

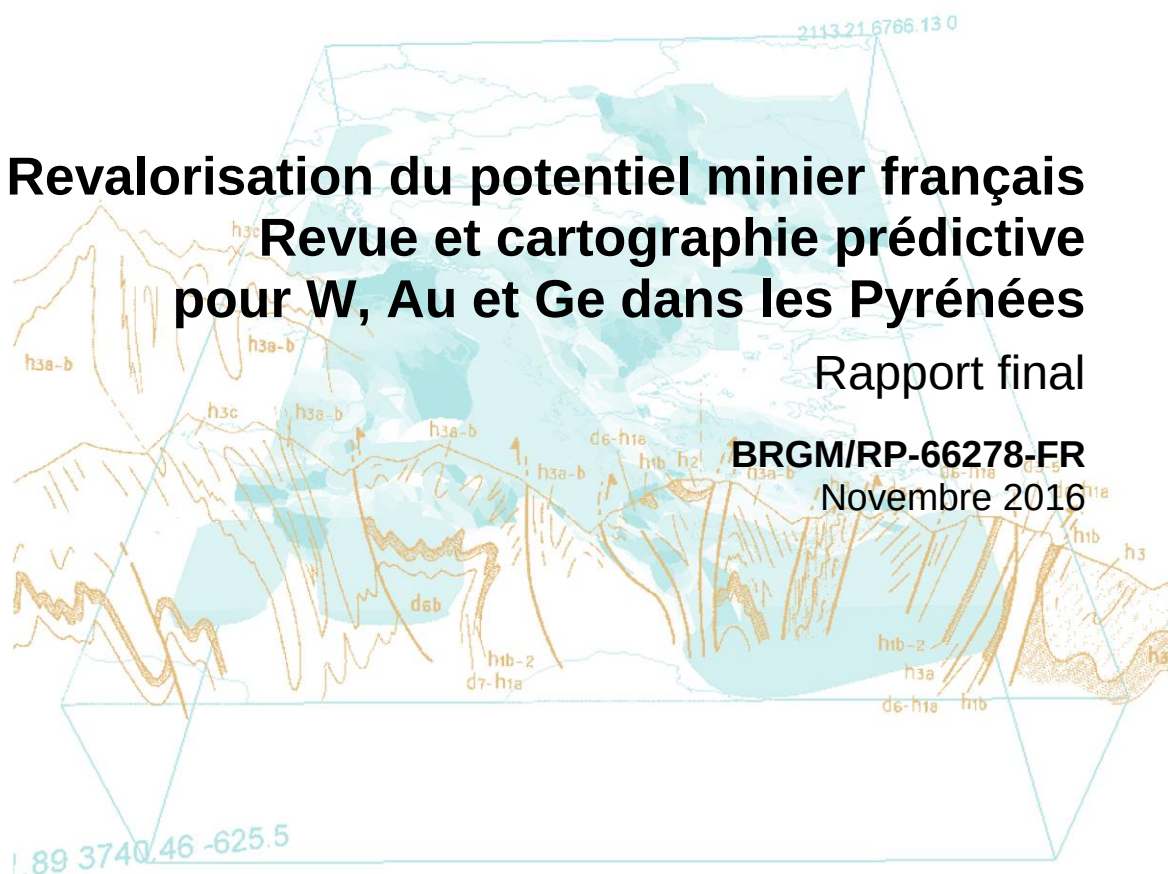
Document public

Revalorisation du potentiel minier français Revue et cartographie prédictive pour W, Au et Ge dans les Pyrénées

Rapport final

BRGM/RP-66278-FR

Novembre 2016



MINISTÈRE DE
L'ENVIRONNEMENT,
DE L'ÉNERGIE ET DE
LA MER

MINISTÈRE DE
L'ÉCONOMIE, DE
L'INDUSTRIE ET DU
NUMÉRIQUE



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Revalorisation du potentiel minier français Revue du potentiel et cartographie prédictive pour W, Au et Ge dans les Pyrénées

Rapport final

BRGM/RP-66278-FR

Novembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2016 avec le soutien du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

G. Vic, B. Tourlière

Vérificateur :

Nom : Jean Jacques Dupuy

Fonction : Correspondant APP

Date : 10/02/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : Didier Bonijoly

Fonction : Directeur adjoint de DGR

Date : 10/02/2017

Signature :



MINISTÈRE DE
L'ENVIRONNEMENT,
DE L'ÉNERGIE ET DE
LA MER

MINISTÈRE DE
L'ÉCONOMIE, DE
L'INDUSTRIE ET DU
NUMÉRIQUE

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Pyrénées, Tungstène, Or, Germanium, Zinc, Cartographie prédictive, Cell based association.

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

Vic G., Tourlière B. (2016) - Revalorisation du potentiel minier français. Revue et cartographie prédictive pour W, Au et Ge dans les Pyrénées. BRGM/RP-66278-FR, 81 p., 40 fig., 11 tabl., 1 ann.

Synthèse

Les Pyrénées : contexte géologique

La chaîne des Pyrénées est une chaîne montagneuse récente agissant comme une frontière naturelle entre la France et l'Espagne. Cette chaîne associée à l'orogénèse alpine résulte d'une collision intracontinentale entre les plaques Ibérique et Eurasie et se présente en coupe sous la forme d'un éventail dissymétrique.

La Zone Axiale des Pyrénées correspond à l'exhumation de terrains d'âge Paléozoïque, déformés et métamorphisés lors de l'orogénèse hercynienne. Elle est composée de métasédiments, de plutons hercyniens et de dômes gneissiques (Aston, Hospitalet et Canigou) dont l'origine est laccolitique en intrusion dans une série sédimentaire d'âge Cambrien à Ordovicien supérieur.

L'essentiel des gisements et indices métalliques se situent dans les terrains paléozoïques des Pyrénées. Deux domaines sont particulièrement fertiles concernant les minéralisations principales : (i) le domaine cambro-ordovicien pour des minéralisations de fer, zinc, antimoine, cuivre, manganèse, etc. et (ii) le domaine d'âge Carbonifère moyen à supérieur pour le tungstène associé à la mise en place des granites hercyniens.

Évolution géologique de l'Infracambrien au post-hercynien et minéralisations associées

- **Infracambrien et Cambrien** : Les séries infracambriennes et cambriennes correspondent aux âges les plus anciens de la zone axiale des Pyrénées. Il s'agit de séries schisto-gréseuses d'épaisseur plurikilométrique divisées en trois entités principales: (i) le groupe de Canaveilles ; (ii) le « sous-groupe » d'Évol ; (iii) le « sous-groupe » de Jujols.

Aucune minéralisation ne semble se mettre en place au cours du Cambrien qui peut cependant être l'encaissant de minéralisations ultérieures.

