event_ID)

Figure 11 : Aperçu de l'architecture du référentiel structural et des attributs associés aux entités structurales.

En 2022, une application web du même type que celle réalisée pour le référentiel lithostratigraphique (GRL), a été développée pour élaborer et accueillir ce référentiel structural (GRS : application de Gestion du Référentiel Structural). Lorsque celui-ci sera déployé il sera nécessaire de développer un outil (de type Plug-In QGIS) permettant d'assigner les entités structurales saisies dans le référentiel aux géométries des cartes et des coupes. Concernant les logs de forages, l'application Logiso permettra de rattacher une unité structurale à une passe ou une limite entre 2 passes. Pour ce qui est des points d'observations, l'application Geofield permettra de rattacher des observations (lithologies, mesures etc.) à des structures géologiques déclarées dans le référentiel structural. Une fois tous ces liens géométriques réalisés, on pourra considérer que l'ensemble des données structurales seront harmonisées dans un espace 3D à l'identique des points de contacts entre les ULS.

Le référentiel structural produit pour la chaîne des Pyrénées, au cours du projet RGF-Pyrénées, a été établi à partir de la compilation d'informations provenant des cartes géologiques antérieures à 1/50 000, de leurs notices explicatives et de la littérature existante (Figure 12). Ce référentiel contient 175 failles majeures. Les attributs principaux (cités au-dessus) ont été saisis et seul le travail de hiérarchisation (rang et parent) n'est pas complètement achevé. Cette action ne pourra être réalisée que lorsque les outils de gestion et d'assignation des unités structurales seront opérationnels (courant 2023).

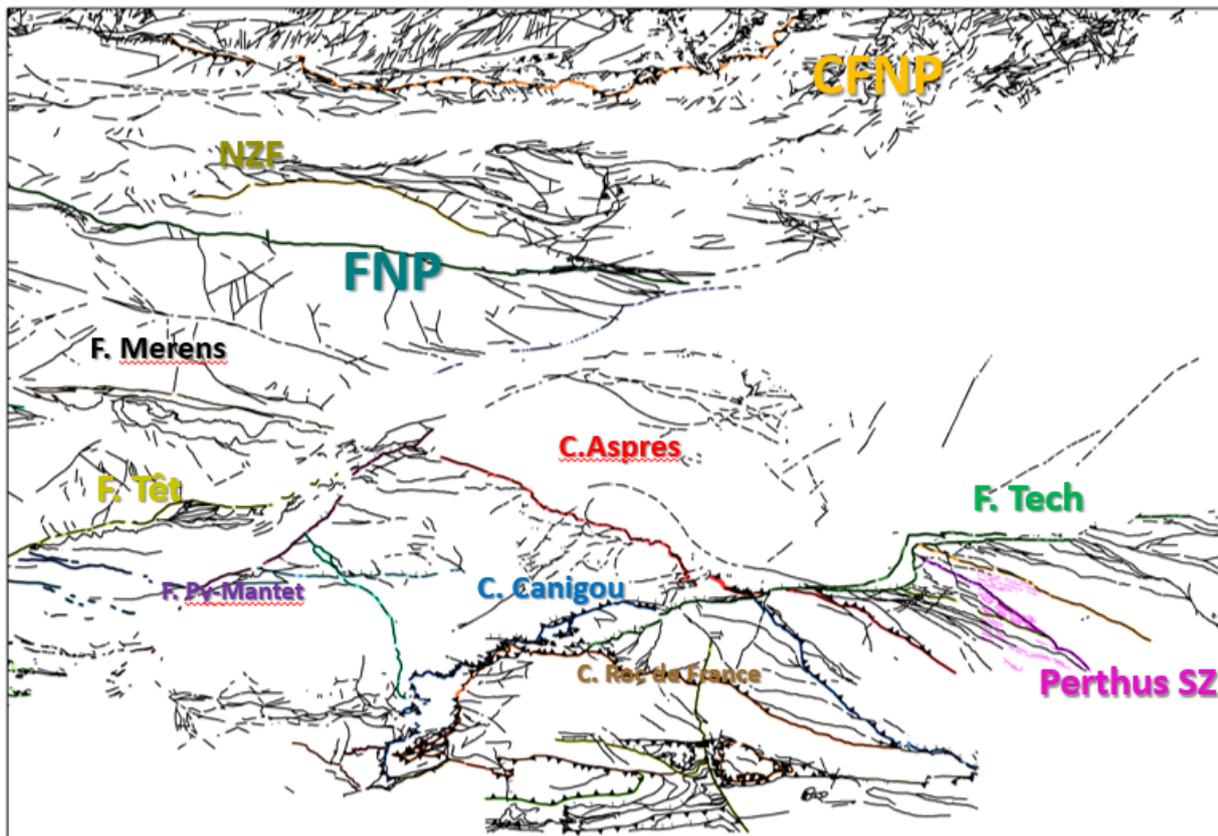


Figure 12. Extrait de la couche structurale pour les Pyrénées Orientales, avec identification et caractérisation des structures majeures.

2.5 Les données géologiques ponctuelles et leurs bases de données respectives

2.5.1 La base de données Geofield

Une base de données permettant de capitaliser les données ponctuelles (mesures structurales, descriptions géologiques, coordonnées XY, etc.) acquises sur le terrain a été réalisée au cours du projet (application Geofield développée en version Access, puis reprise en partie en version web). Cette base a vocation à être utilisée par tous les géologues du BRGM mais aussi par les extérieurs. Ainsi les points acquis par les doctorants du chantier Pyrénées sont intégrés dans cette base de données. Celle-ci permet de gérer les campagnes de terrain depuis la description des affleurements, la collecte d'échantillons ainsi que les diverses analyses qui en découlent (lames minces, géochimie, géochronologie, etc. (Figure 13). Ces données d'observation et d'analyses, faites par le géologue, alimentent différentes briques structurant le système d'information du BRGM. Ces éléments sont décrits par des registres (lexiques) de termes, standardisés et communs aux applications du BRGM (<https://infoterre.brgm.fr/page/registres-geologiques-brgm>), et qui trouvent leur équivalence dans les registres internationaux (CGI vocabularies, INSPIRE).

La description géologique de l'affleurement comprend différents champs de renseignement appelés éléments constitutifs qui relèvent d'un Type particulier (lithologie, minéral, fossile, particules, fluide, ...). Ces Types se présentent sous forme de listes de termes (lexiques) faisant appel aux registres du BRGM. Suivant le Type de l'élément constitutif, un ou plusieurs qualificatifs (adjectifs) et composants (noms) pourront être ajoutés afin de préciser la description. Une description géologique peut être composée de plusieurs éléments constitutifs liés entre eux par une relation ou un rôle.

Chaque élément constitutif pourra être associé à une ou plusieurs analyses (datation, géochimie, thermochronologie...), des photographies ainsi qu'à une ou plusieurs mesures d'orientation sur différents type de structures (stratification, schistosité, paléocourant...) lesquelles font appel aux registres du BRGM. Les échantillons collectés et la suite analytique qui l'accompagne viennent ensuite compléter la description de l'affleurement (Figure 13).

Tous les éléments composant la description géologique (lithologies, mesures, échantillons, lames minces, analyses, photographies...) sont géoréférencés via les coordonnées du point d'observation (ou du prélèvement en forage. Les requêtes spatiales (sous SIG) sont donc accessibles pour tout type d'analyses permettant leur représentation cartographique (et les modèles 3D).

A ce jour (fin 2022), la gestion des échantillons/analyses et leur connexion avec les bases de données analytiques (lien qui était présent dans la base temporaire sur Access) n'a pas encore été développée dans Geofield Web. Une évolution du Geofield Web (en 2023) permettra d'améliorer l'importation et l'exportation des données en masse provenant de sources variées. Ceci permettra en outre de migrer de manière semi-automatique l'ensemble des données d'observations existantes stockées dans les bases (excel, access) du BRGM et en particulier des 14 172 points d'affleurements acquis sur les Pyrénées. Un développement d'un outils d'exportation des données depuis Geofield web vers les outils classiques de SIG, est également en cours de conception.

Des informations plus détaillées concernant la description géologique des données ponctuelles sont disponibles dans le Geochronique n°152 de décembre 2019 : RGF-Pyrénées l'autopsie d'un orogène.

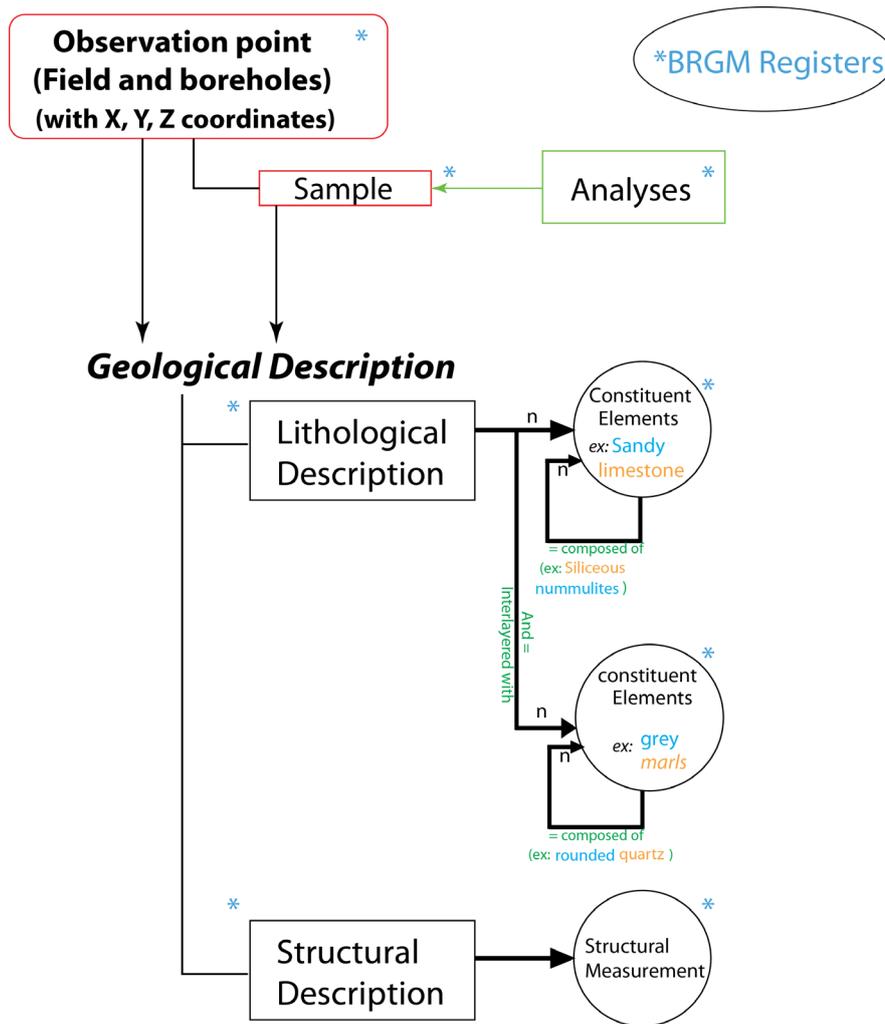


Figure 13 : Diagramme montrant les relations entre les points d'observation et la description géologique dans l'application GEOFIELD. L'application interne Geofield permet de gérer les données issues d'observations et de mesures sur le terrain, d'échantillons, voire d'analyses en laboratoire. Chaque entité géologique est décrite par une liste de termes issus des registres du BRGM qui sont standardisés et communs aux différentes applications du BRGM. Les registres du BRGM sont conçus pour être compatibles avec les normes européennes et internationales (normes GeoSciML et INSPIRE).

2.5.2 La base de données géochronologiques

Une base de données déjà existante et destinée à accueillir les données géochronologiques (base de données Access) a été utilisée dans le cadre du projet RGF-Pyrénées. Cette base, pour l'instant autonome, devra sous peu être connectée au système d'information du BRGM et accessible depuis l'application Geofield. A ce jour, 63 données géochronologiques concernant le domaine pyrénéen ont été saisies et celles-ci devront être complétées par d'autres données issues des publications scientifiques. Cette base constitue une source d'information fondamentale pour caractériser les différents évènements géologiques subis par les objets géologiques (c.f. chapitre 3).

2.5.3 Interprétation des environnements et processus géologiques.

Les cartes géologiques, les logs de forages et les données ponctuelles associées constituent des informations qui relèvent d'un premier niveau d'interprétation. Elles peuvent être considérées

comme une information “factuelle” qui doit se distinguer de l’information interprétée, laquelle est déduite de concepts qui couvrent un large spectre des disciplines scientifiques (thermodynamique, chimie isotopique, dynamique des fluides, équations de la chaleur...). Cette couche d’informations interprétées comprend des domaines divers qui globalement décrivent les environnements physico-chimiques dans lesquels se produisent les processus géologiques. Il peut s’agir (i) du métamorphisme (avec les estimations PT, les faciès métamorphiques, les paragenèses minérales associées etc.), (ii) les environnements de dépôts sédimentaires, (iii) les environnements magmatiques ou hydrothermaux, (iv) les processus d’altération etc., (v) les processus de déformation, (vi) les processus géomorphologiques. Ces informations “environnementales” pourront être rattachées soit aux données ponctuelles (mesures et analyses) qui ont servi à les définir soit à la géométrie des objets géologiques (lignes et polygones) (Figure 14).

Ces informations sont capitales et ne sont pas encore implémentées dans les différents outils du système d’information. Il apparaît donc fondamental de développer les interfaces qui permettront de décrire et saisir ces environnements et processus géologiques. Ces « boîtes de description géologique » pourront être appelées par l’application Logiso pour les forages, l’application Geofield web pour les points d’observations et échantillons, et dans le plugin cartographique QGIS pour les cartes géologiques (Figure 14).

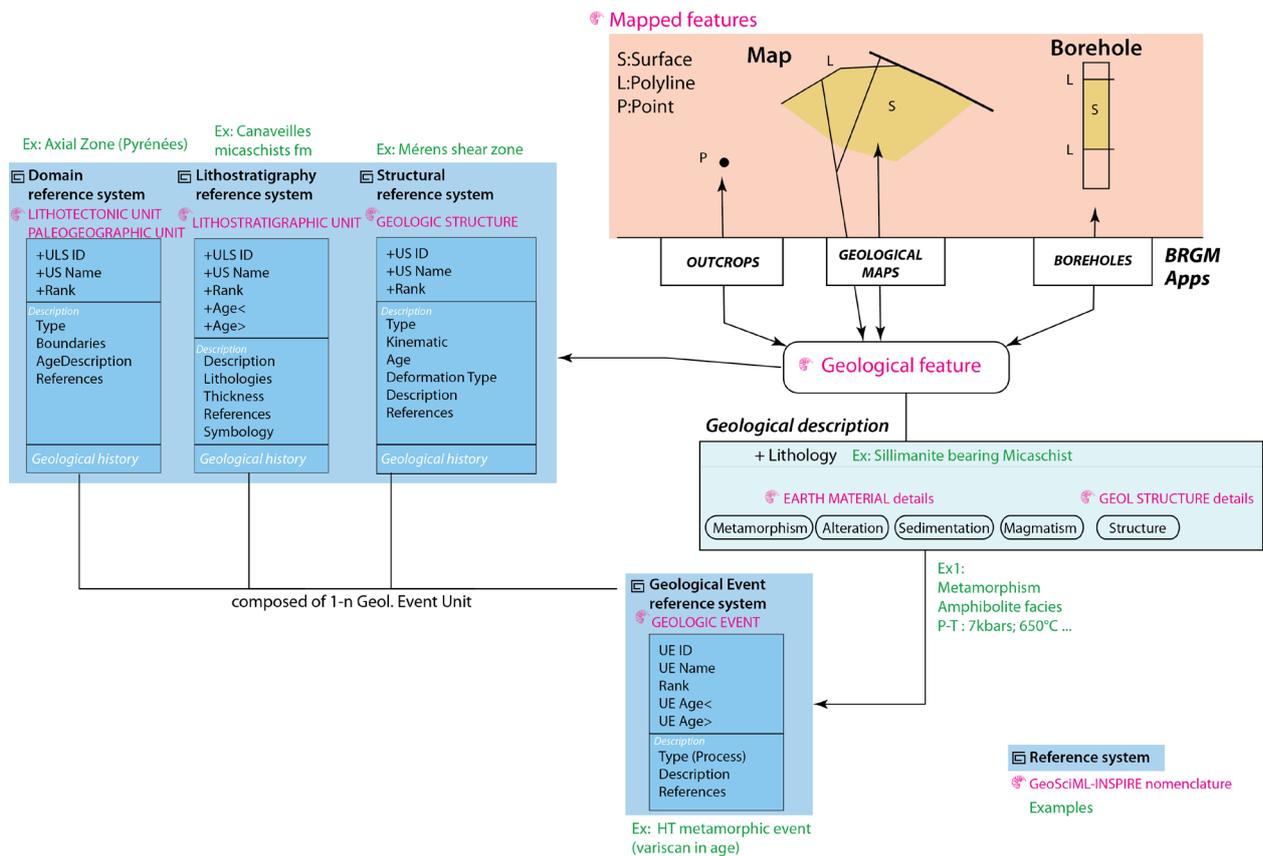


Figure 14. Aperçu des relations entre les référentiels (en bleu), la description géologique d’une entité géologique et les entités cartographiées. Les géométries correspondent à différentes entités géologiques qui peuvent être des unités lithotectoniques/paléogéographiques (Référentiel des domaines) ou des unités lithostratigraphiques (Référentiel lithostratigraphique). Une polyligne peut correspondre à une unité structurale (Référentiel structural). Les événements géologiques (référentiel des événements géologiques) sont liés à une entité géologique, dont il faut d’abord réaliser une description du métamorphisme / de l’altération / de la sédimentation / du magmatisme / de la tectonique. En ce sens, une entité géologique peut avoir de nombreux attributs successifs de processus/environnement, qui peuvent être liés (ou non) à des événements géologiques du référentiel.

3. Le Référentiel des événements géologiques

3.1 *L'histoire des roches à travers la succession d'événements géologiques : Comment caractériser un événement géologique ?*

Généralement, les géologues décrivent l'âge d'un objet géologique sans spécifier explicitement les différentes transformations (événements) qu'il a pu subir. Par exemple, une entité métasédimentaire (roche sédimentaire ayant subi un métamorphisme entraînant une transformation significative de la roche) sera plutôt documentée avec l'âge de son protolithe (Roche originale avant transformation) plutôt qu'avec l'âge du métamorphisme qui l'a affectée. L'approche événementielle permet de ne plus faire de telles simplification ni de choix. L'événement géologique se définit comme un processus géologique se produisant dans un lieu et un intervalle de temps donnés.

Un objet géologique (ex : un minéral, une roche, une faille, une foliation, une structure sédimentaire, ...) est observable aujourd'hui dans son état « fini ». Cet état « fini » est un aboutissement de états antérieurs successifs enregistrés dans la roche en réponse à des événements géologiques (Figure 9). L'histoire géologique d'un objet résulte donc de la somme (incrémentale?) d'événements géologiques successifs, qui se matérialisent par des marqueurs particuliers (minéralogiques, structuraux, morphologiques) affectant l'objet géologique concerné. Ce sont ces caractères particuliers, mesurés, analysés et décrits par le géologue qui constituent la donnée la plus factuelle qui soit. La déduction et la description de l'événement géologique jugé responsable de l'apparition des marqueurs (physiques ou chimiques) dans la roche, constitue déjà une interprétation d'ordre supérieur.

La figure suivante (Figure 16) permet d'illustrer un exemple de succession de 5 événements géologiques affectant 2 entités initiales et amenant à la représentation de 5 caissons différents dans la légende d'une carte. La formation des marnes A constitue un événement de genèse (EG1), correspondant au dépôt de la formation A (Caisson orange), cette formation subit par la suite un événement de transformation (ET1), associé à un épisode tectonométamorphique, entraînant la transformation de ces marnes en micaschistes (caisson vert), appelé la formation des micaschistes B (car ils ont été suffisamment transformés pour justifier la création d'une nouvelle unité lithostratigraphique). Ces 2 caissons (orange et vert) possèdent le même événement génétique EG1 (« Dépôt sédimentaire des marnes de A »). Il en va de même pour le granite X (caisson rose), et l'orthogneiss X (caisson rouge), qui partageront le même événement de genèse EG2 (« intrusion du granite X ») et ils se distingueront ensuite par la transformation ou non du granite en orthogneiss pendant un épisode tectonométamorphique ET2. L'épisode tectonométamorphique ET2 pourra également affecter une partie de la formation des micaschistes B déjà affectés par ET1, entraînant l'ajout d'un nouveau caisson (vert avec pointillés). Avec la cartographie événementielle, les polygones associés aux formations d'origine A (marnes) ou X (granites) porteront chacun les séquences d'événements qui les caractérisent.

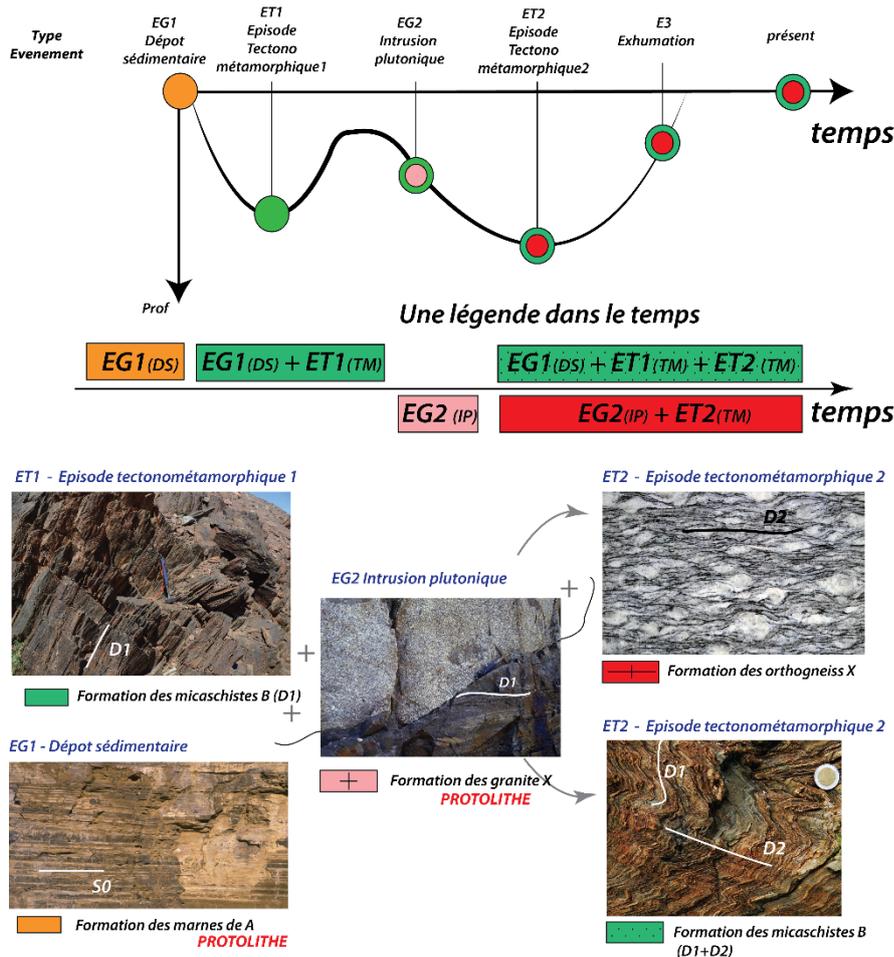


Figure 15 : Exemple de succession dans le temps d'événements géologiques amenant à la représentation de 5 caissons différents dans la légende d'une carte géologique à partir de 2 unités lithostratigraphiques originelles. Bien que simplement représentés par une couleur dans une légende de carte géologique classique, ces caissons ont vécu de 0 à n événements en commun. Avec la cartographie événementielle, les caissons dans la légende des cartes contiennent les informations sur l'ensemble des événements géologiques que les formations géologiques ont rencontrés.

Nous avons déjà signalé que la chaîne de production de connaissance du RGF se composait de strates d'informations de plus en plus interprétées, depuis la donnée considérée comme factuelle vers des modèles plus conceptuels qui s'accorde avec le paradigme scientifique de l'époque.

Le référentiel événementiel fait partie de cette strate supérieure d'informations interprétées (Figure 17) qui constitue la quintessence de la plupart des publications géologiques. Les données brutes acquises sur le terrain ou en forage donnent lieu à une première organisation (classification) sous forme d'unités lithostratigraphiques ou structurales (ULS ou US) qui décrivent l'objet géologique. L'étape suivante s'attache à déduire et à décrire les différentes conditions dans lesquelles se transforment les objets géologiques et à les livrer sous forme d'un référentiel événementiel.

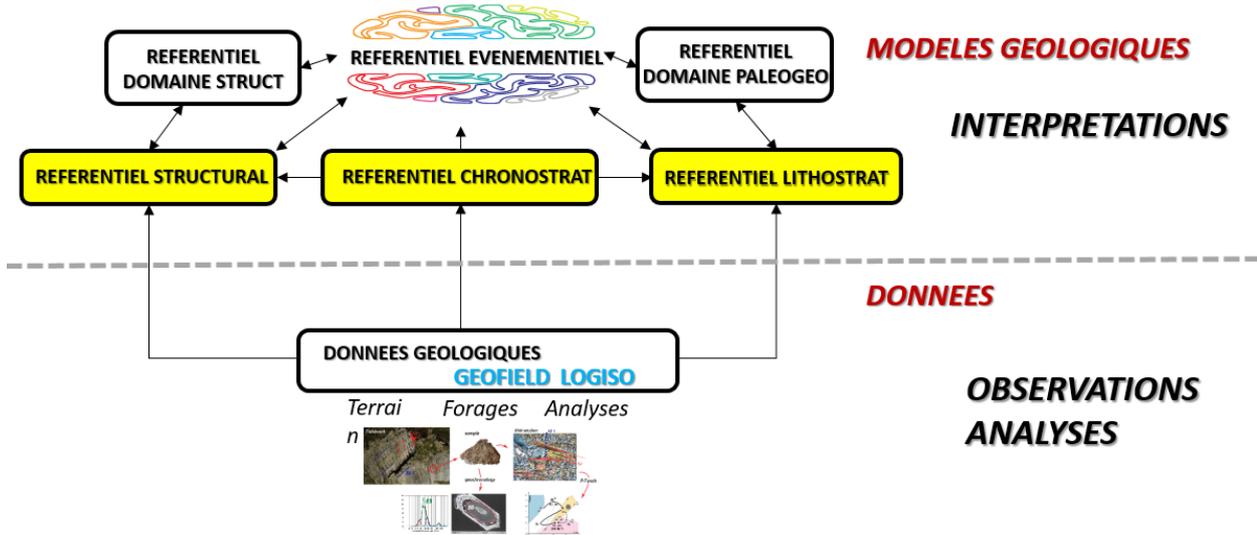


Figure 16 : Lien entre la donnée factuelle (brute), et la donnée interprétée ainsi que leur usage dans la chaîne de production des référentiels lesquels rendent compte des modèles géologiques et de l'état de la connaissance.

La notion d'évènements géologiques n'est pas nouvelle dans la modélisation des données géologiques. En effet, dans GeosciML, qui est un modèle de données et un standard international pour échanger les données géologiques, la notion d'évènements géologiques correspondant à une période de temps, est déjà prise en compte (Sen and Duffy, 2005; Simons et al., 2006; Schiegl et al., 2008). L'approche événementielle développée dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées s'est appliquée à suivre au mieux le schéma proposé par GeosciML, mais aussi à l'améliorer, de façon à permettre de renseigner de nouveaux attributs qui semblaient importants pour décrire l'histoire géologique d'une entité géologique.

Dans le schéma d'application GeoSciML (Figure 18), une entité géologique a une histoire géologique constituée de 1 à n évènements géologiques, ordonnés dans le temps. Chaque évènement géologique peut être spécifié par différents attributs dont un caractérisant le processus aboutissant à l'évènement et un autre concernant l'environnement dans lequel se situe cet évènement. Chaque évènement est borné par des âges de début et de fin et peut (ou non) avoir une description associée.

Dans le RGF Pyrénées, nous avons apporté une dimension supplémentaire, puisque l'évènement est hiérarchisé (à la fois dans le temps et dans l'espace), dans le but de constituer un référentiel géologique des évènements, notion qui pourrait être proposée dans GeoSciML.

UML Diagram: Context Diagram : GeologicEvent

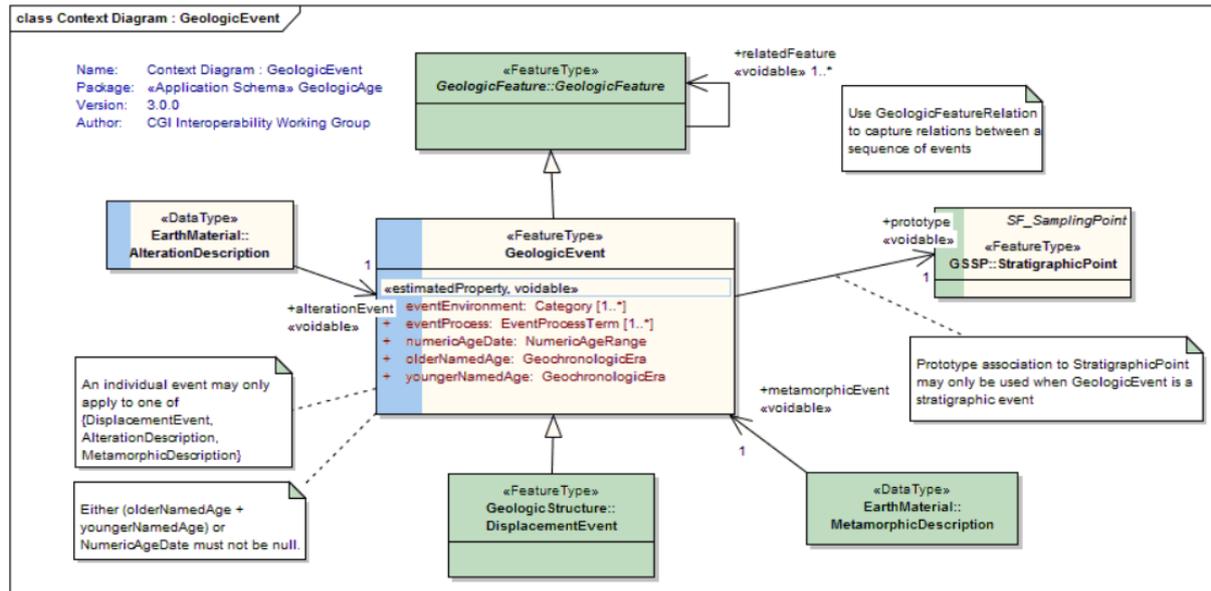


Figure 17 : Modélisation du concept d'évènement géologique dans le modèle conceptuel de données de GeoSciML (<http://geosciml.org/>).

3.2 Le référentiel des événements géologiques : Notion de hiérarchie, âges, ordres

Dans l'approche développée dans le cadre du RGF-Pyrénées, le référentiel des événements géologiques, au même titre que le référentiel lithostratigraphique, permet de hiérarchiser une liste d'évènements géologiques. Dans ce référentiel, un évènement géologique aura donc un identifiant unique, un nom unique, un type, un processus, un âge minimum et un âge maximum, ainsi qu'un rang hiérarchique. L'identifiant est numérique et aléatoire. Le nom peut être saisi librement, choisi par des géologues et validé par un comité de spécialistes. Ce référentiel s'organise donc en « sous rubriques » ou types d'évènements qui se calquent sur la diversité des concepts géologiques, pour s'adapter aux besoins de chaque spécialité.

Il existe plusieurs types d'évènements. Ces évènements peuvent être liés à différents processus liés (i) à la genèse : dépôt sédimentaire (faciès et séquence de dépôt), dépôt volcano-sédimentaire, dépôt volcanique, intrusion plutonique, intrusion volcanique, évènement biostratigraphique (fossiles à valeur biostratigraphique et évènement d'extinction de masse), dépôt de minerai ; ou (ii) à un processus de transformation : diagenèse, déformation, métamorphisme (contact ou régional), métasomatisme, altération (supergène, hydrothermale). Les âges minimum et maximum sont saisis grâce au référentiel chronostratigraphique RGF ou à l'aide d'âges géochronologiques (absolus) ou biostratigraphiques.

Différents types d'évènements peuvent s'avérer simultanés, par exemple un évènement de métamorphisme pourra être synchrone d'un évènement d'intrusion de granite et d'un évènement de dépôt sédimentaire.

Pendant le chantier RGF-Pyrénées, la création du référentiel des événements géologiques des Pyrénées a permis de définir le nombre d'ordres et la signification de ces différents ordres, nécessaires pour établir un cadre évènementiel propre au massif des Pyrénées. Avec 7 ordres, nous pouvons classer tous les évènements géologiques qui concernent les Pyrénées, en les emboitant depuis le cycle de Wilson (du rifting à l'orogénèse) jusqu'à l'unité évènementielle la plus élémentaire tel que le dépôt d'une couche sédimentaire ou une intrusion granitique (Figure 12).

Ces ordres sont les suivants :

- Ordre 0 : Évènements de type « géodynamique » correspondant au cycle de Wilson et associé au mouvement des plaques lithosphériques à l'échelle globale. Cet ordre s'appuie sur des modèles géodynamiques qui englobent le cycle complet de l'ouverture à la fermeture d'un océan qui se termine par la collision de continents avec formation de chaînes de montagne suivi de leur érosion. L'ordre de grandeur de la durée de ces événements d'ordre « 0 » est de 200 à 600 Ma.
- Ordre 1 : Évènements de type « géodynamique » associés à des grandes phases de divergence et de convergence qui composent un cycle de Wilson. La durée de ces événements d'ordre 1 est de l'ordre de la centaine de millions d'années (Ex : Convergence Alpine).
- Ordre 2 : Évènements de type « géodynamique » qui correspondent à des phases au sein d'une même série d'évènements d'ordre 1 (ex : phase orogénique alpine, phase tardi-orogénique alpine, phase d'ouverture syn-convergence, etc.). L'ordre de grandeur de la durée de ces événements d'ordre 2 est d'environ 50 Ma (Ex : Convergence pyrénéenne, Phase post à tardi convergence Pyrénéenne).
- Ordre 3 : Évènements régionaux associés aux grands épisodes sédimentaires (fonctionnement d'un bassin sédimentaire), magmatiques (épisodes de plutonisme, volcanisme), tectono-métamorphiques ou climatiques, qui regroupent déjà les ordres inférieurs d'évènements (de genèse ou de transformation) ; La durée de ces événements d'ordres inférieurs (3-4-5-6) est inférieure à 50 Ma (Ex : Bassin Syn-Orogénique Pyrénéen, Episode magmatique tardi-varisque).
- Les ordres 4-5-6 contiennent les unités événementielles les plus petites, définissant les grands épisodes géologiques d'ordre supérieur (1-2-3). Par exemple : l'Ordre 3 : magmatisme tardi-Varisque contiendra : Ordre 4 : intrusion du complexe plutonique de Querigut ; Ordre 5 : intrusion du granite de type A dans le complexe de Querigut).

La Figure 12 représente une vue des types d'évènements géologiques que l'on peut décrire aux différents ordres, ainsi que leur hiérarchisation. Prenons l'exemple d'un système sédimentaire. Aux ordres 0, 1, 2 et 3, nous pourrions renseigner des séquences de dépôts, délimitées au choix par des MRS (maximum regressive surface ou surface de régression maximale) ou SB (sequence boundary ou limite de séquence) ou des séquences génétiques bornées par des MFS (maximum flooding surface ou surface d'inondation maximale). L'ordre 4 est similaire mais considère des variations plus locales, pas nécessairement corrélables à l'échelle de plusieurs bassins. Enfin, les ordres 5 et 6 intéressent des événements sédimentaires contrôlés essentiellement par les cycles astronomiques dont la durée est inférieure au million d'années (Kaufman, 1986). À ce niveau de détail, il s'agit d'identifier l'empilement des paraséquences et unités génétiques (ordre 5) qui dans l'ensemble correspondent à une Formation lithostratigraphique, et les paraséquences et unités génétiques mêmes (ordre 6) qui représentent les membres et autres bancs repères.

Si l'on veut décrire des événements de type "magmatisme", on pourra décrire un épisode de magmatisme régional, sens large (ordre 3), la mise en place d'un complexe plutonique (ordre 4), ou encore la mise en place spécifique d'une intrusion appartenant à ce complexe (ordre 5).

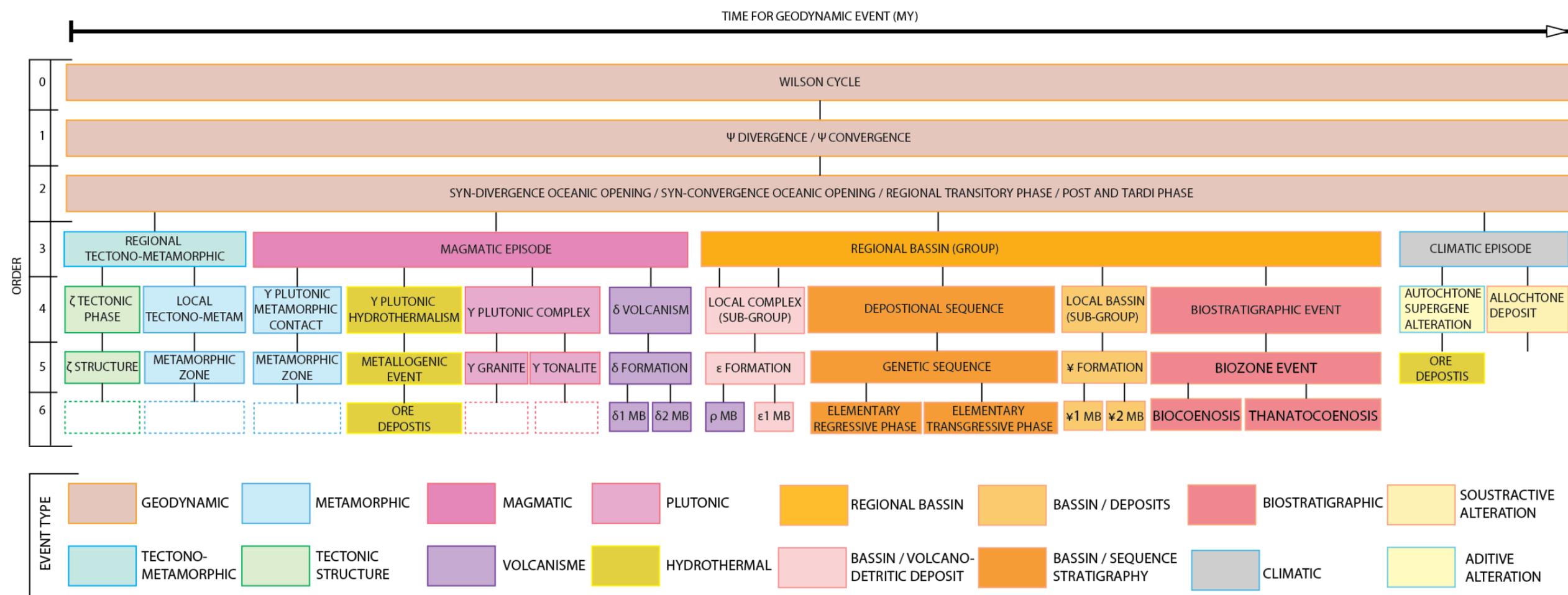


Figure 18 : Vue simplifiée des types d'évènements géologiques à différents ordres et de leur hiérarchie.

3.3 Différents types d'événements géologiques

Un objet géologique dans son état actuel est le résultat d'une succession de processus enregistrés à travers des marqueurs physiques observés dans la roche (id : cristallisation de minéraux, développement de structures, de caractéristiques morphologiques, ...). C'est à partir de ces traces reliques, marqueurs d'événements, que l'on peut retracer l'histoire des objets géologiques.

L'histoire subie par un objet géologique sera donc décrite en termes de succession d'événements géologiques dans le temps, une séquence d'événements. Les événements ayant affecté l'objet géologique, quel que soit leur ordre, seront ordonnés chronologiquement, du plus vieux au plus jeune. Dans cette approche, le premier type d'événements qui caractérise l'ensemble des entités géologiques est l'apparition même de cette entité, sa genèse. Il peut s'agir de l'intrusion d'un granite, d'un dépôt sédimentaire ou encore d'une faille. Les autres types d'événements qui vont lui succéder et affecter l'entité géologique initiale seront de type « transformant » comme les transformations tectonométamorphiques, hydrothermales ou encore les altérations supergènes. Il peut arriver qu'une transformation soit si intense qu'il devient impossible de reconnaître la roche originelle (protolithe), par exemple lorsque celle-ci commence à fondre (migmatite) où lorsqu'elle se transforme en cuirasse par altération de surface (latérite). On considère dans ce cas qu'il s'agit de la genèse d'une nouvelle roche.