- **Ordovicien et phases sardes associées** : L'Ordovicien supérieur repose en discordance sur les dépôts rattachés au Cambrien et à l'Ordovicien inférieur. La phase sarde est à l'origine d'une lacune de l'Ordovicien moyen, il s'agit d'un court évènement transpressif marqué successivement par la fragmentation et par des réorganisations locales de la marge du Gondwana. Antérieurement à cette phase se mettent en place les grands laccolithes granitiques d'affinité calco-alcaline, en contexte extensif.

Les minéralisations zincifères, de type SEDEX, semblent se développer au cours de cette période en réponse aux événements sardes.

- **Silurien** : Il s'agit d'une série de schistes noirs d'environ 200 m de puissance présents sur l'ensemble de la zone axiale. Ce faciès de régime calme marque l'extension maximale du domaine océanique et a servi de niveau de décollement lors de la déformation hercynienne.

Les schistes noirs du Silurien ne renferment pas de minéralisations significatives connues.

- **Dévonien** : Les dépôts du Dévonien forment une épaisse série, pouvant atteindre 2 500 mètres d'épaisseur, de nature différente suivant les domaines. Ils sont essentiellement carbonatés au centre et à l'est des Pyrénées et de nature flyshoïde silico-clastique à l'ouest et au sud. Le passage du Silurien au Dévonien est généralement tectonique, mais avec, à la base du Dévonien, une persistance de la sédimentation riche en matière organique.

Le Dévonien (essentiellement inférieur) renferme de nombreuses minéralisations de zinc-plomb apparentées aux minéralisations SEDEX de l'Ordovicien, mais aussi de façon plus marginale des gîtes de manganèse, fer, fluorine, magnésite et barytine, répartis dans toute la colonne stratigraphique.

- **Séquences syn-orogéniques varisques du Carbonifère moyen** : Il s'agit de dépôts de type flysch grésopélitiques et conglomératiques associés à un remplissage chaotique et puissant caractéristique d'une avant-fosse orogénique. La région pyrénéenne au cours du cycle varisque se situe au niveau de la zone externe méridionale du domaine orogénique, tardivement impliquée dans la déformation qui a été déconvoluée en trois étapes majeures (D1, D2 et D3).

L'essentiel des minéralisations d'importance économique sont en liaison avec le magmatisme hercynien majeur (305 à 300 Ma). Il s'agit principalement de skarns à scheelite tels que les gisements de Salau et Costabonne.

- **Le domaine post-hercynien** : La phase hercynienne de compression et d'épaississement crustal est suivie par une extension caractéristique de l'évolution structurale tardive des Pyrénées. La transition entre les phases compressives et extensives correspond au hiatus sédimentaire du Carbonifère et au passage d'une sédimentation marine à une sédimentation continentale sans minéralisation associée.

Les principales minéralisations des Pyrénées

Les données disponibles concernant les minéralisations dans les Pyrénées sont importantes mais anciennes (plus de 20 ans) et sans mise à jour des connaissances. Elles correspondent aux cartes métallogéniques des feuilles de Toulouse et de Marseille, à une base de données pour les indices miniers issue de la BD « PROMINE », à des rapports et travaux scientifiques, ainsi qu'aux données géochimiques des travaux de l'Inventaire minier national. Les minéralisations majeures qui ressortent de cette étude sont les minéralisations de zinc-plomb, d'or et de tungstène.

- Les minéralisations de tungstène (W)

Le tungstène n'est pas une substance historiquement exploitée dans les Pyrénées. La prospection du tungstène a débuté dans les années 1950 au marteau et à la lampe UV de Wood sur les skarns afin de tracer les domaines à scheelite. La première découverte fut le gisement non exploité de Costabonne (Pyrénées Orientales) en 1951, suivi du gisement de Salau (Ariège) en 1960 qui a été exploité de 1970 à 1986. Cependant, les travaux de prospection pour le W sont très incomplets et ne couvrent pas la totalité de la Zone Axiale des Pyrénées. 3 domaines d'anomalies W de premier plan sont mis en évidence (Salau, Costabonne et Hougarril) avec les gisements de Salau et de Costabonne qui doivent être les cibles privilégiées pour toute reprise d'activité d'exploration et d'exploitation dans la Zone Axiale des Pyrénées.

- Les minéralisations aurifères (Au)

Les résultats des travaux (prospections alluvionnaire et géochimique) indiquent une répartition complexe des minéralisations aurifères sur l'ensemble de la Zone Axiale et Nord Pyrénéenne, correspondant à plusieurs phénomènes distincts développant des minéralisations diffuses et de basse teneur. Le type or orogénique en liaison avec les grandes structures hercyniennes ne semble pas être clairement représenté et l'or primaire est particulièrement méconnu, mis à part quelques indices dans les Pyrénées orientales (Aspres, Nohèdes, Glorianne).

Cette thématique serait donc à reprendre depuis un stade amont, en envisageant des objectifs non conventionnels.

- **Les minéralisations de zinc-plomb + germanium (zinc - plomb + Ge)**

Le district zincifère des Pyrénées est un district historique avec de nombreux travaux d'exploration et d'exploitation de tailles diverses. Les minéralisations de Zinc - plomb sont encaissées dans les formations carbonatées ordoviciennes et dévoniennes et sont de type SEDEX. La mine de Pierrefitte représente l'exploitation la plus importante de la région avec plus de 2 Mt de minerai produits à une teneur moyenne de 8 % de Zinc - plomb. 3 domaines d'anomalies Zinc - plomb de premier plan sont mis en évidence (Bentaillou, Carboire et Pierrefitte) et l'objectif principal à développer en priorité concerne le gisement d'Arrens (domaine de Pierrefitte) qui est considéré comme étant l'un des principaux gisements français pour le zinc et le principal pour la barytine.

Cartographie prédictive

Des études de cartographie prédictives ont été produites pour 3 substances (W, Au et Ge) qui confirment l'intérêt des zones situées autour des gîtes connus mais qui mettent aussi en évidence des zones à fort potentiel de découvertes surtout localisées dans les Pyrénées orientales (W et Au) et les Pyrénées centrales (W, Au et Ge)

Bilan général

Au regard des besoins en métaux stratégiques et parmi toutes les substances pouvant présenter un intérêt économique, le tungstène semble constituer l'objectif principal de toute reprise d'activité. Outre les gisements de Costabonne et de Salau à développer en priorité, la totalité des anomalies W, même les plus ténues, mérite des contrôles détaillés. En effet une cible majeure telle que Salau, ne produit à l'échelle stratégique que des anomalies relativement discrètes portées par 2 ou 3 points anomaliques. Dans ce cadre, le domaine du Hougaril constitue un secteur favorable à la reprise de travaux de terrain de type prospection géochimique et marteau dans un premier temps.