Chaque étape reconnue de formation ou de transformation de la roche pourra être décrite par un événement et des attributs associés.

Exemples :

La formation des altérites des orthogneiss du Canigou résulte de la succession d'événements d'ordre 4 suivante :

- événement 0 (E0) Ordovicien : intrusion plutonique de granite du Canigou ;
- événement 1 (ET1) Carbonifère : épisode tectonométamorphique de HT Varisque (D1-M1). Description : transformation du granite en orthogneiss sous faciès métamorphique Schistes Verts;
- événement 2 (ET2) Mio-pliocène: altération supergène formant des arènes avec argiles.

La formation de la faille de Mérens résulte de la succession d'événements d'ordre 4 suivante :

- - événement 0 (E0) Carbonifère : épisode tectonométamorphique de HT Varisque (D2-M2) ; Description : régime dextre dans des conditions de faciès métamorphiques Schistes Vert
- - événement 1 (E1) : épisode tectonométamorphique du rifting créacé. Description : réactivation en faille normale
- - événement 2 (ET2) éocène : épisode tectonique de la convergence pyrénéenne. Description : inversion de la faille normale en décrochevauchement dextre vers le Sud.
-

3.4 Les modèles géologiques dans l'approche événementielle

Les modèles (théories ou hypothèses) géologiques proposés par la communauté scientifique sont en constante évolution au fil des acquisitions de données, et sont toujours largement débattus. Dans ce contexte les auteurs d'une carte géologique devaient choisir parmi nombre de modèles celui qui leur semblait le plus pertinent et le plus conforme aux données acquises au moment de la réalisation de cette carte.

L'un des avantages de l'approche événementielle est d'offrir aujourd'hui, la possibilité d'intégrer différentes interprétations ou modèles géologiques pour une même entité géologique. En effet, si différents modèles (géodynamiques / géologiques) sont proposés dans la littérature pour expliquer l'évolution d'une même entité géologique, il est alors envisageable d'intégrer ces

différentes interprétations pour un même jeu de données. En effet, les différentes données géologiques (géochimiques, géochronologiques, pétrologiques, minéralogiques, gîtologiques, géophysiques, etc.) disponibles pourront être liées à plusieurs modèles via des événements potentiellement incompatibles. Par exemple, une donnée d'estimation de Pression-Température pourrait être rattachée, selon les utilisateurs, (i) soit à un événement de type tectonométamorphique développé au cours d'une phase géodynamique en compression et (ii) soit à un événement tectonométamorphique développé au cours d'une phase géodynamique en extension. Toutes les interprétations sont permises tant que chaque hypothèse demeure dans des versions différentes.

À travers le référentiel des événements géologiques, c'est donc l'ensemble des données « brutes » qui pourra ainsi être interprété en différents modèles variant selon les utilisateurs. Le référentiel des événements géologiques permet donc la mise en cohérence des diverses données dans un modèle géologique intégrateur et de tester la plausibilité de l'hypothèse (dans le sens bayésien du terme, V. Roussel, 2019) .

Même si la base de données peut contenir un ensemble des événements possibles et parfois contradictoire, le RGF aura pour vocation de fournir une interprétation reconnue et « validée », par une majorité de la communauté scientifique (CS-RGF) au vue des connaissances du moment..

3.5 Processus et événements géologiques : l'exemple des environnements de dépôt, des faciès métamorphiques ou des horizons d'altération

Les processus à l'origine des différents événements de genèse ou de transformation sont des processus physico-chimiques qui caractérisent un type d'évènement dans un lieu donné. Parmi ces processus, citons le dépôt d'un sédiment dans un environnement spécifique, la diagénèse, l'altération (processus chimiques), les transformations minéralogiques, etc.

Ainsi, le processus qui gouverne un dépôt sédimentaire sera directement dépendant de la nature de l'environnement dans lequel ce dépôt se met en place. Suivant ces mêmes considérations, les assemblages biostratigraphiques et la détermination des ichnofaciès répondent également à un ensemble de critères permettant de définir des ensembles paléobiogéographiques qui renseignent sur les conditions environnementales et la nature des dépôts.

Un autre exemple de caractérisation d'évènement de transformation cette fois, concerne les épisodes métamorphiques. Ceux-ci sont définis sur la base de l'analyse des assemblages minéralogiques dans une roche et leur caractérisation se fait, à travers la détermination d'un faciès métamorphique et/ou de l'estimation des conditions P/T, par l'intermédiaire d'analyses pétrologiques (microscopie optique, microsonde électronique, spectroscopie raman, etc.) de roches et minéraux, et éventuellement de modélisations thermodynamiques. Les événements de transformation de type « altération supergène » procèdent de la même approche, et leur expression minéralogique (natures, textures, etc.), permet de contraindre les conditions physico-chimiques de l'altération et de savoir dans quel horizon d'altération (autochtone) se situe la roche.

Ces critères de détermination sont associés à la typologie des événements et utilisés pour mieux caractériser et spécifier les conditions d'environnement lors de la genèse ou de la transformation des roches.

Ces environnements physico-chimiques ou parfois paléogéographiques pourront être représentés sur des cartes dérivées qui seront transverses aux unités lithostratigraphiques des cartes géologiques classiques (c.f. § 4). Ces cartes « environnementales », à haut niveau d'interprétation sont des modèles, marqueurs de l'état d'avancement de la connaissance géologique.

3.6 Les évènements géologiques comme liens entre les différentes bases de données géologiques

En géosciences, il existe plusieurs types de supports d'observation : un affleurement, un échantillon (roche, minéral), une lame mince, etc. Chaque support d'observation apporte une information propre sur la nature et la structure de la roche, la nature et la texture des minéraux, leur chimie etc... A partir de ces différentes données, le travail du géologue consiste à rechercher un lien de parenté entre ces différentes informations et à en déduire une cause commune, un évènement, qui est à l'origine de certains faits observés, mesurés ou analysés.

Le regroupement de ces faits se réalise, en informatique, au moyen d'un lien qui pointe sur la liste d'évènements identifiés, le référentiel évènementiel. Cette approche permet donc de classifier des ensembles de diverses données qui ne prennent sens qu'une fois que le lien évènementiel est établi.

La Figure 20 montre l'exemple d'une suite de données acquises sur différents supports d'observation. Chacune de ces données est stockée dans une base différentes, mais toutes sont liées par des liens évènementiels. Ces liens créent une information supplémentaire qui caractérise les conditions d'apparitions de l'évènement.

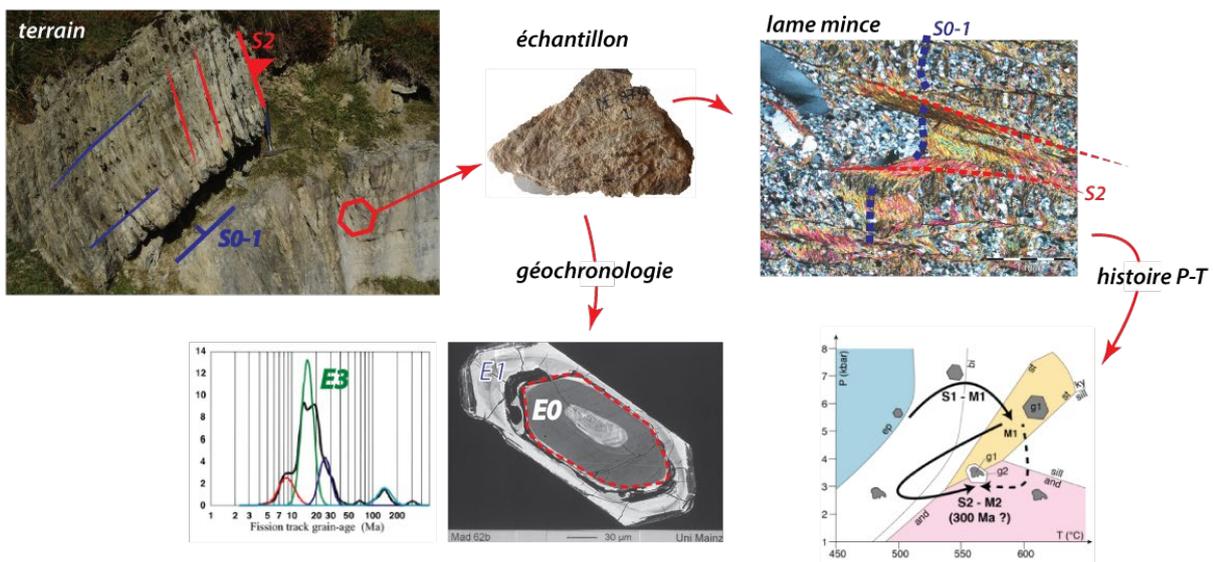


Figure 19 : L'évènement géologique est le liant de toutes les informations géologiques. Les données sont « factuelles », les évènements sont interprétatifs. Un ou plusieurs évènements géologiques peuvent être observés sur un échantillon ou un affleurement. Ces évènements peuvent être représentés par des mesures (mesures structurales), des analyses (pétrologiques, géochimiques, géochronologiques).

4. Cartographie géologique des événements

Une réflexion importante est actuellement menée dans le cadre du développement du SI-BRGM pour développer des outils permettant de stocker les descriptions géologiques de tous les types d'objets (polylignes, polygones, points) géologiques. Il est en effet important de pouvoir rattacher des informations diverses aux objets géologiques ; dont la qualification des événements géologiques, eux même hiérarchisés au sein du référentiel des événements.

En attendant les développements de l'architecture et de gestion du « référentiel des événements » (existant aujourd'hui en base Access), des outils temporaires permettant de lier ce référentiel aux géométries de la cartes (Add in « Cartographie événementielle » dans ArcGis) ont été développés au cours du chantier RGF-Pyrénées, dans le but de réaliser des cartes événementielles "semi-automatiques". Ces bases de données et outils provisoires permettent de fournir une base de réflexion pour la conception du SI- BRGM.

Aujourd'hui les technologies d'informations numériques permettent de dépasser les limites imposées par la représentation graphique d'une carte géologique imprimée. Le principe de la nouvelle carte géologique du BRGM (RGF) est de pouvoir intégrer les différents éléments de description d'une roche qui sont aussi les marqueurs d'un événement, selon l'ordre chronologique de leur apparition. La cartographie RGF devra donc intégrer une ligne-temps qui permettra de connaître les différents états traversés par un objet géologique depuis sa formation jusqu'à son état actuel. Ce nouveau concept de cartographie géologique numérique est appelé « cartographie géologique événementielle ». Dans ce nouveau cadre de représentation cartographique, une unité géologique (ULS ou US) perd son caractère d'unicité, elle ne correspond plus strictement à une entité lithostratigraphique, comme dans une carte classique, mais s'affiche comme l'ensemble des événements de formation et de transformation qui a modelé la roche et lui confère aujourd'hui ses propriétés pétrophysiques (Figure 21).

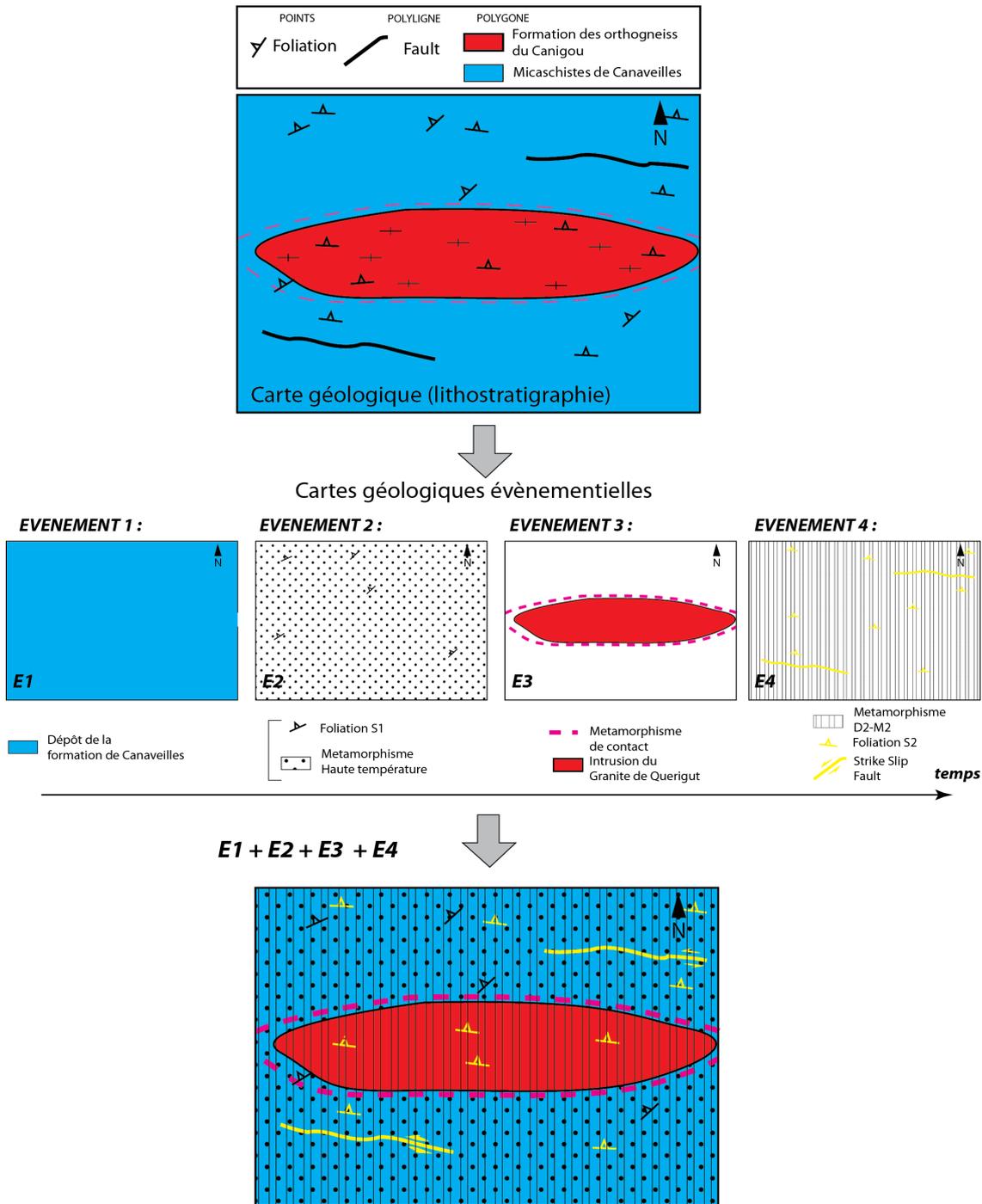


Figure 20 : De la carte géologique (issue du référentiel lithostratigraphique) vers les cartes géologiques évènementielles (issues du référentiel évènementiel).

4.1 Représentation cartographique des évènements

À la suite du programme de la carte géologique de la France à 1/50 000, il existe plus de 1100 cartes géologiques vectorisées. Ces cartes géologiques contiennent différentes entités géométriques (sous forme de polygones, polygones et points).

Différents types de polygones sont représentés sur ces cartes, telles que (i) des limites géologiques (contact intrusif, contact sédimentaire, etc.), (ii) des limites structurales (zone de

cisaillement, faille, chevauchement, etc.) et (iii) d'autres lignes (axe de pli à grande échelle, isogrades, etc.).

Différents types de points sont présents sur cartes, tels que (i) des mesures structurales (stratification, foliation, linéation, axe de pli, direction de courant, etc.), (ii) des indices miniers et (iii) des analyses (données géochronologiques).

Différents types de polygones sont représentés sur les cartes, tels que (i) des unités lithostratigraphiques (socle, dépôts, formations superficielles, etc.), (ii) des unités tectoniques (zones mylonitiques par exemple), (iii) des zones métamorphiques, représentées en surcharge sur les cartes géologiques et (iv) des zones altérées, représentées en surcharge sur les cartes géologiques.

Si toutes ces entités cartographiques peuvent partager une partie d'une même histoire géologique, la carte géologique traditionnelle ne permet cependant pas de la visualiser. Avec cette nouvelle approche de cartographie des événements géologiques, nous ajoutons la possibilité d'attribuer un ou plusieurs événements géologiques à ces entités cartographiques. En effet l'évènement géologique tel que renseigné dans le référentiel des événements géologiques peut être attaché : (i) au référentiel lithostratigraphique, pour attribuer des événements aux polygones, (ii) au référentiel des structures géologiques, pour attribuer des événements aux polygones, (iii) à GEOFIELD, pour attribuer des événements aux différentes entités ponctuelles (représentables en carte), (iv) à la base de données géochronologiques pour attribuer un événement à un âge obtenu par analyse d'un échantillon prélevé sur le terrain et (v) à toute autre type d'attribut ou de données (géochimie, conditions métamorphiques, etc.) pour caractériser la typologie de ces événements. Cela signifie qu'il est possible à l'heure actuelle de lier un événement géologique à tous types d'entités cartographiques (polygones, polygones et points) ou cartographiables (Figure 22).

Ainsi, un événement donné peut avoir sa représentation cartographique propre en affichant tous les objets qui sont porteur de l'évènement. A titre d'exemple, une carte de l'évènement tectono-sédimentaire du rift albo-cénomaniens permettra de visualiser à la fois les différents environnements de dépôts du bassin sédimentaire, les zones en érosion sur le pourtour, les failles majeures accommodant son ouverture, le métamorphisme de haute température (ZIM) en base du bassin, etc. La Figure 22 est un exemple schématique de la représentation possible en cartes (cartes événementielles), de différents événements géologiques affectant différents objets géologiques (roches, minéraux, failles).

Il est donc possible de générer une carte pour chaque étape de l'histoire géologique d'une région et de visualiser toutes les données ponctuelles qui ont permis d'identifier chaque événement.

La Figure 22 montre un exemple schématique de carte événementielle. Sur cette figure, **t1** est un événement géodynamique, appelé orogénèse 1, représenté par (i) un événement tectonométamorphique associé au développement d'une foliation appelée S1, (ii) un stade métamorphique M1 caractérisé par un pic en pression (P1), et un pic en température (T1) ainsi qu'un âge (t1), contemporain du fonctionnement d'une structure géologique (chevauchement 1). **t2** est un second événement géodynamique, appelé phase post-orogénique, caractérisé par la mise en place de granites (polygones de couleur rose), provoquant une auréole de contact métamorphique (hachures roses), associés à un âge (datation d'un protolithe). **t3** est un troisième événement géodynamique, appelé orogénèse 2, représenté par (i) un événement tectonométamorphique associé au développement d'une foliation S2, (ii) un épisode métamorphique M2 caractérisé par un pic en pression (P2), un pic en température (T2) menant à l'orthogneissification du granite (polygone rouge), et un âge (t3), contemporain du fonctionnement d'une structure géologique (décrochement). **t4** est un dernier événement géodynamique, appelé "phase post-orogénique", associé au fonctionnement d'une faille normale, contemporaine de dépôts syn-sédimentaires au nord de la faille (polygones verts pâles) et d'un épisode d'altération superficielle (pointillés verts).

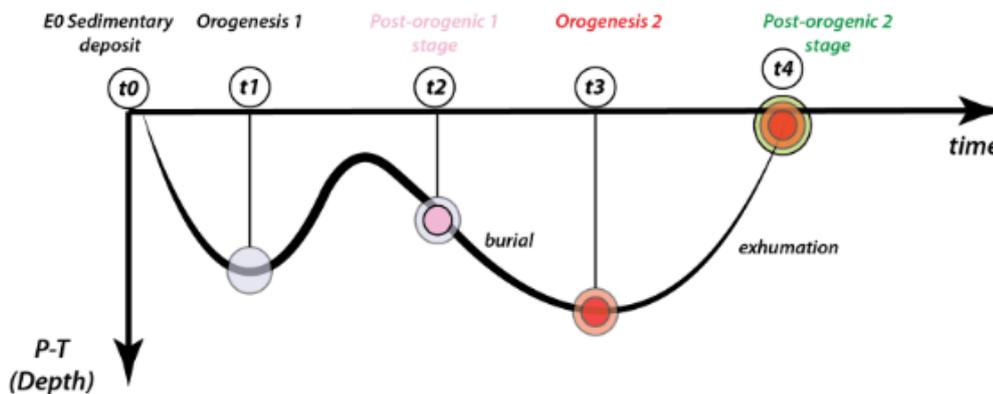
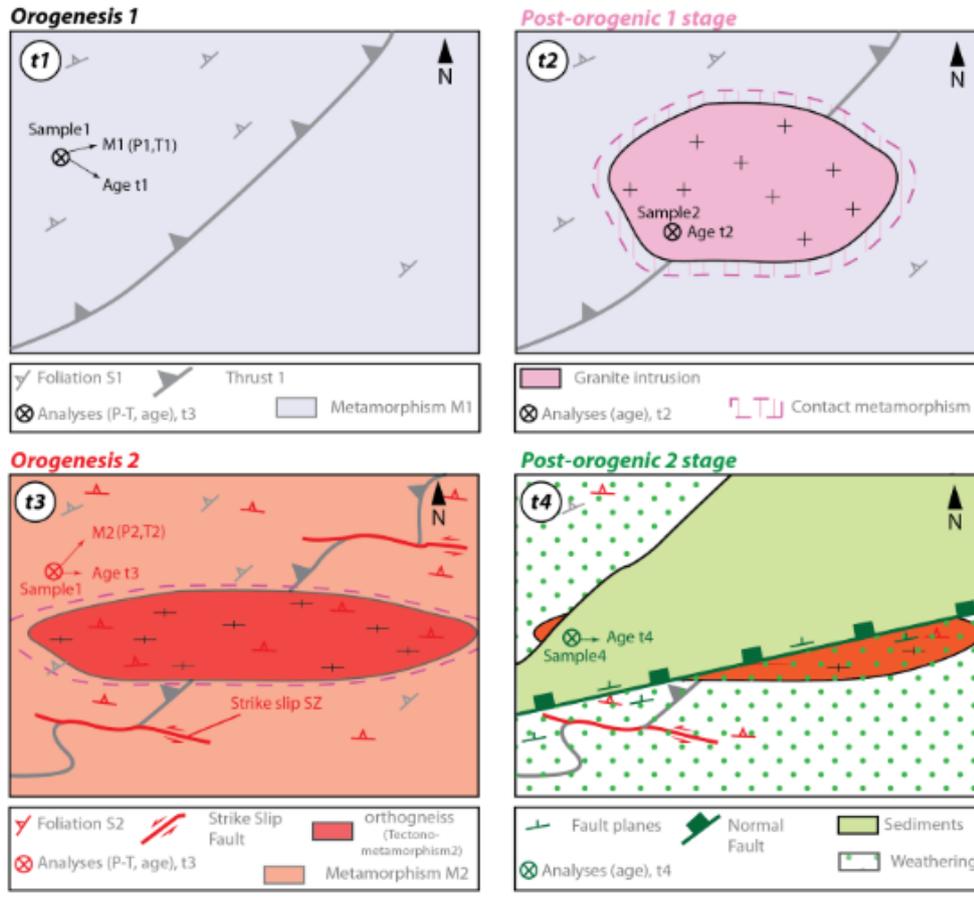


Figure 21 : Cartes évènementielles. Il est possible de générer une carte pour chaque étape de l'histoire géologique subie par les roches (ici t1 à t4), car toutes ces entités géologiques (représentées par des polygones, polygones et points) portent des attributs distribués dans différentes bases de données et liés à un même évènement géologique, défini dans le Référentiel des évènements géologiques.

Comme expliqué par ailleurs, la méthodologie proposée s'adresse à tout type d'entités cartographiques issues des cartes à 1/50 000 et de leur notice (polygones, lignes, ponctuel, etc.) pour décrire l'histoire géologique dans son ensemble. Le déploiement de cette méthode à d'autres types de données est tout à fait possible, en particulier les données de forages qui sont notamment valorisées au BRGM dans le cadre des projets BSS et LOGISO. C'est d'ailleurs via une approche combinée surface-subsurface qu'est rendue possible la constitution d'un référentiel

lithostratigraphique. Chaque forage est caractérisé par des passes portant un certain nombre d'informations (lithologie, âge) dont l'une d'elles pourrait être un événement l'affectant.

L'intégration de l'évènementiel aux données de subsurface valorisées par le BRGM permettrait de proposer des corrélations surface-subsurface. En couplant les deux sources de données (cartes / sondages), il est alors possible de proposer la construction de modèles 4D « évènementiels ».

4.2 approche évènementielle et stratigraphie séquentielle

Depuis les années 80, les études pétrolières sur les bassins sédimentaires ont permis d'établir les principes de la stratigraphie séquentielle c'est à dire la reconnaissance et la corrélation, en forage, de surfaces isochrones particulières telles que les surfaces d'inondation maximales (SIM ou MFS en anglais), les surfaces régressives maximales (SRM ou MRS en anglais) et les limites de séquence (LS ou SB en anglais). La stratigraphie séquentielle, qui partitionne les dépôts sédimentaires en tranches de temps, est donc par essence compatible avec une approche évènementielle.

En effet, une séquence de dépôt correspond à ensemble de faciès déposés de manière synchrone le long d'un profil de dépôt allant du proximal au distal (Figure 23 b). Ces séquences enregistrent les variations du niveau marin (régression/transgression) qu'elles soient globales (eustatisme) ou plus local (niveau marin relatif), et contrôlées par le climat et/ou la tectonique. (Figure 23 C). Elles sont hiérarchisées en cycles de différents ordres, facilitant leur intégration directe dans la structure, elle aussi hiérarchisée, du Référentiel évènementiel.

L'application des principes de stratigraphie séquentielle, par corrélation de coupes terrain, forages ou à l'aide de profils sismiques, est plutôt réservée aux bassins peu déformés. Les zones tectoniquement très déformées limitent en effet les corrélations des surfaces repères, par manque de "continuité" des objets.

L'introduction des attributs de stratigraphie séquentielle, (via le Référentiel des événements) dans les logs de forages, va permettre de partitionner les unités lithostratigraphiques (ULS) en découpage temporel (Figure 23). L'objectif est de proposer une solution permettant de respecter les normes internationales de stratigraphie dans la définition des unités lithostratigraphiques comme étant des ensembles cohérent en terme de faciès (lithologique), délimitées par des limites de faciès (salvador et al., 1994), en y associant à travers l'approche évènementielle, le découpage temporel tel que développé en stratigraphie séquentielle.

Si au premier ordre, les limites des ULS, marquées par des changements de faciès brutaux, peuvent correspondre aux limites de séquences (temporelles) définies par la méthode de stratigraphie séquentielle. Dans les ordres inférieurs ces limites pourront éventuellement recouper les limites de faciès et donc les ULS (Figure 23). Par exemple une ULS composée par un faciès marneux pourra contenir une surface de MFS sans que celle-ci ne soit particulièrement visible.

Ainsi, en considérant un profil de dépôt d'un système silicoclastique dominé par les apports fluviatiles, au sein d'une même séquence génétique de dépôt bornée par des limites (SB), une phase transgressive permettra de préserver les dépôts continentaux dans la partie proximale du système et sera donc exprimée en ULS par une formation continentale. A l'opposé, durant cette même phase transgressive, les sédiments déposés dans la partie distale du bassin seront peu épais voire condensés (notion de préservation). Le processus inverse pourra se produire au cours des phases régressives (Figure 23).

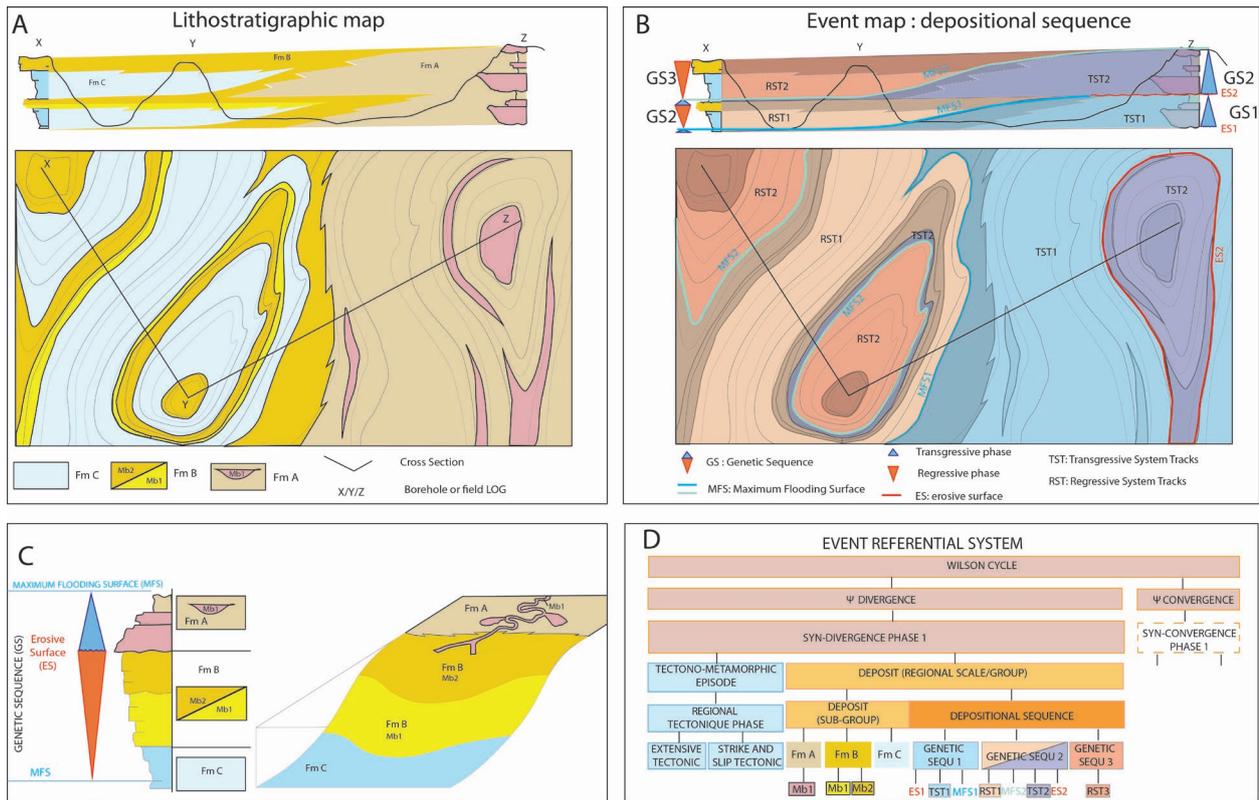


Figure 22 : Illustration schématique de l'application du concept d'évènement géologique pour la lithostratigraphie et la stratigraphie séquentielle. A) Carte géologique (lithostratigraphique) schématique, avec coupe transversale (X/Y/Z) et diagraphie schématique des points X et Z, avec trois formations principales (Fm A, Fm C, Fm B) et leurs membres respectifs. Les limites lithostratigraphiques sont représentées par des limites de faciès correspondant à un certain environnement de dépôt le long d'un transect comme illustré en C). B) la même carte et la section transversale de A) sont analysées et interprétées en terme de séquence de dépôt pour représenter les différentes surfaces clés (MFS/ES ou SB) et les traces du système régressif et transgressif. Ces éléments géologiques sont caractéristiques des séquences de dépôt liées au dépôt des différentes formations représentées en A). Ces deux types d'évènements géologiques (dépôt des formations et séquences génétiques qui leur sont liées) sont enregistrés dans le Référentiel d'évènements en D, permettant de proposer une séquence complète d'évènements associés à différents processus (tectonique, dépôt, etc.), pour dessiner l'histoire géologique de la phase 1 de syn-divergence.

Cette approche évènementielle permettra donc de cartographier (c.f. § 3.5 et 4.1) les environnements de dépôt d'un bassin sédimentaire par tranche de temps (régression/transgression). L'identification des surfaces isochrones est surtout issue de l'interprétation et corrélations des logs de forage ou encore des profils sismiques, elle est plus difficilement réalisable en surface où les affleurements sont trop discontinus. Pour cette raison, les cartes géologiques sont généralement peu documentées en termes de stratigraphie séquentielle. L'objectif du RGF est bien de normaliser la carte selon les critères internationaux à travers l'identification des ULS et leur partitionnement à travers les surfaces isochrones des limites de séquences.

4.3 Les zones structurales et domaines paléogéographiques dans l'approche évènementielle

Toutes les régions du globe sont découpées en domaines paléogéographiques ou structuraux qui peuvent s'emboîter à différentes échelles. Les domaines paléogéographiques, relèvent de la géographie physique par exemple des zones émergées, des bassins... anciens ou actuels ; alors

que les domaines structuraux représentent des entités tectoniques généralement limitées par des failles majeures. Ainsi, dans les Pyrénées, on peut par exemple distinguer un *domaine Nord Pyrénéen*, d'âge crétacé de l'actuelle *Zone Nord-Pyrénéenne* limité par 2 failles majeures. Domaines paléogéographiques et zones géologiques sont définis à la fois dans l'espace et dans une période déterminée de l'histoire géologique. Tous deux relèvent donc de la notion événementielle (espace et temps) définie dans ce chapitre.

Les cartes géologiques représentent, par définition, l'état actuel de la géométrie des objets géologiques et affichent donc la zonation géologique d'aujourd'hui, sans possibilité de restituer les domaines et les zones du passé. Sur l'exemple pyrénéen, l'actuelle Zone Nord Pyrénéenne est apparue dès l'Eocène. Elle résulte de l'inversion tectonique d'un bassin qui correspondait au domaine Nord-Pyrénéen à l'époque albo-cénomanienne. Le plancher et les environs du bassin (Trias à Jurassique sup.) appartenaient quant à eux à un domaine beaucoup plus vaste du sillon mésozoïque pyrénéen. Ces derniers terrains ont donc changé de domaine au cours du temps, suite aux différents événements tectoniques extensifs et compressifs.

Dans notre approche, les zones et les domaines, qui se sont superposés et succédés au cours de l'histoire géologique, deviennent des attributs qui informent les événements. Ils peuvent donc être définis et hiérarchisés dans un référentiel propre lié aux autres référentiels, lithostratigraphique, structural et événementiel (Figure 19). La représentation cartographique des domaines dérive du croisement entre ces 3 derniers référentiels.

Il est à noter que cette représentation, basée sur la carte géologique, reste celle des entités géologiques dans leur situation actuelle. Elle est néanmoins nécessaire à la construction de véritables cartes paléogéographiques qui ont, quant à elle, vocation à restaurer les domaines et zones dans leur état anté-déformation et à les replacer dans leur position géographique d'origine.

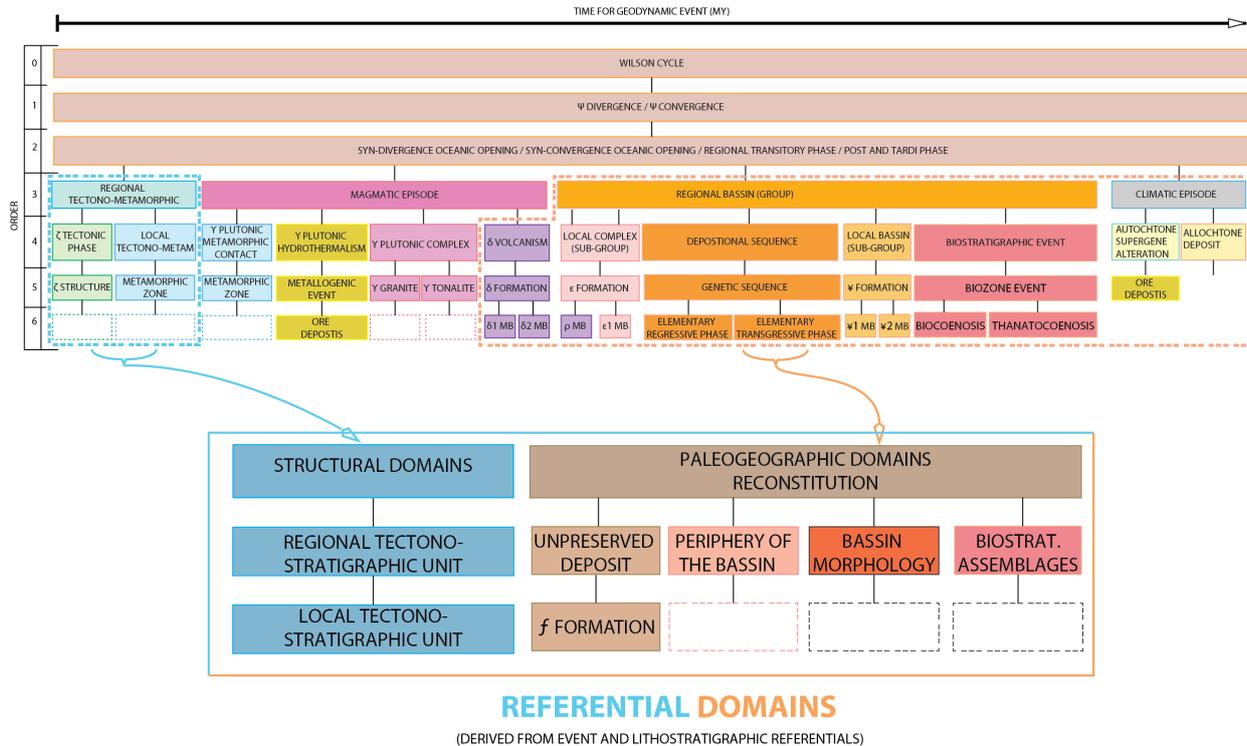


Figure 23 : Le référentiel des domaines géologiques inclut les domaines structuraux hiérarchisés en unités tectonostratigraphiques permettant d'établir un schéma structural des massifs étudiés. Ce référentiel contient également les domaines paléogéographiques et leur sous catégories qui permettent une reconstruction paléogéographique comme par exemple, dans une période donnée, situer la paléo-bordure d'un bassin et son dépôt-centre.

5. Perspectives d'utilisation de la carte événementielle

La carte événementielle permettra de se libérer des caissons (ULS) des cartes géologiques ce qui constitue une avancée considérable quant à la réalisation des requêtes informatiques. En effet, lorsque l'on réalise aujourd'hui une requête numérique sur une entité géologique, la plus petite unité qui apparaît sur la carte est une ULS (par exemple « Marnes de Sainte Suzanne ») et celle-ci est représentée par un ensemble de polygones qui est indissociable et porte les mêmes attributs descriptifs de l'ULS. Ce type de sélection est donc très limitatif et réduit la précision de la recherche si l'on veut croiser ces attributs avec d'autres sources d'information.

Dans la carte événementielle, au contraire, chaque polygone a la capacité de porter une information propre laquelle se traduira par une *séquence (suite) d'événements* (E1, E2...En) lesquels sont renseignés par diverses informations (autres que lithostratigraphiques). Une roche se définit dorénavant comme la somme de tous les événements qu'elle a subis (le premier d'entre eux étant sa genèse) et non plus en tant qu'unité lithostratigraphique (ULS). Cela signifie que chaque polygone de la carte pourra répondre individuellement à une requête spécifique selon l'information qu'il contient. On pourra, par exemple, sélectionner l'événement de genèse du « Granite du Canigou (E_{Gen0}, équivalent de l'ULS) et un événement d'altération (E_{Alt5}) pour faire apparaître les zones (polygones) altérées du granite et ensuite croiser ces dernières avec tout autre type d'informations (hydrologique, teneur en éléments, biodiversité végétale etc...). Cet exemple porte sur 2 événements mais, avec le développement du référentiel événementiel, le nombre de combinaisons possibles entre les séquences d'événements deviendra vite incalculable. La précision des résultats, issus des croisements de données et visualisés par des polygones « autonomes », augmentera aussi de façon considérable. Dit plus simplement, avec une carte géologique classique, on interroge une famille d'objets (ULS), alors qu'avec une carte événementielle on interroge un individu (ou un groupe restreint d'individus), défini par sa séquence d'événements.

De plus, si l'on considère une roche comme résultant d'une suite d'événements, *a fortiori*, ses propriétés physiques et chimiques en découleront tout autant. Une perspective de développement dans cette approche, serait alors d'associer les propriétés physico-chimiques d'une roche, non pas au « concept-objet » ULS (unité lithostratigraphique) à laquelle elle appartient, mais bien à la séquence événementielle qui la caractérise individuellement.

Bien que non réalisées dans le cadre du chantier RGF Pyrénées, nous présentons, dans ce qui suit quelques exemples d'utilisation de l'approche événementielle, dans les domaines de la recherche académique et appliquée.

5.1 Une approche prédictive dans le domaine des risques (ex : Carte prédictive de susceptibilité de présence d'amiante)

L'amiante existe à l'état naturel dans certaines lithologies présentes sur le territoire des Pyrénées. Il s'agit en particulier de roches ultrabasiques, de roches plutoniques et filoniennes basiques à intermédiaires et de certains marbres. Certains événements métamorphiques (hydrothermalisme, métamorphisme en faciès schiste vert, ...) sont susceptibles d'avoir facilité la cristallisation de minéraux amiantifères dans ces roches.