Concernant l'or, les travaux anciens sont très incomplets. La présence d'indices et de prélèvements géochimiques à teneurs élevées mais très dispersés montrent que cette thématique est à reprendre depuis un stade amont et qu'il existe un potentiel de découverte, éventuellement de type non conventionnel.

Pour le zinc, la priorité est le développement du gisement d'Arrens dont le potentiel est déjà circonscrit mais nécessite des travaux pour confirmer sa viabilité économique. Des minéralisations zincifères des Pyrénées sont connues pour contenir du germanium mais leur potentiel économique est mal connu et nécessiterait des investigations complémentaires tant sur les gîtes connus que sur de nouvelles cibles.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contexte géologique	13
2.1. LA CHAÎNE ACTUELLE DES PYRÉNÉES	13
2.2. LA ZONE AXIALE DES PYRÉNÉES.....	14
2.3. LES DÔMES GNEISSIQUES DE LA ZONE AXIALE (ASTON, HOSPITALET ET CANIGOU).....	15
2.4. OROGÉNÈSE VARISQUE ET MISE EN PLACE DES GRANITES.....	15
2.5. LES RESSOURCES MINÉRALES DANS LES PYRÉNÉES	17
3. Évolution géologique et minéralisations associées	19
3.1. INFRACAMBRIEN ET CAMBRIEN	19
3.2. ORDOVICIEN ET PHASES SARDES ASSOCIÉES.....	21
3.3. SILURIEN	22
3.4. DÉVONIEN	22
3.5. SÉQUENCES SYN-OROGÈNIQUE VARISQUE (CARBONIFÈRE MOYEN).....	24
3.6. LE DOMAINE POST-HERCYNIEEN	25
3.7. BILAN DE L'ÉVOLUTION MÉTALLOGÉNIQUE HERCYNIEENNE	25
4. Les minéralisations à tungstène (w)	27
5. Les minéralisations aurifères	33
6. Les minéralisations à zinc-plomb (+ germanium)	37
7. Cartographie prédictive	41
7.1. PRINCIPES ET TECHNIQUES.....	41
7.1.1. Weight of Evidence (WoE)	41
7.1.2. CBA (Cell Based Association).....	42
7.2. RECODAGE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE	43
7.2.1. Codage lithologique	43
7.2.2. Codage stratigraphique.....	44
8. Cartographie prédictive pour W	47
8.1.1. Weight of Evidence	47
8.1.2. CBA par CAH.....	49

8.1.3.CBA par fréquences sur les indices	50
8.1.4.CBA par fréquences sur la géochimie	53
8.1.5.Synthèse - Zones prospectives	54
8.2. CARTOGRAPHIE PRÉDICTIVE POUR OR.....	59
8.2.1.CBA par CAH.....	59
8.2.2.CBA par fréquences sur les indices	61
8.2.3.CBA par fréquences sur la géochimie	61
8.2.4.Synthèse - Zones prospectives	62
8.3. CARTOGRAPHIE PRÉDICTIVE POUR GERMANIUM (PB-ZN)	67
8.3.1.CBA par CAH.....	68
8.3.2.CBA par fréquences sur les indices	69
8.3.3.Synthèse des zones favorables pour Ge (Zinc - plomb).....	70
9. Conclusion.....	73
10. Bibliographie	75

Liste des figures

Figure 1 : Les Pyrénées, cadre topographique et provinces	13
Figure 2 : Profil ECORS sud-nord de la chaîne des Pyrénées présentant les principales unités décollées. CFSP = Chevauchement Frontal Sud-Pyrénéen, CFNP = Chevauchement Frontal Nord-Pyrénéen, FNP = Faille Nord Pyrénéenne. (Beaumont <i>et al</i> , 2000).	13
Figure 3 : Synthèse du plutonisme, de la tectonique et du métamorphisme du segment varisque des Pyrénées. CV = Cinco Villas, Ur = Ursuya, Bo = Dôme de Bossost, Ar = Arize, TS = Trois-Seigneurs, SB=Saint-Barthélemy, As = Dôme de l'Aston, Ho = Dôme de l'Hospitalet, Can = Canigou, Ag = Agly, FNP = Faille Nord-Pyrénéenne. (Denele <i>et al</i> , 2009).....	14
Figure 4 : Positionnement supposé du segment varisque des Pyrénées dans le contexte géodynamique de l'orogène Hercynien selon Matte, (2001).	16
Figure 5 : Carte des gisements historiquement exploités dans les Pyrénées	17
Figure 6 : Carte géologique simplifiée de la zone axiale des Pyrénées avec la localisation des dômes gneissiques (Aston, Hospitalet et Canigou) et des massifs granitiques hercyniens.	20
Figure 7 : Carte de localisation des minéralisations de W des Pyrénées classées selon leurs typologies.	27
Figure 8 : Carte couplant les résultats de la prospection géochimique et alluvionnaire du W réalisé par le BRGM dans la Zone Axiale et les massifs Nord Pyrénéens avec la localisation des indices W de l'inventaire minier du BRGM, de l'ancienne mine de Salau et des grands domaines d'anomalies.	29
Figure 9 : Carte de localisation des minéralisations Au des Pyrénées classées selon leurs typologies.	33
Figure 10 : Carte couplant les résultats de la prospection géochimique et alluvionnaire de l'Au réalisé par le BRGM dans la Zone Axiale et les massifs Nord Pyrénéens avec la localisation des indices Au de l'inventaire minier du BRGM et des grands domaines d'anomalies	35
Figure 11 : Carte de localisation des minéralisations Zinc - plomb (Ge, Ag, Cu) des Pyrénées.	37