Avant tout projet visant à réaliser une carte de susceptibilité de présence d'amiante, une carte d'aléa prévisionnel est réalisée en croisant les informations lithologiques des cartes géologiques avec toutes autres informations utiles sur le métamorphisme, l'altération hydrothermalisme, etc. contenues dans les notices et les articles scientifiques publiés sur la zone d'étude.

L'approche événementielle permet, et c'est sa vocation, de faire des croisements automatiques entre les lithologies (contenues dans le Référentiel lithostratigraphique) et les événements d'hydrothermalisme et de métamorphisme (contenus dans le Référentiel des événements géologiques). Le résultat de ce croisement affiche directement une carte prédictive des formations géologiques susceptibles de contenir des occurrences amiantifères.

Cette approche sera très utile dans un contexte d'évolution de la réglementation en France, laquelle imposera bientôt la recherche d'amiante avant tous types de travaux intéressant des roches et des sols en place.

Ce type d'approche peut être envisagé plus largement pour la réalisation de cartes ou tout autre document sur la prédiction de différents types de risque en lien avec la géologie.

5.2 Une approche prédictive dans le domaine des ressources minérales

Les minéralisations sont très dépendantes de l'histoire géologique des roches-hôtes et du contexte géologique. Plusieurs approches cartographiques ont été décrites dans la littérature, pour montrer le lien entre certains événements géologiques et la présence ou non d'un ou plusieurs types de minéralisations. On peut imaginer réaliser ce type de cartes à toutes les échelles, en croisant les différents événements concernés avec les indices métallogéniques, afin de déterminer les milieux favorables à la présence de certaines minéralisations. Le rang de l'événement utilisé sera fonction de l'échelle d'investigation, il sera d'ordre géodynamique (échelle nationale ou continentale) ou tectono-métamorphique pour les recherches régionales.

Les structures tectoniques contrôlant également la localisation de nombreuses minéralisations, un croisement entre les indices minéralisés et l'histoire des structures géologiques paraît aussi fondamental pour déterminer le lien et le rôle du type, de l'âge, de l'intensité etc. de la déformation sur la présence ou non de ces minéralisations.

5.3 Une approche source to sink et "séquentielle"

Dans le domaine de la subsurface et de la gestion des ressources, qu'elle soit à finalité énergétique (géothermie, hydrocarbures) ou hydrogéologique, il est fondamental d'intégrer ce que l'on pourrait appeler des données dures : forages, géophysique.

Dans ce contexte de prédictivité de la qualité des réservoirs, les méthodologies ont beaucoup évolué depuis une trentaine d'années. À titre d'exemple, la stratigraphie séquentielle ou les analyses source (au sens érosion des roches) to sink (au sens réservoir par piégeage des sédiments érodés) permettent, via des concepts scientifiques, de mieux appréhender la qualité des réservoirs. Rappelons toutefois que ces approches ne se suffisent pas à elles-mêmes.

Via l'approche événementielle, il est possible de créer des cartes « temporelles » basées sur les principes de stratigraphie séquentielle (voir § 4.2). Les cartes produites sont des cartes paléogéographiques qui figent à un instant donné le paysage. La lecture de ce paysage permet de comprendre quelles sont les zones qui, soumises à l'érosion, ont pu fournir le matériel sédimentaire qui forment ou non les réservoirs et où sont les zones en dépôts formant les réservoirs. Caractériser un réservoir et tenter de prédire sa qualité sans faire appel à de l'acquisition systématique de données souvent coûteuses est donc possible par (i) la compréhension de la nature lithologique et géochimique des sources érodées, (ii) la compréhension des agents de transport et leur capacité à façonner des grains et piéger des sédiments et (iii) la géométrie du réservoir.

Dans une période où l'exploration des ressources devient tendue d'un point de vue financier et technique (acceptabilité sociétale, profondeur de forages, conditions de foration, ...), ces approches séquentielles et source to sink sont plus que jamais essentielles à une première

estimation qualitative, et mettent donc au cœur des métiers de demain la cartographie événementielle.

5.4 *Une reconstitution des paléogéographies en lien avec les climats du passé*

Les formations de surfaces constituent un enregistrement fiable et parfois à haute résolution des changements climatiques passés. La répartition spatio-temporelle des profils d'altération, des formes, des dépôts, et des modelés sédimentaires est très fortement corrélée aux conditions supergènes qui prévalaient par le passé ainsi qu'aux processus de dépôts et aux phénomènes d'altération subis postérieurement. Les représentations en lithostratigraphie permettent d'appréhender ces évolutions mais uniquement de manière partielle. L'approche par évènements, qu'ils soient de type altération, grandes phases d'incision, dépôts, etc., permet de reconstituer les paléogéographies à certains moments clés et de mettre en relation ces paléogéographies avec les conditions climatiques et les structures-tectoniques globales. Cette approche pourrait permettre par exemple de mettre en relation des conditions supergènes avec des volumes de sédiments produits, érodés ou transportés.

Cette compréhension de plus en plus fine des processus est également précieuse pour mener une approche prédictive des conséquences de l'évolution des formations de surface face au changement global.

6. Conclusions

Présentée à Pau, en Juin 2019, lors d'un colloque de restitution des travaux du chantier RGF-Pyrénées, la méthodologie du RGF, et particulièrement l'approche événementielle, a reçu un accueil très positif à la fois par la communauté universitaire, les représentants des tutelles et les participants industriels, encourageant la poursuite de cette démarche dans les futurs Chantiers RGF-Alpes et RGF-Bassin de Paris. La direction du BRGM a souhaitée voir le développement de cette approche dans les nouveaux chantiers RGF, en vue d'établir un produit de référence pour la France et de standardiser la méthode auprès de la communauté internationale.

Cette approche a été publiée dans le BGF (Le Bayon et al., 2022)

Les points importants retenus à l'issue du chantier RGF-Pyrénées sont : (i) le besoin de connecter les données géologiques des différentes bases de données ; (ii) de proposer de nouveaux produits d'informations géologiques adaptés aux besoins, qu'ils soient scientifiques ou appliqués ; (iii) l'utilité de mettre à jour et valoriser le nouveau produit cartographique de référence (à l'échelle 1/50000) qui devient une base de référence de la connaissance géologique d'une région, (iv) l'importance de mettre à disposition de tous les acteurs de la société, une donnée géologique fiable, pertinente et constamment mise à jour sur l'ensemble du territoire.

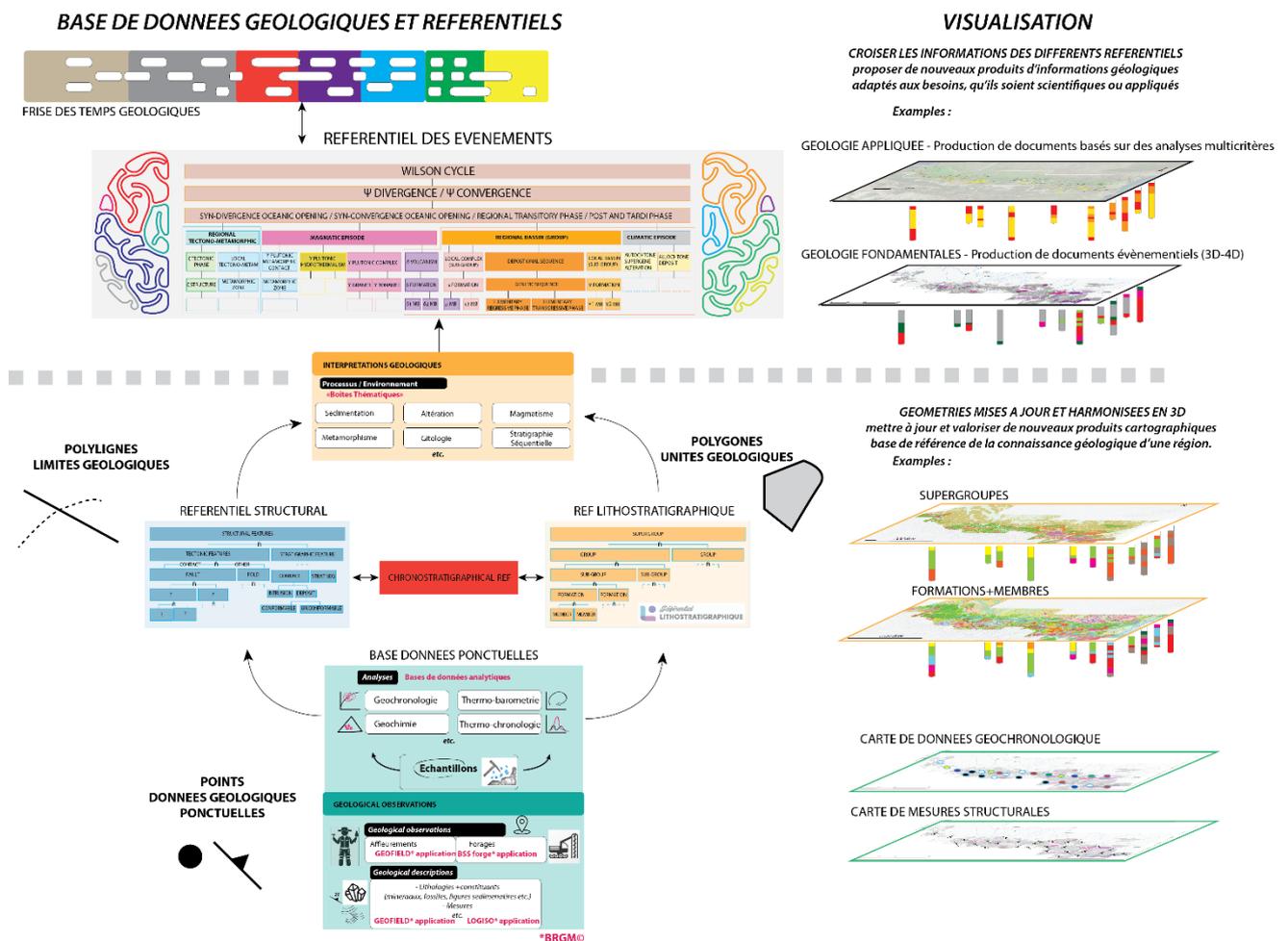


Figure 24 : Vue générale sur les différentes bases de données et référentiels du RGF (partie gauche de la figure), et les exemples de documents géologiques associés (partie droite de la figure).

La Figure 25 montre la situation clé du référentiel des évènements dans le modèle de données RGF. Ce référentiel permet de restituer l'interprétation géologique par les liens évènementiels qui associent des ensembles de données factuelles de diverses natures. À chaque étape de la chaîne de connaissance, des documents géologiques peuvent être établis (partie droite de la figure 25) depuis des visualisations des données "brutes", mises à jour et harmonisées en 3D jusqu'à des produits plus évolués, permettant de croiser différentes informations/interprétations géologiques adaptés aux besoins, qu'ils soient scientifiques ou appliqués.

En conclusion, la démarche entreprise dans le programme RGF a permis de réaliser le saut technologique entre les cartes géologiques « papier » et un système d'information numérique. Aujourd'hui, le terme de carte géologique n'est plus vraiment adapté car le RGF intègre aussi les données de forage (projet Logiso) et livre alors une information dans les trois dimensions. Cette connaissance géologique tend à être préservée et normalisée, sur l'ensemble du territoire, à travers l'élaboration des référentiels chronostratigraphique, lithostratigraphique et structural. Ces référentiels restituent dans un format numérique les informations géologiques fondamentales déjà contenues dans les cartes géologiques et les logs de forages interprétés. Le développement d'une approche « évènementielle » vise aujourd'hui à livrer une carte géologique « augmentée », qui permettra d'intégrer les avancées scientifiques issues de la recherche en géologie. Celles-ci concernent principalement la compréhension de plus en plus précise des différents processus qui ont marqué l'histoire géologique de notre territoire et qui a été traduite en termes d'évènements.

A terme, on peut penser que la carte évènementielle, dans une utilisation totalement numérique, remplacera la carte géologique « classique » puisque celle-ci pourra être restituée par un simple langage de requête informatique (de type SQL par exemple). Cette carte « héritée » ne pourrait devenir qu'une simple version dérivée de la carte géologique évènementielle. L'utilisateur, pourra donc créer sa propre carte (une carte à la carte) qu'il soit chercheur, ingénieur ou amateur averti et c'est bien là l'une des missions du BRGM que d'améliorer l'applicabilité de la carte géologique numérique (et de la géologie) à l'usage de nos concitoyens.

7. Bibliographie

- Bourgine B. et al. (2017) Building a Geological Reference Platform Using Sequence Stratigraphy Combined with Geostatistical Tools. In: Gómez-Hernández J., Rodrigo-Ilarri J., Rodrigo-Clavero M., Cassiraga E., Vargas-Guzmán J. (eds) Geostatistics Valencia 2016. Quantitative Geology and Geostatistics, vol 19. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46819-8_60
- Gabalda, S., Vernhet, Y., Rambourg, D., Prognon, C., Chevremont, P., Capar, L., Courrioux, G., Guillen, AN, Leynet, A., Martelet, G., Le Bayon, B., Baudin, T., Allier, D., Beccaletto, L., Charles, N., Dessandier, D., Dezayes, C., Roullé, A., Tertre, F. (2013). Elaboration d'un chantier RGF: retour d'expérience du chantier pilote Vosges-Fossé Rhéna. Rapport final. BRGM/RP-63008-FR. 238p.
- Hintersberger, E., Iglseider, C., Schuster, R., Huet, B., 2017. The new database "Tectonic Boundaries" at the Geological Survey of Austria. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* 157(1-4):195-207.
- Ladrière, J., (1971). Langage scientifique et langage spéculatif . In: *Revue Philosophique de Louvain*. Quatrième série, tome 69, n°1. pp. 92-132.
- Le Bayon, B., Padel, M., Baudin, T., Cagnard, F., Issautier, B., Tissoux, H., Prognon, C., Plunder, A., Grataloup, S., Lacquement, F., Hertout, A., Stephan-Perrey, J., (2022). The geological-event reference system, a step towards geological data harmonization. BSGF. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2022017>
- Mantovani, A., Piana, F., Lombardo, V., 2020. Ontology-driven representation of knowledge for geological maps. *Computers & geosciences*, 139, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104446>.
- Rauch, A., 2020. Dealing with Uncertainty and Ambiguity in Geological Maps with Focus on Bedrock Geology. Thèse de doctorat, université de Genève.
- Saeed, J.I., (2003). *Semantics*. 2nd edition. 325
- Salvador, A., 1994. *International Stratigraphic Guide*. 2nd ed. Geol Soc. America
- Schiegl, M., Schuster, R., Krenmayr, H.-G., Lipiarski, P., Pestal, G., Stöckl, W. & Untersweg, T. (2008): GeoSciML – Ein konzeptionelles Datenmodell für die Geologie? Übersetzung und Erläuterung ausgewählter Objektklassen von GeoSciML. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 148/2, 213–226, Wien.

Sen, M., Duffy, T., 2005. GeoSciML: development of a generic geoscience markup language. *Comput. Geosci.* 31 (9), 1095–1103.

Simons, B.A., Boisvert, E., Brodaric, B., Cox, S.J.D., Duffy, T.R., Johnson, B.R., Laxton, J. L., Richard, S.M., 2006. GeoSciML: Enabling the Exchange of Geological Map Data. *ASEG Ext. Abstr.* 1–4. <https://doi.org/10.1071/ASEG2006ab162>.

Tissoux H., Ricordel-Prognon C., Prognon F., Lacquement F., Bertran P., Bosq M. et Despriée J., avec la collaboration de : Daujeard C., Crégut E., Bahain J-J., Antoine P., 2020. Carte au Millionième du Quaternaire de la France métropolitaine. https://doi.org/10.18144/0__bf80ba9f-db3f-455a-9d55-24cadd052db6

Annexe 1

Brève histoire de la carte géologique : héritage et évolutions.

« Les cartes géologiques sont le véhicule par lequel les hommes communiquent leurs découvertes relatives à la nature et à la disposition de la croûte terrestre [...]. Les cartes géologiques sont des représentations très complexes, abstraites et formalisées » (Rudwick, 1976). Appliquée à la carte géologique, l'histoire des sciences a permis d'illustrer comment l'émergence d'une idée est devenue une discipline.

De nos jours, les cartes géologiques représentent la base de toute étude géologique de terrain. Si la paternité de la première carte géologique est matière à débat (Ireland, 1943; Ellenberger, 1982), son principe énoncé par Martin Lister en 1683 (Ellenberger, 1982 ; Palsky, 1999) reste d'actualité : “we shall be better able to judge of the formation of the earth, and of many phenomena relating to it, when we have well and duly examined, as far as human art can possibly reach, beginning from outside, downwards. And for this purpose it were advisable that a soil or mineral map, as I may call it, were devised. The soil might either be colored by a variety of lines or etchings, but great care must be taken very exactly to note on the map, where such and such soils are bounded”.

Au XVIII^e siècle, l'évolution du concept de carte géologique en Europe était intrinsèquement liée au développement de la carte topographique. La première intention de carte géologique peut être attribuée à Luigi Maesigli qui proposa vers 1717 une carte de Cenesta (près de Bologne, Italie) où il identifiait dans un croquis les gisements de gypse et de soufre et leur « déformation géométrique dans le paysage » (Oldroyd, 2013). Néanmoins, il faudra attendre 1761 avec Georg Christian Fùchsel pour qu'émerge en Allemagne une carte se rapprochant de la proposition énoncée par Martin Lister un siècle plus tôt. Fùchsel proposa une approche visionnaire pour représenter sur une carte (la carte de Thuringe), les relations complexes entre différentes « séries » composées de « stratus », approche qu'il nomma « scienza geognostica » (Fùchsel, 1761). Parmi ces séries, il crée le terme « mushelkalk », encore utilisé en chronostratigraphie, pour décrire un niveau particulier du Trias, riche en coquille de mollusques (Fùchsel, 1761). Ces notions de science géognostique et de séries seront ensuite utilisées puis redéfinies par Wener comme carte géognostique et Formation : les bases du concept de lithostratigraphie sont nées. Néanmoins il faudra encore attendre 1778 pour voir apparaître des couleurs pour distinguer des roches sur une carte grâce à Friedrich Gottlob Gläser (1775), et Johann Friedrich Wilhelm Charpentier (1778), cette distinction se faisant « chronologiquement les unes par rapport aux autres sur la base d'arguments géométriques » (Savaton, 2016). Ainsi, à la fin du XVIII^e siècle, l'Allemagne avec l'école de Freiberg deviendra le leader des cartes géognostiques en Europe. Outre Rhin, l'idée est désormais claire : pour représenter le sous-sol sur une carte il est nécessaire de s'appuyer sur un code couleurs qui soit en adéquation avec les principes énoncés par Sténon (1664) et Lister cent ans plus tôt. L'analyse de la chronologie relative des formations observées sur le terrain prendra la forme de ce que nous appelons aujourd'hui la chronostratigraphie.

En parallèle en France, quatre projets successifs entre 1746 et 1813 permettront de faire évoluer les concepts pour aboutir à la carte de Jean-Baptiste d'Omalius d'Halloy (1813-1816), considérée comme la première carte géologique du pays (Ireland, 1943 ; Ellenberger, 1982).

Le premier des projets dirigé par Jean-Etienne Guettard, soumis en 1746, proposait une carte entre l'Angleterre et la France montrant la répartition des différents « terrains » en fonction des caractéristiques minéralogiques du sol. Un second projet, mené par Desmarest entre 1771 et 1774 dans la région française du Mont-Dore, visait à représenter la nature et la relation entre les différents édifices volcaniques, en tenant compte de l'effet topographique pour la représentation géométrique des unités géologiques. D'après Desmarest, Giroud Solavie (1780) avec sa carte du Vivarais démontre qu'il est possible de subdiviser le sous-sol en différentes unités en fonction de leurs affinités lithologiques et de les représenter à l'aide d'un nuancier, approche similaire à celle réalisée et concrétisée par Füscher (1761) en Allemagne. En parallèle à l'essai de représentation des roches sur une carte, une autre innovation proposée par Palassou en 1781 destinée à représenter l'orientation et la structure des unités géologiques (Ellenberger, 1982) aboutit à un nouveau type de représentation : la carte structurale.

Il faudra attendre 1810 et la « carte géognostique de Paris et des environs » réalisée par Cuvier et Brogniart, directement influencés par l'école germanique, pour voir en France une carte équivalente à celles réalisées par l'école de Freiberg. Néanmoins, la première utilisation du terme « carte géologique » en France provient des travaux de Jean-Baptiste d'Omalius d'Halloy avec ses cartes de Paris (1813-1816) et celle nommée « carte géologique de la France, du pays bas et des contrées voisines » (1823).

Après ces essais prometteurs et la nécessité de comprendre la nature du sous-sol en France, le gouvernement décidera de financer en 1823 le premier programme de cartographie géologique à 1/500 000, mené par Eli de Beaumont et Dufrénoy et qui sera publié en 1841. Il s'ensuivit une cartographie départementale achevée en 1865 puis une cartographie de 67 feuilles à 1/80 000 présentées à l'exposition universelle de 1867. Son succès aboutit en 1868 à la création du « service de la carte géologique de la France » qui eut pour mission de couvrir l'ensemble du territoire à l'échelle du 1/80 000. C'est à ce Service que l'on doit aussi les premières versions des cartes géologiques à l'échelle du 1/1000 000 et du 1/320 000, cette dernière aujourd'hui oubliée. Le programme du levé cartographique à 1/50 000, quant à lui, débutera en 1913 avec l'arrivée des premiers fonds topographiques en courbes de niveau. Ce programme fut repris en 1968 par le BRGM, lorsque le Service de la carte géologique intégra ce dernier. Le programme de lever géologique à 1/50 000 est aujourd'hui relayé par le programme du RGF (Référentiel Géologique de France) qui se doit de déployer la « carte » dans les nouvelles technologies du numérique.

Rudwick, M.J.S., (1976). The emergence of a visual language for geological science 1760-1840. *History of Science*, vol.14, 3, n°25, pp.149-195 (p.159).

Ireland, A., 1943. History of the development of geologic maps. *Bulletin of the geological society of America*, vol 54. 1227-1280.

Ellenberger, F., (1982). Les premières cartes géologiques en France : projets et réalisations. 1e série, n° 45, 35 p.

Palsky, 1999. Le Code des couleurs dans les cartes géologiques du XIXe siècle. CFC, n°159.

Oldroyd, D. (2013). Maps as pictures or diagrams: The early development of geological maps. *Geological Society of America Special Paper*, 502, 41–101.

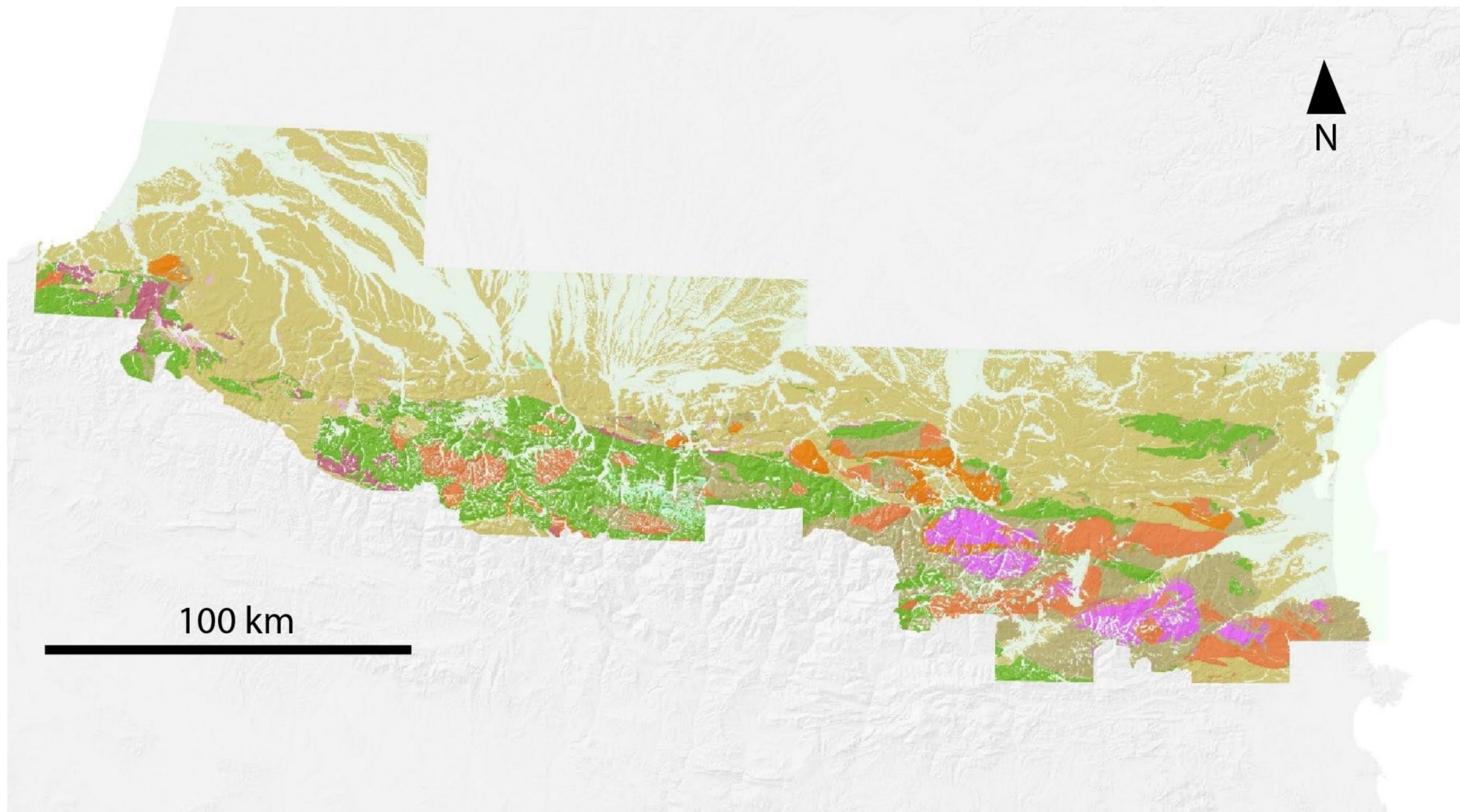
Füscher, 1761. *Historia terae et maris, ex historia thuringiae, per montium descriptionem*.

Savatou, 2016. Les temps fondateurs de la géologie. *Armand Colin, Romantisme*, n° 174.

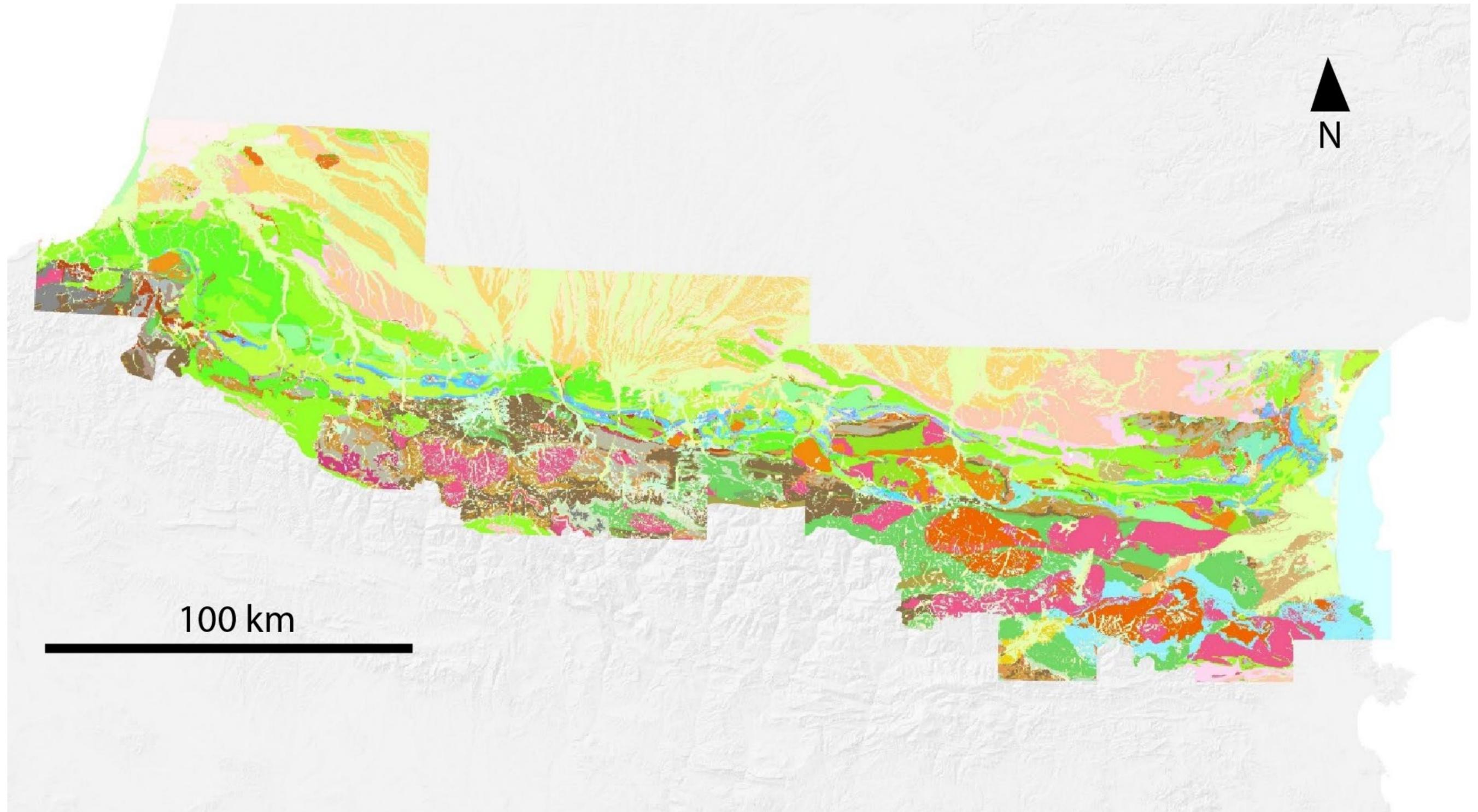
Sténon (1664). *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*.

Annexe 2

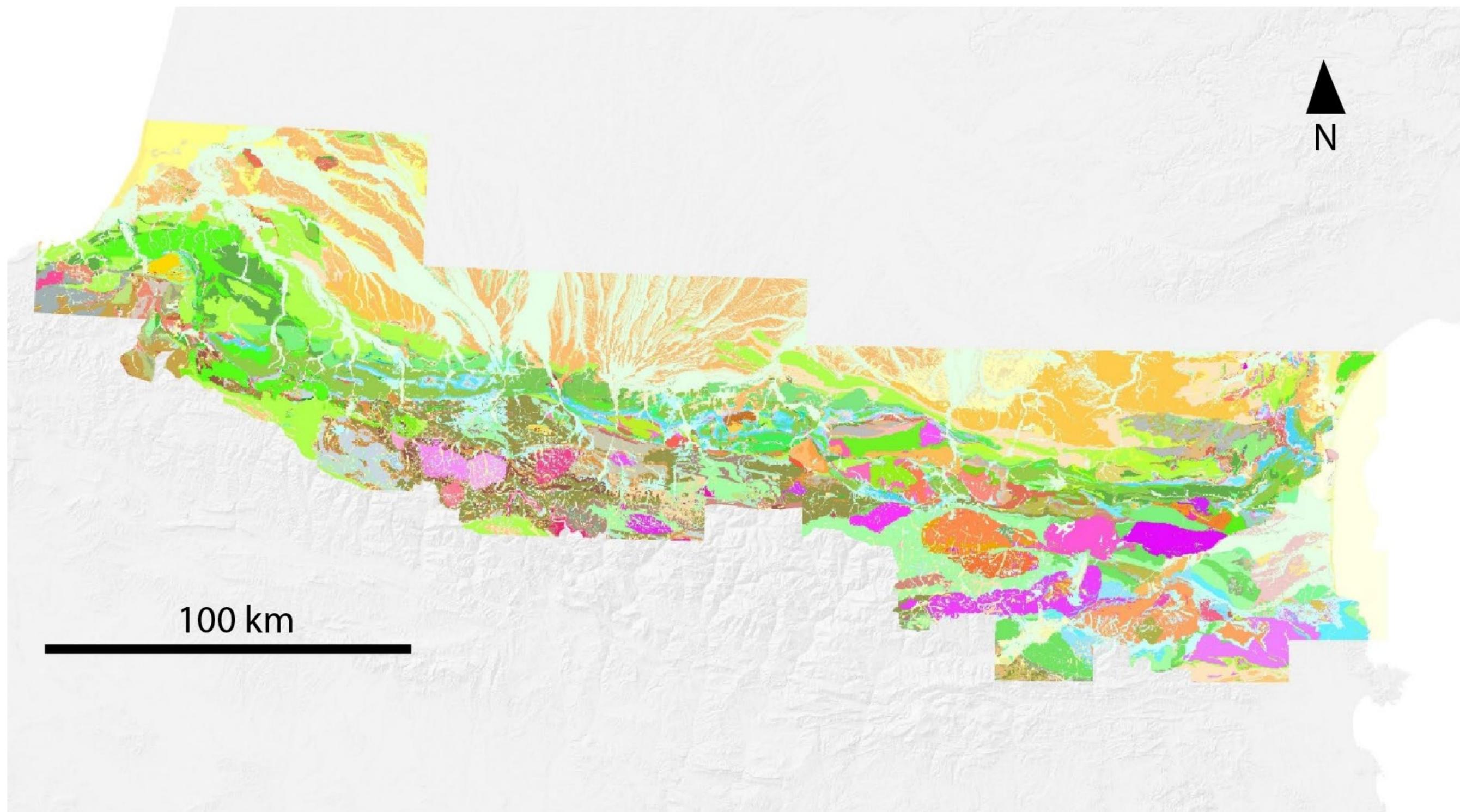
Cartes lithostratigraphiques hiérarchisées des Pyrénées



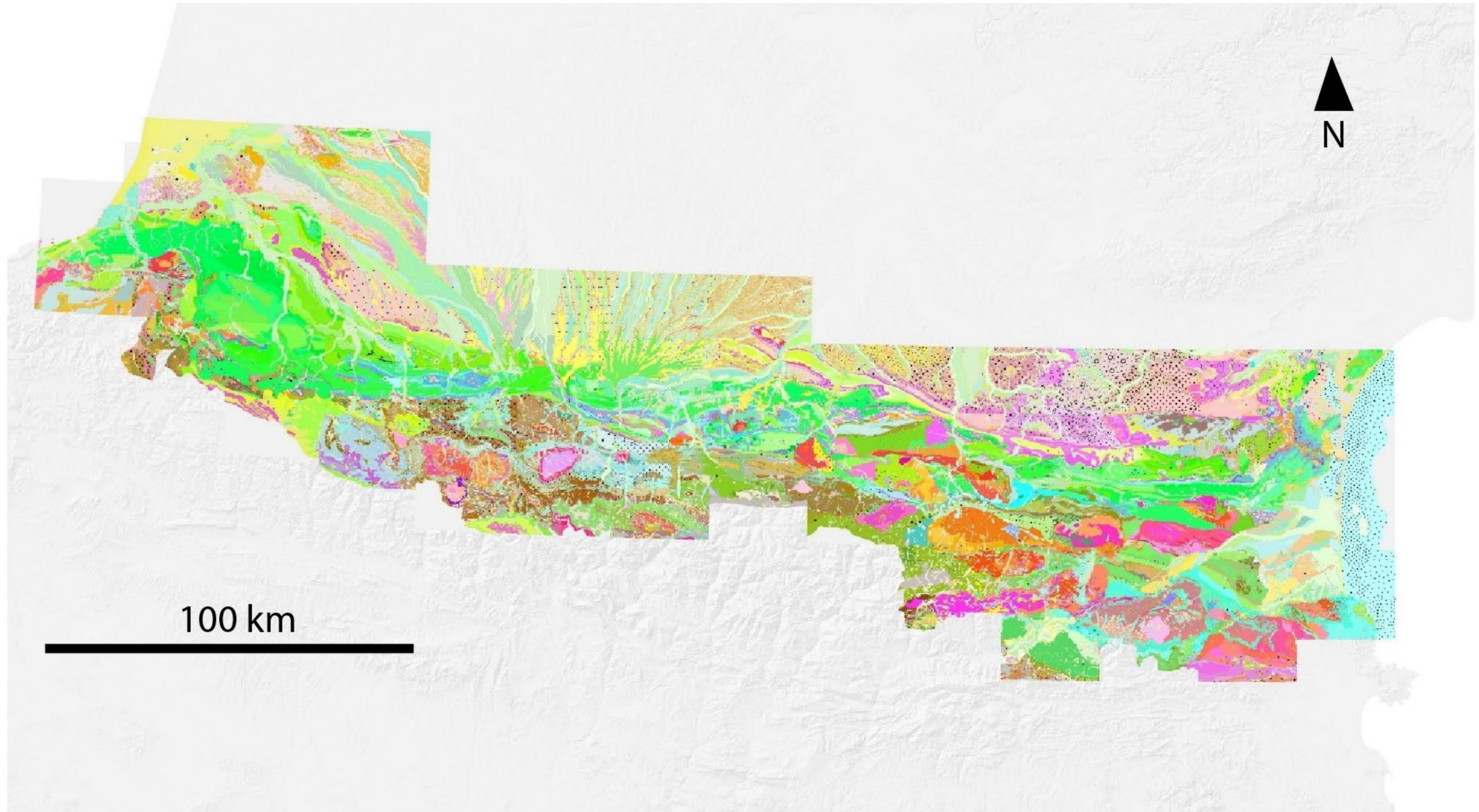
Carte simplifiée des formations géologiques de type “super-groupes” identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées



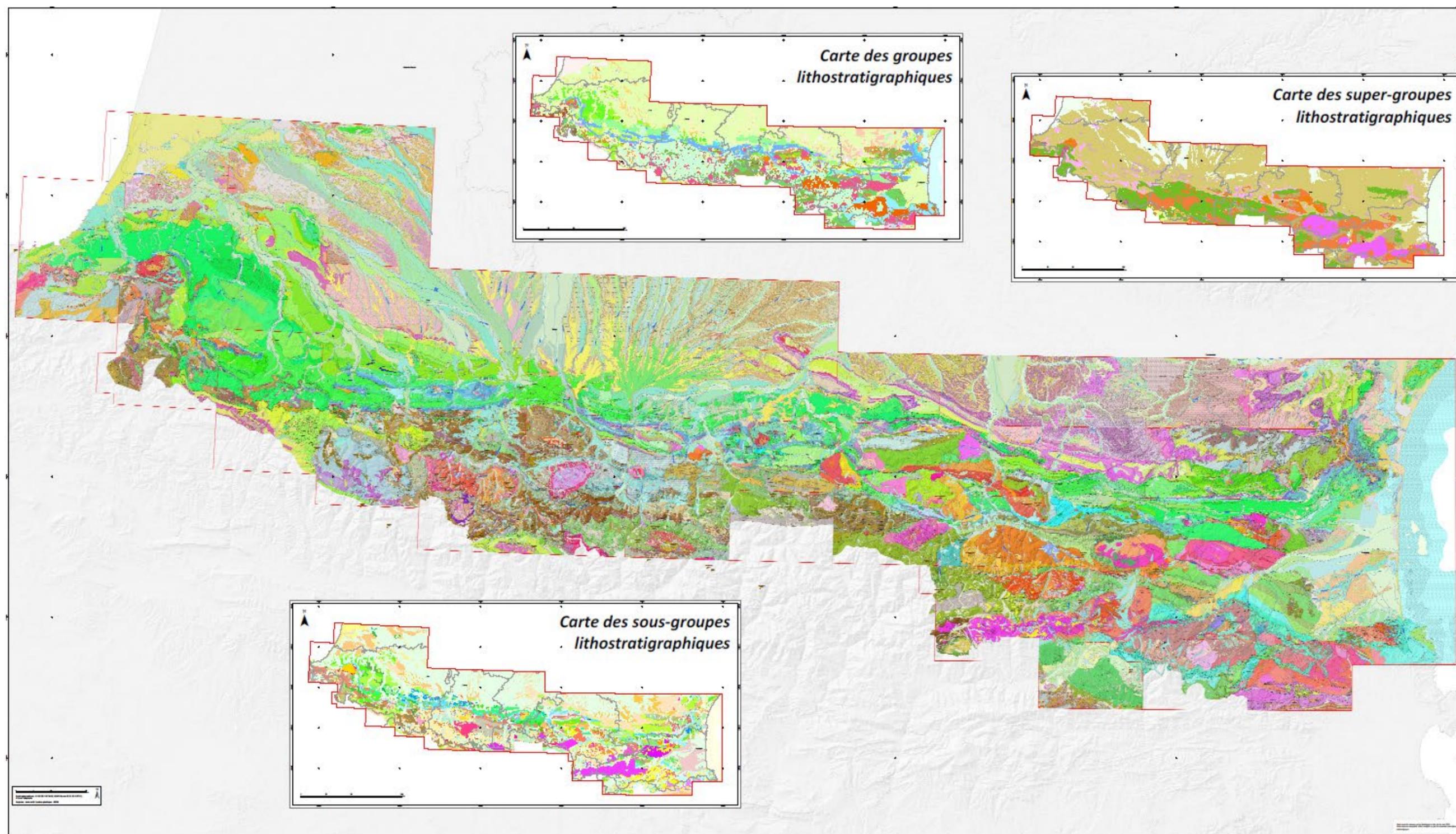
Carte simplifiée des formations géologiques de type "groupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées



Carte simplifiée des formations géologiques de type "sous-groupes" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées



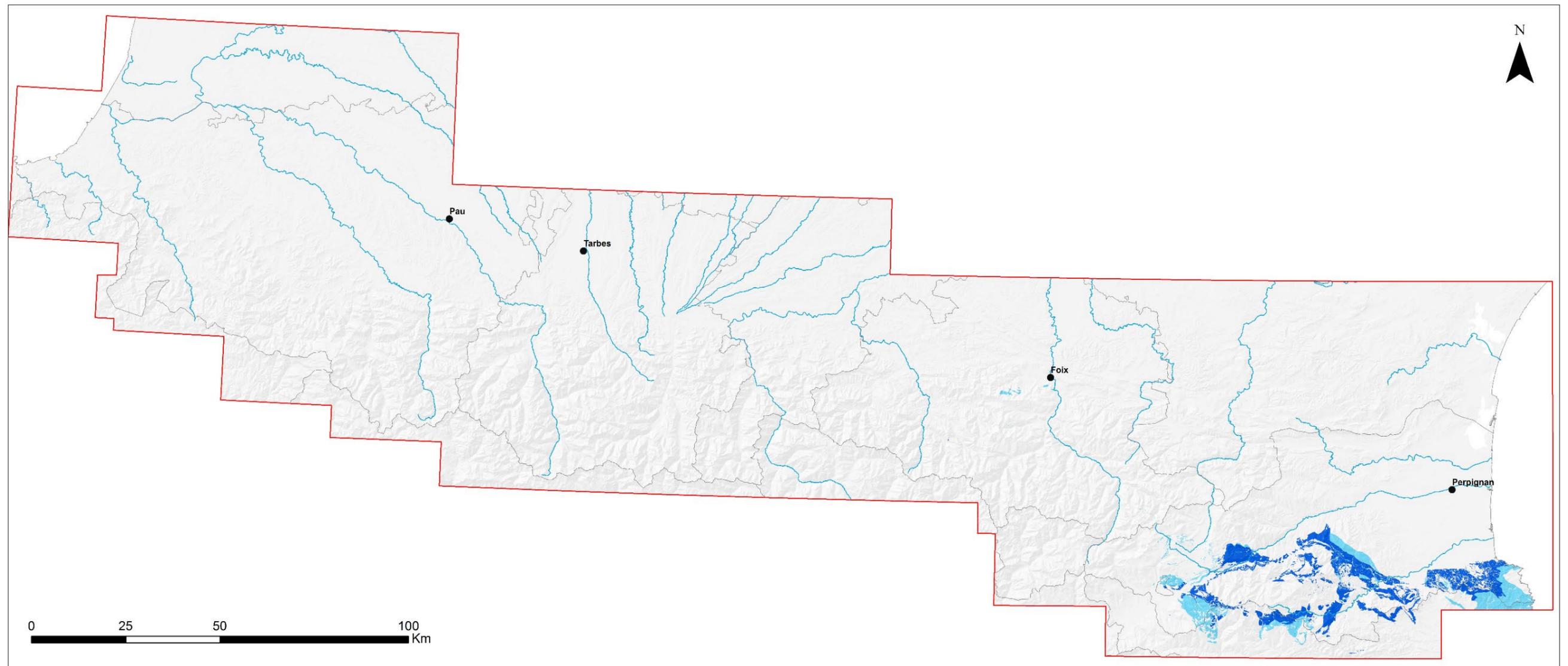
Carte simplifiée des formations géologiques de type "formation/membre" identifiées dans le cadre du chantier RGF-Pyrénées



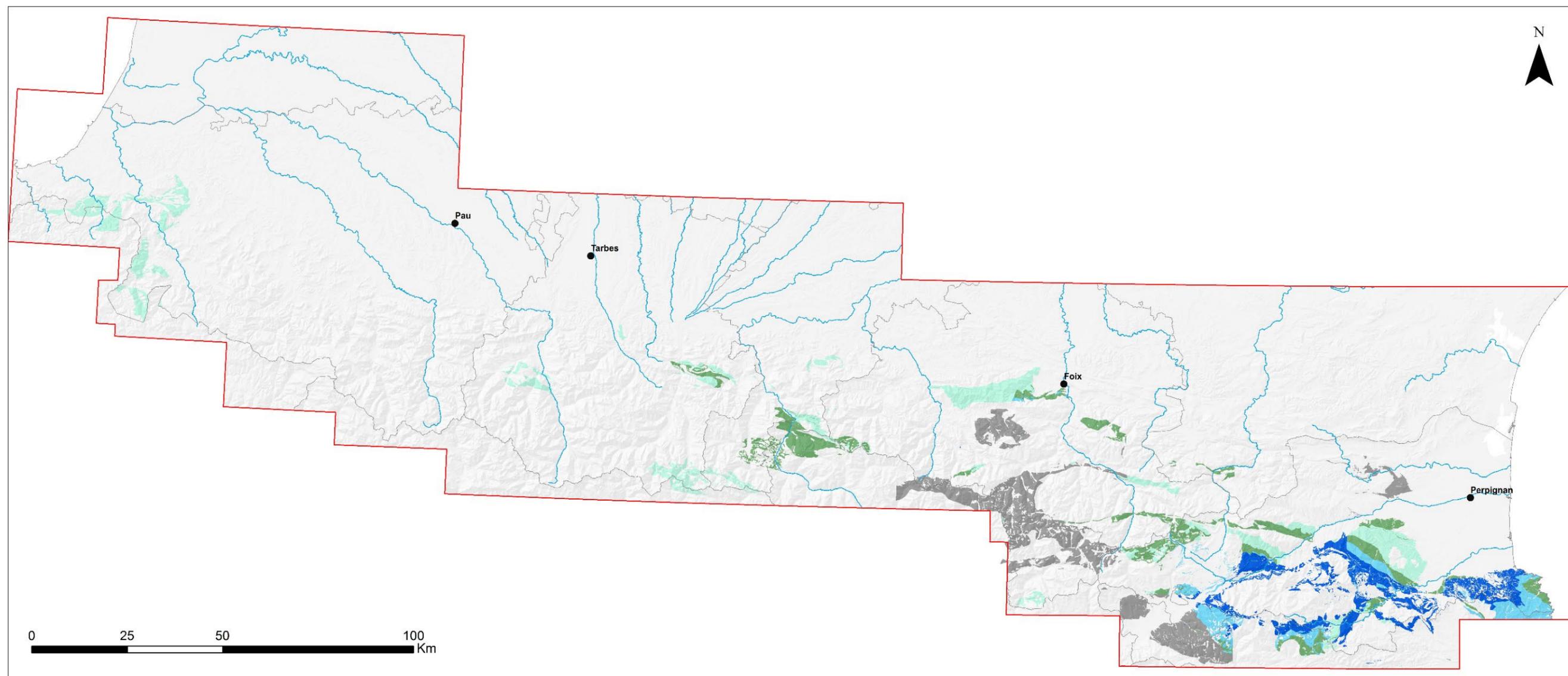
Carte géologique RGF chantier Pyrénées.

Annexe 3

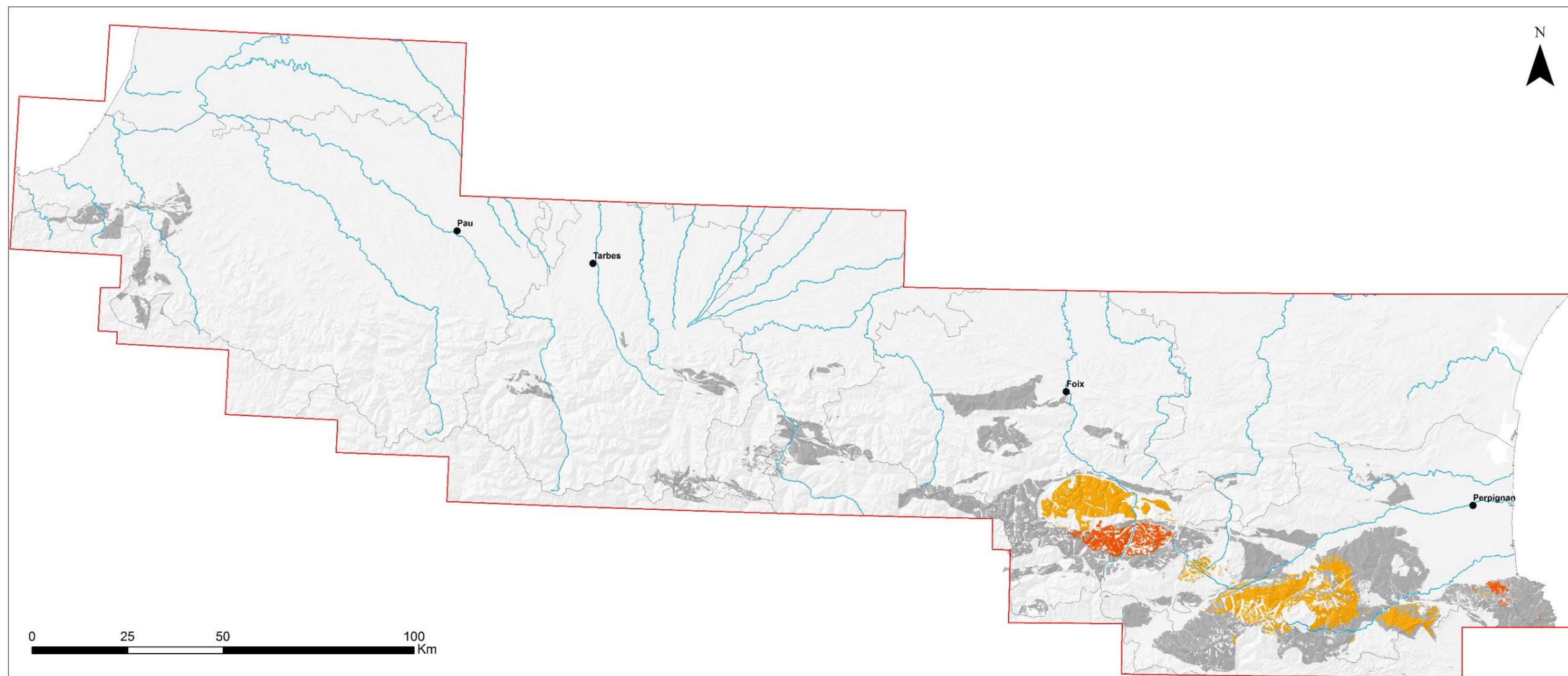
Cartes évènementielles des Pyrénées



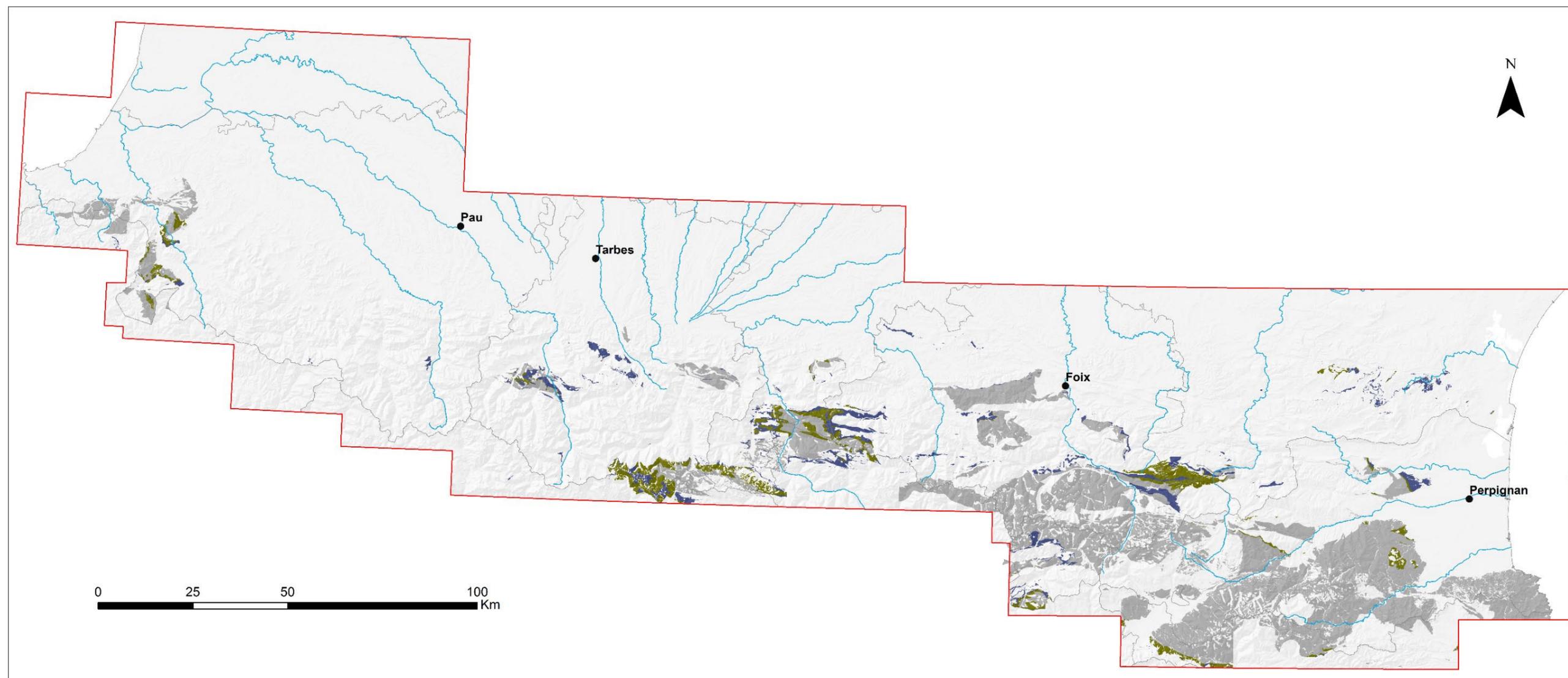
Carte géologique de l'évènement "**Bassin extensif tardi-cadomien**" (EG_8604) [Ordre 3]. En bleu foncé, les dépôts du sous-groupe de Nùria; et en bleu clair, les dépôts du sous-groupe de Setcasas.



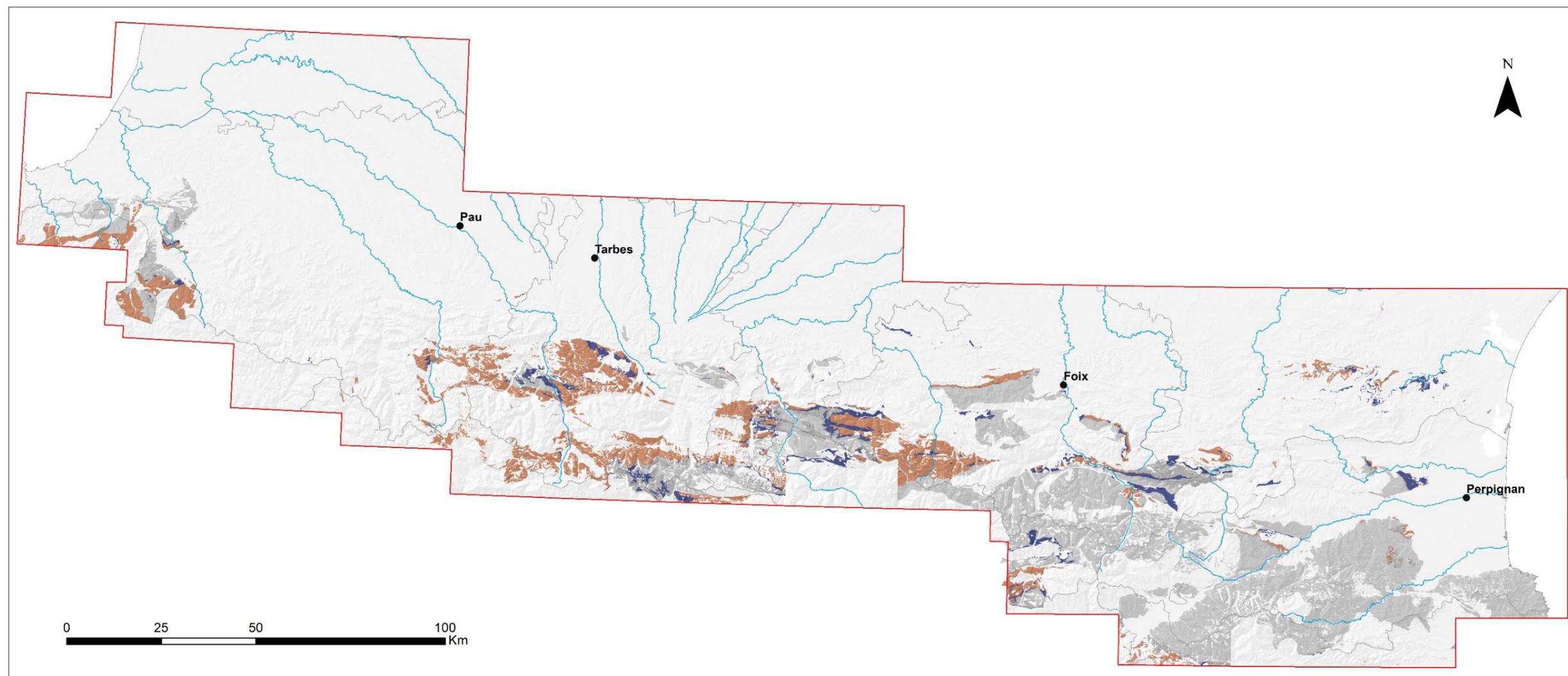
Carte géologique de l'évènement "**Phase rhéique**" (EG_8264) [Ordre 2] ammorçant la **Divergence Varisque** (EG_8775) [Ordre 2] . En vert : Bassin de la plateforme Nord Gondwaniennne des Formation d'Err et de Valcébollère ainsi que leur équivalent dans les Pyrénées Centrales du Groupe de Jujols; en turquoise : bassin marge passive épisode Rift to Drift équivalent à la Formation de Serdynia et les équivalent dans les Pyrénées Centrales et Occidentales ; (En bleu: le bassin extensif tardi-cadomien). Les zones en gris sont les roches du même âge dont l'origine du dépôt n'a pas pu être clairement identifiée par manque de données permettant de caractériser les événements à l'origine de ces dépôts.