Figure 12 : Carte des résultats des campagnes de prospection géochimique BRGM et SNEAP du Pb dans la Zone Axiale et les massifs Nord Pyrénéens avec la localisation des indices et anciennes mines de zinc-plomb et des grands domaines d'anomalies.	39
Figure 13 : Carte géologique des Pyrénées synthétisée (recodage). Source RGF.....	45
Figure 14 : Zoom de la carte géologique synthétisée des Pyrénées (source RGF)	45
Figure 15 : Résultats du Weight of Evidence pour le W à l'échelle des Pyrénées.	47
Figure 16 : Zoom sur le Weight of Evidence pour W sur les Pyrénées.	48
Figure 17 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par CAH à l'échelle des Pyrénées.	49
Figure 18 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées.	51
Figure 19 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées orientales.	52
Figure 20 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées centrales.	52
Figure 21 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées atlantiques.....	53
Figure 22 : Résultats de la CBA par somme des fréquences pour les échantillons de géochimie à plus de 40 ppm de W. Les zones ayant fait l'objet d'un échantillonnage de type Inventaire ont été contourées en jaune.....	54
Figure 23 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées orientales.	55
Figure 24 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées centre-est.....	56
Figure 25 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées centrales.	57
Figure 26 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées centre-ouest.....	58
Figure 27 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées atlantiques.	59
Figure 28 : CBA par CAH à 250 groupes. Sélection des cellules (surlignées en jaune) comptant au moins un indice primaire à or.	60
Figure 29 : Carte des résultats de la prédictivité Au par la méthode de la CBA par somme des fréquences à l'échelle des Pyrénées.	61
Figure 30 : Carte des résultats de la prédictivité Au par la méthode de la CBA par somme des fréquences pour les échantillons de géochimie à plus de 25 ppb d'or à l'échelle des Pyrénées.	62
Figure 31 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or - Pyrénées orientales	63
Figure 32 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or - Pyrénées centre-est.....	64
Figure 33 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or - Pyrénées centrales	65
Figure 34 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or - Pyrénées centre ouest	66
Figure 35 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or - Pyrénées atlantiques	67
Figure 36 : Carte géologique synthétisée et indices à germanium (ronds jaune).....	68
Figure 37 : CBA par CAH à 250 groupes. Sélection des cellules (surlignées en jaune) contenant au moins un indice à germanium.	68
Figure 38 : Carte des résultats de la prédictivité Ge par la méthode de la CBA par somme des fréquences à l'échelle des Pyrénées.	69

Figure 39 : Carte des résultats de la prédictivité Ge par les méthodes de la CBA à l'échelle des Pyrénées orientales et centrales.....	70
Figure 40 : Carte des résultats de la prédictivité Ge par les méthodes de la CBA à l'échelle des Pyrénées centrales et atlantiques.....	71

Liste des tableaux

Tableau 1 : Codes lithologiques utilisés pour la synthèse géologique à partir des données RGF	44
Tableau 2 : Codage stratigraphique pour les formations anté-mésozoïques	44
Tableau 3 : Valeurs du WoE pour les formations favorables à la présence d'indices à W.....	48
Tableau 4 : Tableau des associations présentes dans les groupes de CAH associés à un indice Promine.	50
Tableau 5 : Résultats des calculs de fréquences par formations associées aux indices W Promine.	51
Tableau 6 : Rapport des fréquences des formations entre les cellules contenant au moins un échantillon de géochimie à W > 40 ppm et la population générale.	54
Tableau 7 : Associations lithostratigraphique principales présentes dans les cellules issues de la CBA par CAH contenant au moins un indice primaire à or - lydiennes en bleu, roches volcanique ou volcano-sédimentaires en rose, calcaires en vert et intrusifs magmatiques en rouge.....	60
Tableau 8 : Rapport des fréquences des formations entre les cellules contenant au moins un indice primaire à or et la population générale.	61
Tableau 9 : Rapports de fréquence entre les cellules contenant au moins un échantillon avec Au > 25 ppb et la population générale.	62
Tableau 10 : Associations lithostratigraphique principales présentes dans les cellules issues de la CBA par CAH contenant au moins un indice à germanium - lydiennes et roches volcano-sédimentaires en vert, roches volcaniques en rose et intrusifs magmatiques en rouge.....	69
Tableau 11 : Rapport des fréquences des formations entre les cellules contenant au moins un indice à Ge et la population générale.....	70

Liste des annexes

Annexe 1 : Carte prédictive de synthèse pour W, Au et Ge dans les Pyrénées.....	79
---	----

1. Introduction

Les Pyrénées correspondent à une chaîne montagneuse récente, située en limite de la péninsule Ibérique et de la France, de longueur de l'ordre de 430 km et de largeur de l'ordre d'une centaine de km. Cette chaîne récente, (< 40 millions d'années - Éocène) associée à l'orogénèse alpine, réactive des terrains anciens du Paléozoïque (> 300 Ma) qui contiennent l'essentiel des minéralisations métalliques. Le domaine de socle affleure dans la Zone Axiale et les massifs nord-pyrénéens et dans une moindre mesure les Massifs Basques.

En France, le domaine paléozoïque des Pyrénées correspond à une superficie totale de l'ordre de 8 300 km² dont environ les deux tiers ont fait l'objet de travaux de prospection, principalement dans le cadre de l'inventaire minier national qui s'est achevé dans les années 1990. Ces travaux ont compris des relevés d'anciennes mines, de la prospection marteau, des prélèvements alluvionnaires en batée, de la géochimie sur des sédiments de ruisseaux (stream sediments) ainsi que, sur les zones d'intérêt, des compléments de géochimie (principalement sol) et de géophysique, des sondages et des travaux miniers de reconnaissance.

Les résultats majeurs de cette phase sont la mise en évidence de trois cibles de premier plan, Arrens pour le zinc et la barytine (Hautes-Pyrénées), Salau (Ariège) et Costabonne (Pyrénées Orientales) pour le tungstène qui ont fait l'objet de trois fiches de promotion à la demande du MEEM.

Dans le cadre de cette revue du potentiel métallifère du massif pyrénéen, une synthèse du contexte géologique général et, plus spécifiquement celui des formations paléozoïques associées aux minéralisations connues ainsi qu'une cartographie minérale prédictive ont été réalisées à l'échelle de la chaîne pour 3 types de minéralisations à potentiel économique :

- **le tungstène** qui représente incontestablement la cible principale dans les Pyrénées hercyniennes qui sont, avec la Montagne Noire et le sud de la Sardaigne, une province métallique majeure pour cette substance avec des potentialités importantes pour de nouvelles découvertes. Deux cibles principales, Salau en Ariège et Costabonne dans les Pyrénées Orientales, ont déjà été caractérisées. Leur importance réelle ainsi que des extensions complémentaires à proximité restent à circonscrire à une échelle très locale. À une échelle plus régionale des indices, principalement de scheelite, des zones à scheelite en batée, ainsi que des anomalies géochimiques peu ou pas contrôlées montrent l'importance du phénomène minéralisé. L'étude de ces domaines anomaliques, l'utilisation de modèles géologiques faisant intervenir les paramètres géologiques et l'utilisation de méthodes dites « prédictives » (WoE, weight of Evidence et CBA Cell Based Association, Tourlière *et al.*, 2015) permettent de souligner l'intérêt de certains nouveaux domaines très prioritaires ;
- **l'or** dont la métallogénie est mal cernée et se prête mal à une interprétation classique de type « or orogénique ». Il a été insuffisamment exploré et le potentiel de présence de gisements économiques est mal connu ;
- **les minéralisations Pb-Zn (Ge)** forment un vaste district dans les Pyrénées Centrales, avec trois anciennes exploitations minières, et un gisement non exploité, Arrens, d'ordre de grandeur économique. La maturité du district (plus de 150 indices connus correspondent à des petites exploitations et à des travaux de reconnaissance), l'absence d'anomalie géochimique inédite, les incertitudes concernant le modèle d'exploration à privilégier et les gammes relativement faibles des tonnages (de l'ordre de 1 Mt) et teneurs (entre 5 et 10 % Zn) font qu'aucun nouveau sujet prioritaire n'est proposé dans le district. Toutefois, la présence parfois signalée de germanium pourrait être un facteur valorisant pour ces gisements.

D'autres substances métalliques existent dans les Pyrénées comme l'indiquent les cartes métallogéniques répertoriant les indices connus et la compilation des anomalies géochimiques réalisée par Tourlière *et al.* (2015). La valorisation des niveaux de manganèse et des horizons phosphatés du Carbonifère n'est pas envisageable en raison de volumes et teneurs limités et des impacts environnementaux. Les autres indices sont pour la plupart de petite taille en liaison avec des filons et filonnets hercyniens parfois remobilisés au Pyrénéen comme par exemple les filons à sidérite-chalcopyrite avec sulfures de cobalt subordonnés. Ne subsistent que des cibles mal caractérisées à antimoine et un certain nombre d'anomalies polymétalliques complexes à Cu-Mo (Sb, Au, W) qui seraient à intégrer dans les travaux de prospection du tungstène.

2. Contexte géologique

2.1. LA CHAÎNE ACTUELLE DES PYRÉNÉES

La chaîne des Pyrénées est une chaîne montagneuse située dans le sud-ouest de l'Europe formant une frontière naturelle entre la péninsule ibérique et le reste du continent. Avec un âge de formation de la fin du paléocène au début de l'oligocène cette chaîne, associée à l'orogénèse alpine, s'étend de la mer Méditerranée à l'est jusqu'à l'océan Atlantique à l'ouest sur une longueur de 430 Km. La largeur maximale nord-sud est de 150 Km (Figure 1).

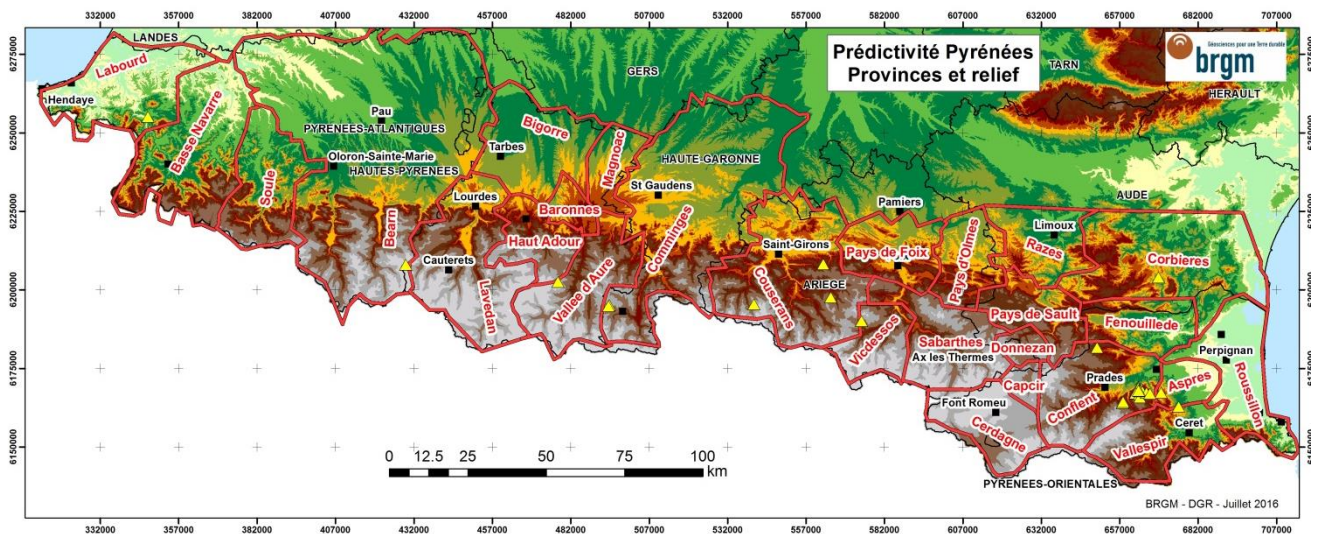


Figure 1 : Les Pyrénées, cadre topographique et provinces.

D'un point de vue géologique, les Pyrénées résultent d'une collision intracontinentale entre la plaque ibérique et la plaque eurasiennne. Cette chaîne se présente sous la forme d'un éventail dissymétrique de part et d'autre d'un accident crustal, connu sous le nom de Faille Nord Pyrénéenne, avec des chevauchements à vergence sud bien développés vers le sud et des chevauchements à vergence nord peu développés au nord (Figure 2).

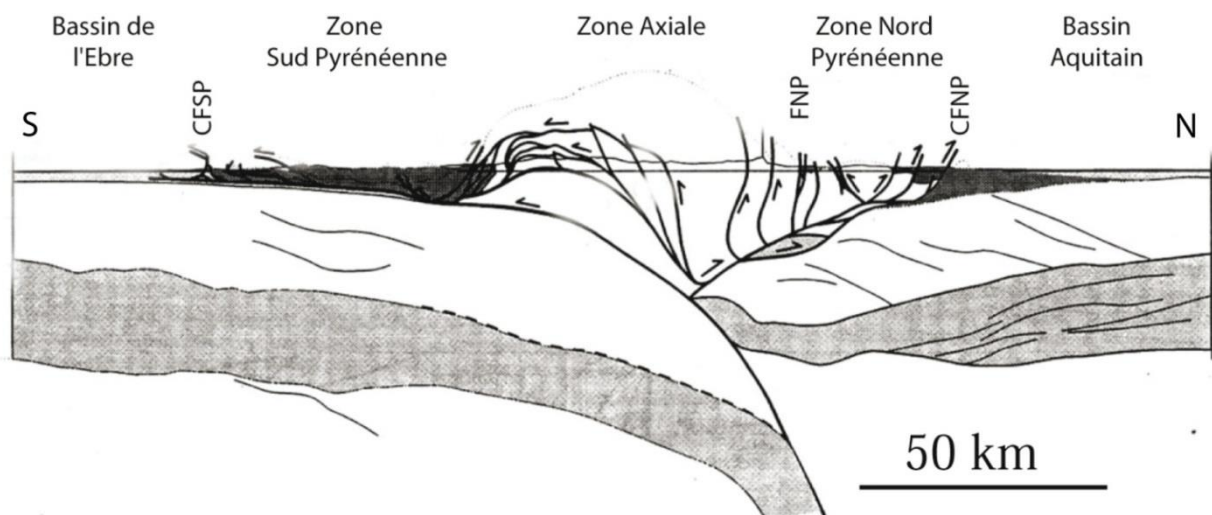


Figure 2 : Profil ECORS sud-nord de la chaîne des Pyrénées présentant les principales unités décollées.
CFSP = Chevauchement Frontal Sud-Pyrénéen, CFNP = Chevauchement Frontal Nord-Pyrénéen,
FNP = Faille Nord Pyrénéenne. (Beaumont et al, 2000).

Au nord de la Faille Nord-Pyrénéenne (FNP) on rencontre la Zone Nord-Pyrénéenne constituée de dépôts mésozoïques, de matériel cristallin paléozoïque dits Massifs Nord-Pyrénéens ainsi que des massifs de roches ultrabasiques de type lherzolithe (e.g. les massifs de Lherz, de Fontête Rouge, de Moncoup-Arguenos). Cette Zone Nord-Pyrénéenne chevauche ensuite au nord l'avant pays plissé composé de terrains d'âges Mésozoïque à Cénozoïque couverts par des dépôts post-tectoniques oligo-miocènes du bassin Aquitain.

Au sud de la FNP se trouve la Zone Axiale composée de métasédiments enregistrant un métamorphisme HT-BP, de plutons hercyniens et de dômes gneissiques (Aston, Hospitalet et Canigou). Au sud de la zone Axiale, la Zone Sud-Pyrénéenne est caractérisée par une succession de chevauchements transposés vers le Sud sous forme de nappes. Ces chevauchements ont pour base les formations évaporitiques du Trias et affectent les formations sédimentaires secondaires et tertiaires. Le Chevauchement Frontal Sud-Pyrénéen (CFSP) marque la transition entre la Zone Sud-Pyrénéenne et le bassin de l'Ebre composé d'un remplissage sédimentaire molassique oligo-miocène.

2.2. LA ZONE AXIALE DES PYRÉNÉES

La Zone Axiale est constituée de terrains paléozoïques métamorphiques et déformés de nature métapélitiques, de dômes gneissiques et de plutons plurikilométriques constitués essentiellement de granitoïdes calco-alcalins d'âge Carbonifère (Figure 3).

On considère donc cette Zone Axiale ainsi que les Massifs Nord-Pyrénéens comme l'exhumation d'un segment varisque dans les Pyrénées dont la position initiale dans l'orogène hercynienne reste discutée, bien que Barnolas et Chiron (1996) placent ce segment varisque des Pyrénées au niveau de la bordure sud de l'orogène hercynien.

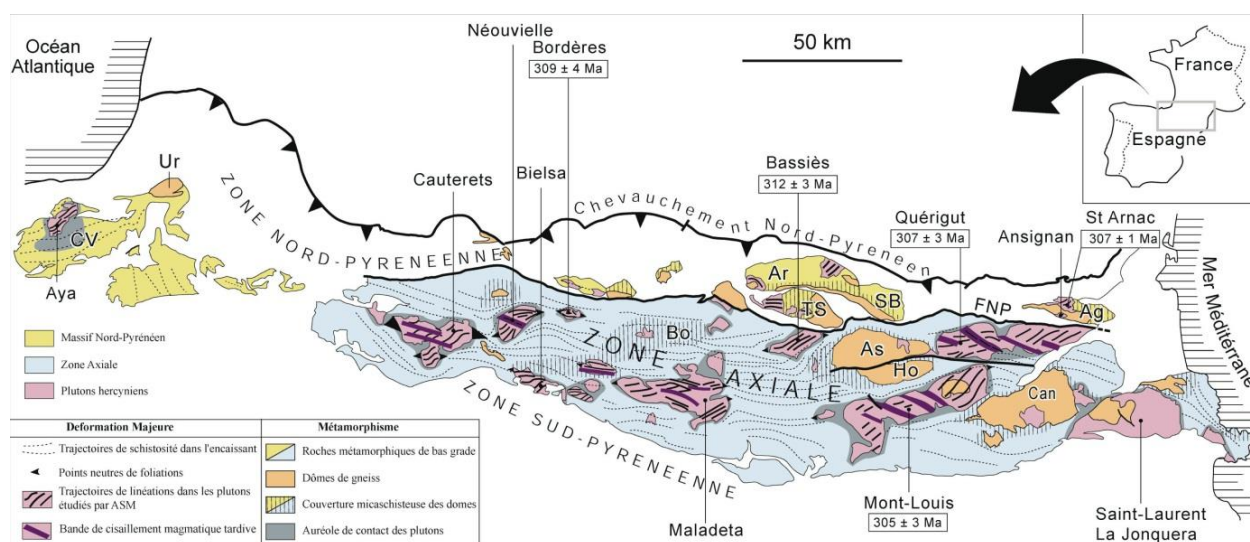


Figure 3 : Synthèse du plutonisme, de la tectonique et du métamorphisme du segment varisque des Pyrénées. CV = Cinco Villas, Ur = Ursuya, Bo = Dôme de Bossost, Ar = Arize, TS = Trois-Seigneurs, SB = Saint-Barthélemy, As = Dôme de l'Aston, Ho = Dôme de l'Hospitalet, Can = Canigou, Ag = Agly, FNP = Faille Nord-Pyrénéenne. (Denele et al., 2009).

2.3. LES DÔMES GNEISSIQUES DE LA ZONE AXIALE (ASTON, HOSPITALET ET CANIGOU)

Le modèle actuel concernant les dômes gneissiques proposé par Denèle *et al.* (2007, 2009a, 2009b et 2015) est récent et concerne essentiellement les dômes de l'Aston (Ariège), de l'Hospitalet (Ariège) et du Canigou (Pyrénées Orientales).

Les cœurs orthogneissiques des dômes de la Zone Axiale des Pyrénées, dont le protolite a été daté de l'Ordovicien inférieur (environ 470 Ma, Deloule *et al.*, 2001 ; Cocherie *et al.*, 2005 ; Denèle *et al.*, 2009), ont une origine laccolitique intrusive dans une série sédimentaire paléozoïque cambrienne dont le métamorphisme est de haute température et basse pression (HT-BP ; Barbey *et al.*, 2001).

La période ordovicienne est marquée par une phase extensive importante au nord et à l'ouest de l'Europe occidentale avec notamment, d'après Matte (2001), l'ouverture de l'océan Galicia Southern Brittany qui sépare le micro-continent Armorica du Gondwana. Le magmatisme associé à cette phase extensive est particulièrement bien enregistré dans les Pyrénées le Massif Central et le domaine méridional varisque (Maures-Tanneron, Corse et Sardaigne).

L'étude géochimique de ces laccolites granitiques indique une affinité calco-alcaline (Roger, 2004) dont l'origine serait issue principalement d'un point chaud (Von Raumer, 2003) légèrement couplé à de la fusion partielle par décompression adiabatique.

On associe donc la mise en place des laccolites ordoviciens à la phase extensive (Roger, 2004) de la même période en Europe de l'ouest et du nord.

Ces laccolites ont été affectés lors de l'orogénèse varisque par trois grands épisodes de déformation dont l'axe de compression nord-sud reste sensiblement le même. Le paramètre au cœur du modèle géodynamique sera alors la réponse de la structure à la contrainte en fonction de la température. En effet à haute température, la déformation ductile affectera toute la structure. L'état intermédiaire permettra la mise en place d'un plissement à grande échelle. En domaine plus froid, la déformation s'exprimera sous forme de bandes mylonitiques cisailantes.

La succession de déformations affectant ces dômes gneissiques s'étend du Viséen terminal au Carbonifère supérieur pendant l'orogénèse hercynienne.

2.4. OROGÉNÈSE VARISQUE ET MISE EN PLACE DES GRANITES

La chaîne varisque est le résultat de la formation d'un super continent : la Pangée. La surrection d'une grande chaîne de montagne au Paléozoïque va ainsi être le résultat d'une collision dû à la convergence nord-ouest / sud-est de deux blocs continentaux, le Gondwana au sud et la Laurussia au nord. Selon Matte (2001). La formation de cette chaîne peut se résumer en trois grands processus qui s'étalent sur plus de 150 millions d'années :

- (i) Vers 465 Ma, le Gondwana et la Laurussia sont séparés par trois océans et deux microcontinents. Une succession de subductions et d'obductions va peu à peu refermer les bassins océaniques ce qui va provoquer la collision entre les deux supercontinents ;
- (ii) Le Dévonien (380 Ma) marque la période de mise en place des principales nappes. Le Gondwana va subduire sous la microplaque Avalonia entraînant la propagation de grandes nappes de charriages de haut degré métamorphique sur un autochtone schisteux. Cette chaîne de collision va être caractérisée par un épaississement crustal dû à l'empilement de ces nappes ;

(iii) Vers 310 Ma, la chaîne va rentrer dans un régime mature et chaud avec la mise en place de failles normales et l'effondrement gravitaire de celle-ci. La remontée des isogrades va entraîner une fusion partielle de la croûte profonde, ce qui va permettre la mise en place de granites intrusifs syntectoniques entraînant un métamorphisme de contact, accompagné d'un métamorphisme HT-BP.

Dans ce cadre, la problématique concernant l'évolution des Pyrénées et du sud de l'Europe reste mal comprise. Matte (2001) place le segment varisque des Pyrénées dans le domaine externe méridional de la ceinture orogénique hercynienne (Figure 4).

Néanmoins, la présence de granitoïdes calco-alcalins intrusifs datés entre 310 et 295 Ma n'entre pas en adéquation avec un domaine externe, généralement froid.

Une hypothèse pourrait apporter un élément de réponse à cette problématique. Le bassin d'avant pays dans lequel on situe le domaine varisque des Pyrénées est pincé au cœur du domaine hercynien et est littéralement traversé par la paléo-Faille Nord-Pyrénéenne (Figure 3, d'après Matte, 2001), qui joue un rôle décrochant associé à un phénomène de transpression. Ce mouvement transpressif pourrait être à l'origine d'une hausse de la température sous le bassin d'avant pays permettant ainsi la fonte de la croûte inférieure et la mise en place de granites intrusifs illustré par un modèle de type shear-heating.

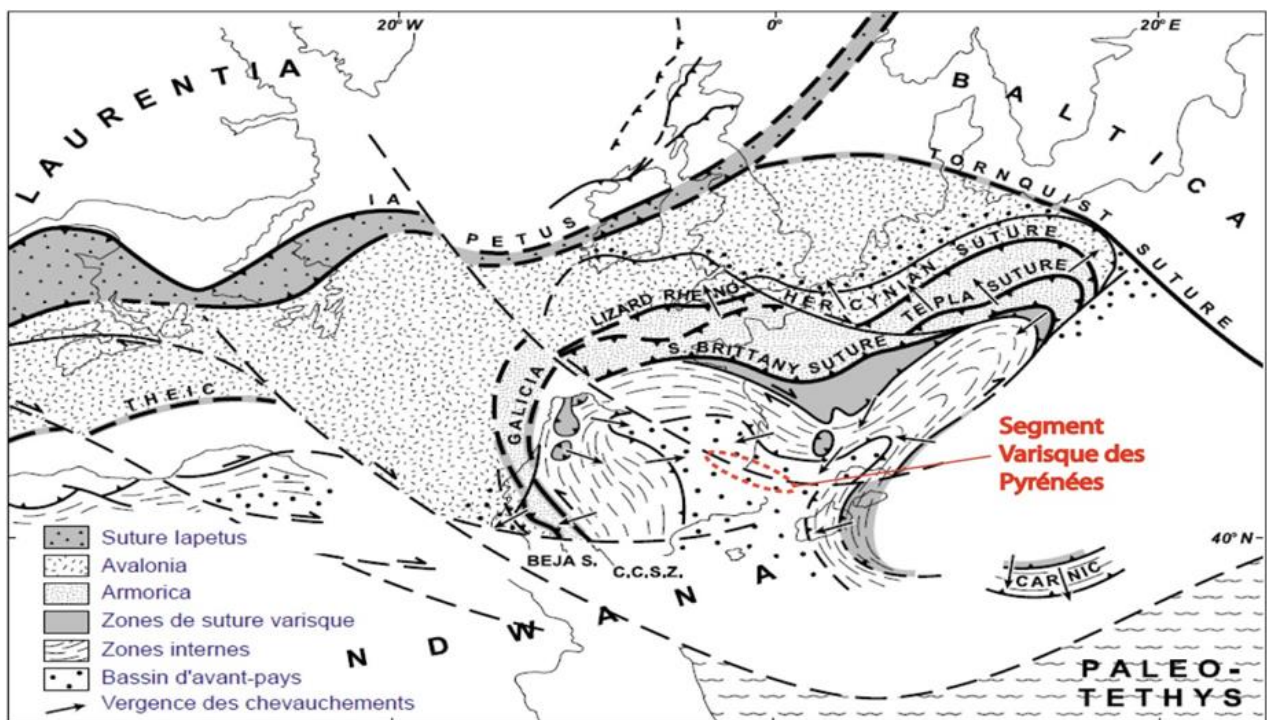


Figure 4 : Positionnement supposé du segment varisque des Pyrénées dans le contexte géodynamique de l'orogène Hercynien selon Matte, 2001.

De plus, le contexte transpressif dextre dans le segment varisque des Pyrénées a été mis en évidence par l'étude ASM (Anisotropie de Susceptibilité Magnétique) des plutons calco-alcalins (Gleizes *et al.*, 1998b ; Auréjac *et al.*, 2004). Au cours de leurs mises en place, ces magmas ont subi une déformation avec une composante décrochante marquée par des linéations magmatiques horizontales et des foliations magmatiques à fort pendage nord à nord-ouest. Ces foliations et linéations ont une orientation moyenne N60°E et leurs trajectoires sont souvent en sigmoïdes. Localement elles s'organisent en couloirs de

déformation N110°E. Ceci indique clairement un sens de cisaillement dextre à fonctionnement inverse synchrone à la mise en place des granites calco-alcalins hercyniens (Gleizes *et al.*, 1998), (report Figure 2).

L'étape ultime de l'évolution de la chaîne est sa pénéplanation qui va engendrer le dépôt en discordance des terrains sédimentaires du secondaire.

2.5. LES RESSOURCES MINÉRALES DANS LES PYRÉNÉES

L'essentiel des gisements et indices métalliques se situent dans les terrains paléozoïques des Pyrénées, i.e. la Zone Axiale et la Zone Nord-Pyrénéenne (Figure 5).

Deux époques sont particulièrement fertiles concernant les minéralisations majeures : (i) le Cambro-Ordovicien, auquel peuvent se rattacher les étages du Silurien et du Dévonien, pour des minéralisations de fer, zinc, antimoine, cuivre, manganèse, etc. et (ii) le Carbonifère moyen à supérieur pour le tungstène associé à la mise en place des granites hercyniens (par exemple Costabonne dans les Pyrénées Orientales et Salau en Ariège).

Par ailleurs, l'or est fréquemment décelé dans les analyses géochimiques de l'inventaire minier français avec des anomalies parfois élevées mais souvent isolées géographiquement les unes des autres, ce qui rend l'interprétation du modèle aurifère des Pyrénées difficile avec les données actuelles.

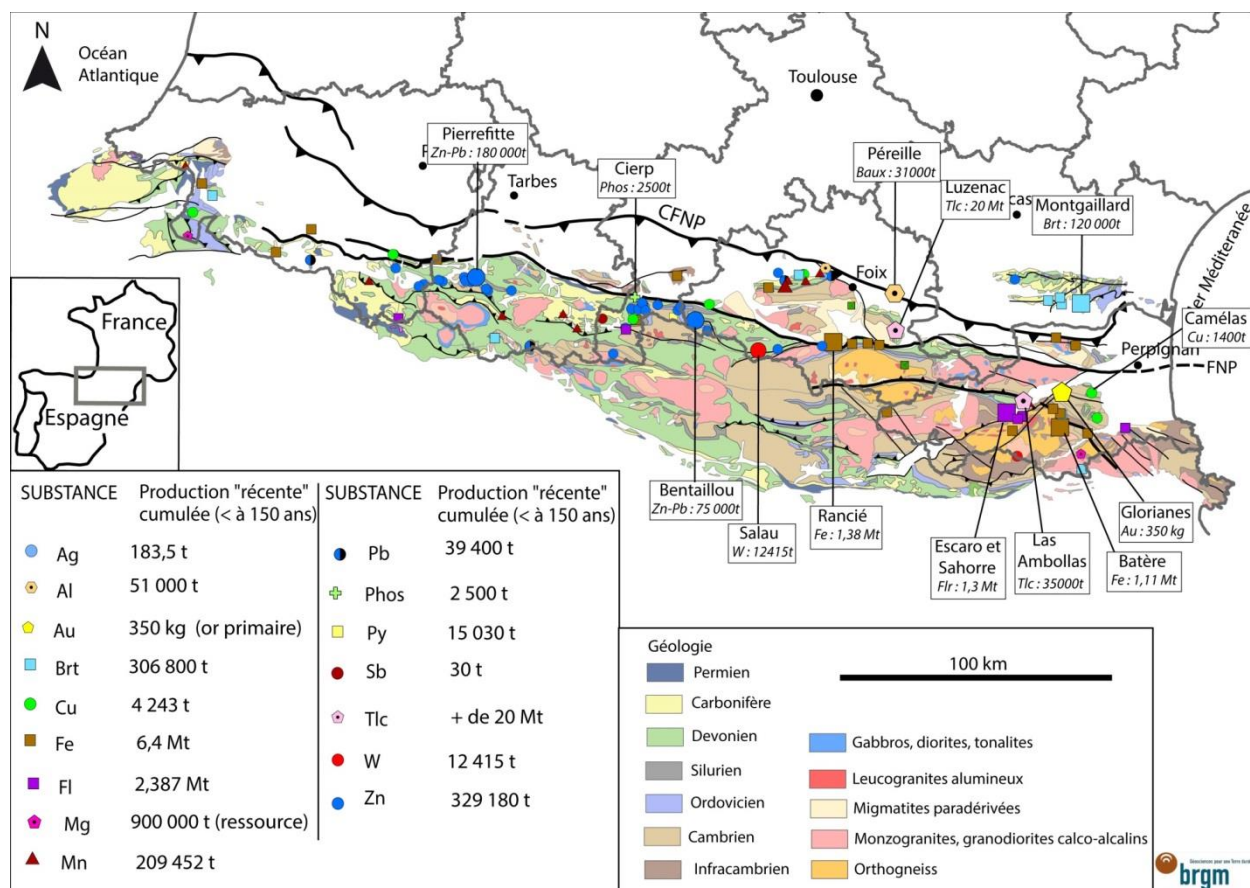


Figure 5 : Carte des gisements historiquement exploités dans les Pyrénées.

Il existe également d'importantes ressources concernant les minéraux industriels dans les Pyrénées :

- le domaine paléozoïque est principalement représenté par les ressources en fluorine des Pyrénées-Orientales et les indices phosphatés du Carbonifère ;
- d'autres importantes ressources dans les domaines paléozoïques et mésozoïques telles que le talc (Luzenac), la magnésite (Eugui) et l'albite (Agly) sont recensées. L'origine de ces ressources est probablement liée à des phénomènes hydrothermaux mésozoïques en marge des bassins crétacés et de la Zone Axiale Paléozoïque.

Bien que constituant une ressource importante des Pyrénées, les minéraux industriels ne seront pas traités dans ce rapport qui se limite aux ressources métalliques.

3. Évolution