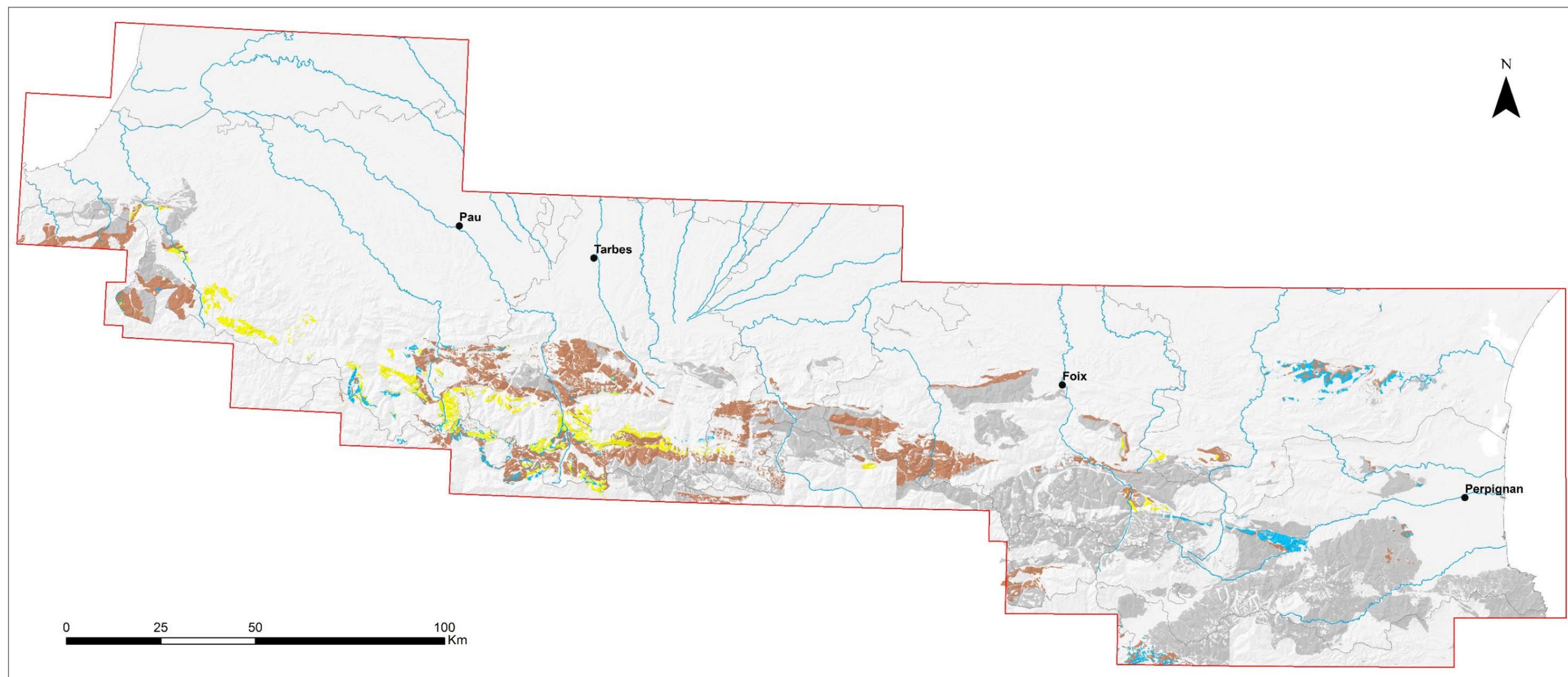
Carte géologique de l'évènement « **Plutonisme Sarde (EG_8197) [ordre 3]** ». Dans les différentes gammes d'orange, il s'agit des différents complexes plutoniques ordoviciens (Aston, Hospitalet, Canigou-Roc de Frausa, Albères). Les zones en gris sont les roches dont les protolithes sont d'âge antérieur à cet évènement de magmatisme.



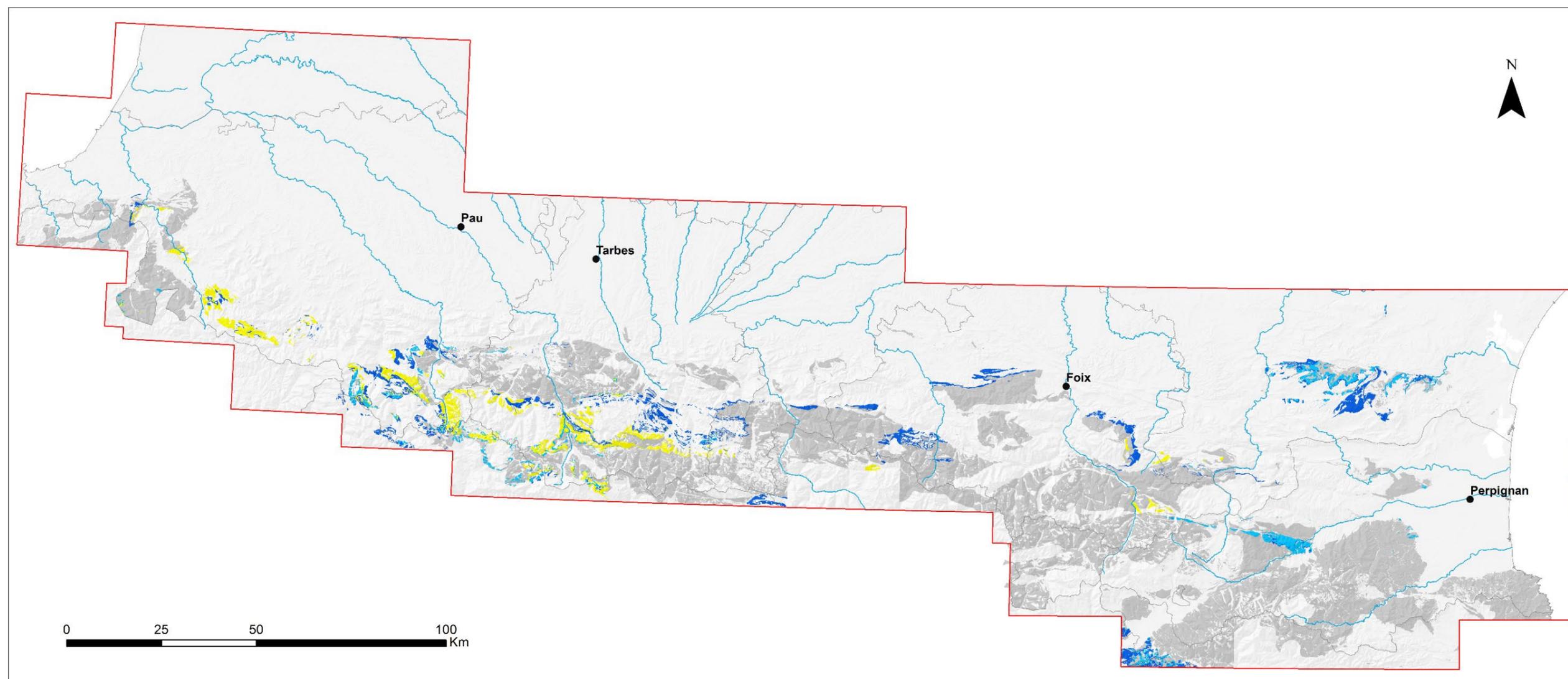
Carte géologique des événements “**Plateforme mixte de l’Ordovicien Supérieur (EG_8740) [Ordre 3]**” en verdâtre, soit les dépôts associés à la phase Sardes : et de l’évènement “**Rampe dysoxique du Silurien (EG_8776) [Ordre 3]**” en bleu marine, soit les dépôts associés au **Climax de la Divergence Varisque (EG_8775) [Ordre 2]**. Les zones en gris sont les roches dont les protolithes sont d’âge antérieur à ces événements.



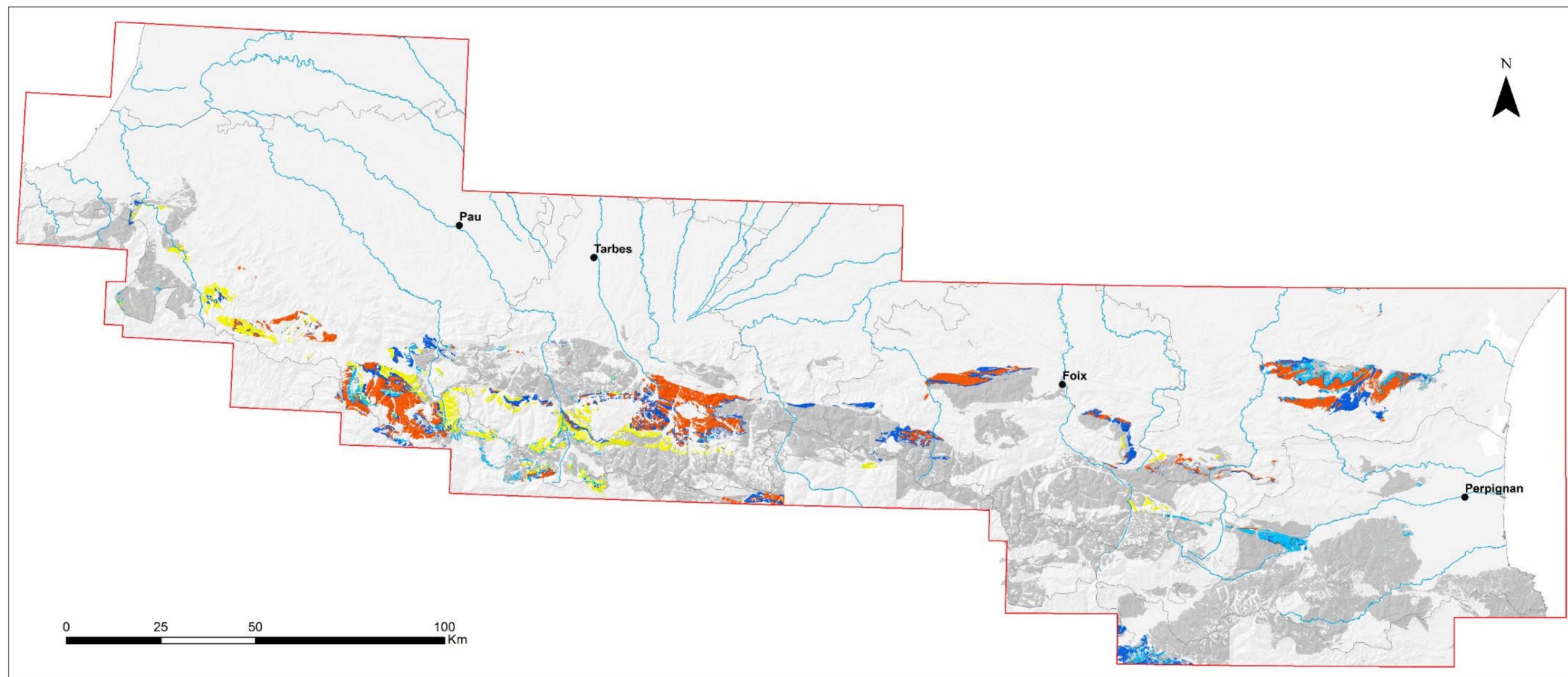
Carte géologique de l'évènement "Groupe inférieur-moyen du Dévonien (EG_8741) [Ordre 3]" et de l'évènement "Groupe des faciès de transition du Siluro-Dévonien (EG_8745) [Ordre 3]" associés au début de la Convergence Varisque (EG_8269) [Ordre 1] et plus spécifiquement de l'Ouverture Paléotéthys (EG_8699) [Ordre 2].



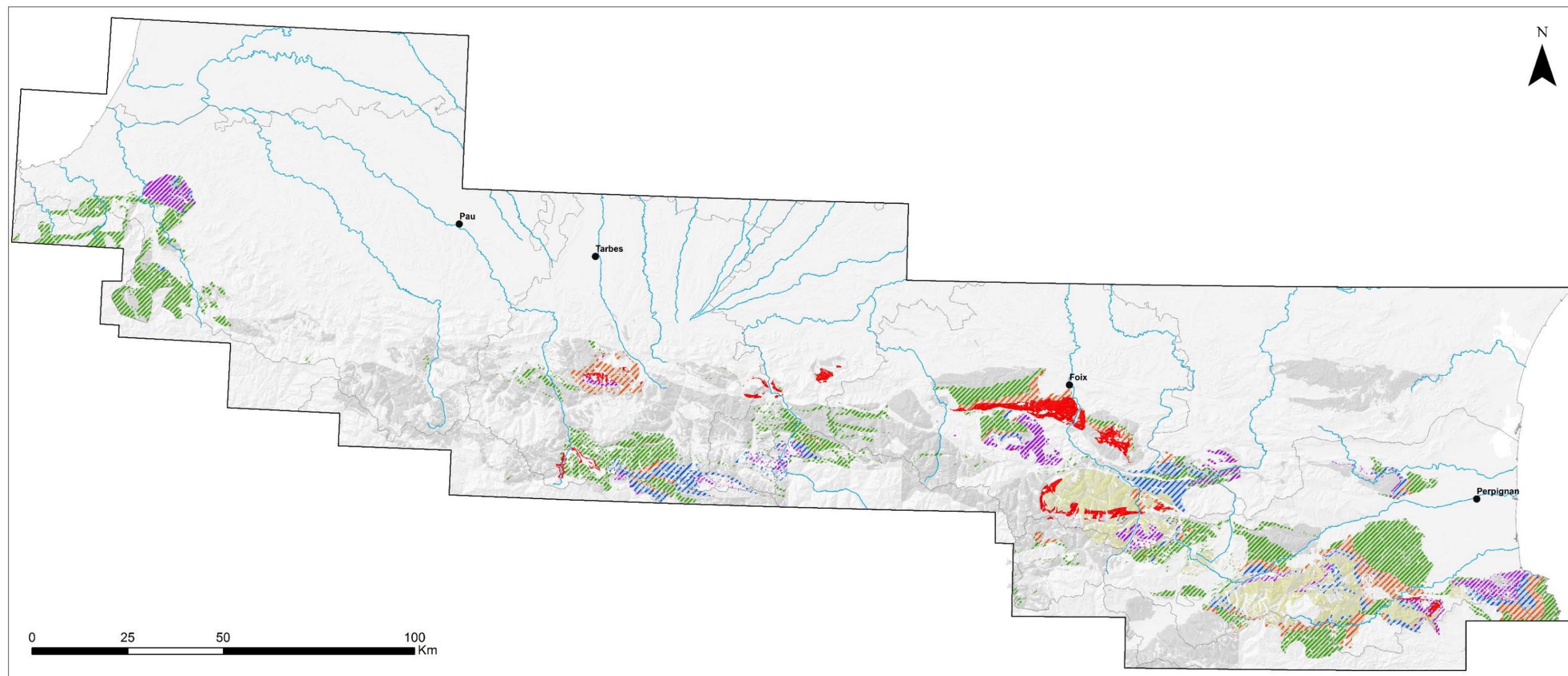
Carte géologique de l'évènement **Bassin détritique intermédiaire du Dévonien (EG_8742) [Ordre 3]** en jaune, soit les dépôts de la Formation Sia-Lariste ; et de l'évènement **Bassin carbonaté intermédiaire du Dévonien (EG_8746) [Ordre 3]** en bleu clair, soit les dépôts des Formations Larrue et Villefranche ou équivalents. L'ensemble de ces évènements sont intervenus au cours de la **Convergence Varisque (EG_8269) [Ordre 1]** et plus spécifiquement de l'**Ouverture Paléotéthys (EG_8699) [Ordre 2]**.



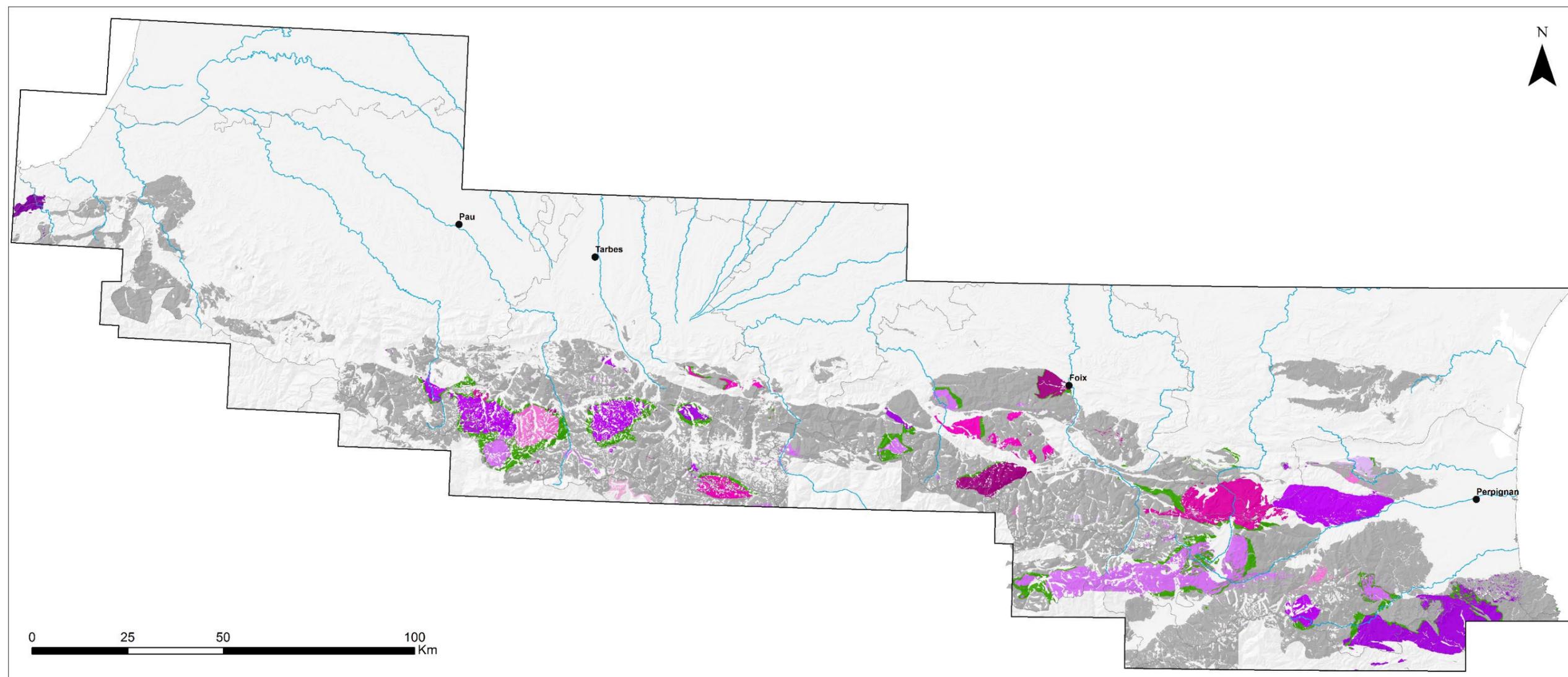
Carte géologique de l'évènement "Bassin détritique intermédiaire du Dévonien (EG_8742) [Ordre 3]" en jaune, de l'évènement Bassin carbonaté intermédiaire du Dévonien (EG_8746) [Ordre 3] en bleu clair, et finalement de l'évènement "Rampe carbonatée de la marge Paléotéthys (EG_8743) [Ordre 3]" en bleu foncé correspondant aux Calcaires Griottes et Lydiennes qui terminent l'Ouverture Paléotéthys (EG_8699) [Ordre 2].



Carte géologique de l'évènement "**Bassin syn-orogénique (faciès Culm) des Pyrénées (EG_8267) [Ordre 3]**" en orange qui enregistre sous forme de dépôt la **Phase Orogénique Varisque (EG_8268) [Ordre 2]**. Les dépôts de ces bassins se mettent en place en contact avec les dépôts précédents appartenant aux évènements "**Bassin détritique intermédiaire du Dévonien (EG_8742) [Ordre 3]**" en jaune, "**Rampe carbonatée de la marge Paléotéthys (EG_8743) [Ordre 3]**" en bleu clair et "**Rampe carbonatée de la marge Paléotéthys (EG_8743) [Ordre 3]**" en bleu foncé correspondant aux Calcaires Griottes et Lydiennes.



Carte géologique de l'évènement « **Métamorphisme régional Varisque HT-BP des Pyrénées (M2) (ET_8341) [ordre 4]** ». En hachures vertes : zone à chlorite ; en hachures oranges : zone à biotite ; en hachures bleues : zone à andalousite-staurotide ; en hachures violettes : zone à sillimanite ; en rouge : zone de fusion partielle ; en jaune : zone de métamorphisme indifférencié. Il faut savoir que l'information viens des cartes géologiques de France à 1/50 000 et donc si la représentation de cet évènement est incomplète, c'est parce que ce métamorphisme n'était pas renseigné sur certaines cartes (informations qu'il faudrait compléter sur le terrain). Les zones en gris sont les roches dont les protolithes sont d'âge antérieur à cet évènement de métamorphisme (d'âge carbonifère supérieur).



Carte géologique de l'évènement « **Magmatisme Tardi-Varisque (EG_8195) [ordre 3]** ». Dans les différentes gammes de roses-violets, il s'agit des différents complexes plutoniques (ex : Querigut, Mont-Louis, Caunterets, Néouvielle, Bordères-Louron, etc.) ; en vert : auréoles de métamorphisme de contact qui sont individualisées pour chacun des différents complexes, et rattaché à cet évènement magmatique. Cette carte montre que des évènements métamorphiques et plutoniques (Ordre 4) peuvent être réunis au sein d'un évènement magmatique (Ordre 3) qui lui-même est rattaché à un évènement géodynamique « Phase Tardi-Varisque (Ordre 2) » appartenant au stade de convergence Varisque (Ordre1). Les zones en gris sont les roches dont les protolithes sont d'âge antérieur à cet évènement de magmatisme.

Annexe 4

Calendrier des évènements dans le massif des Pyrénées



Centre scientifique et technique
Direction DGR (Direction des Géoressources)
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr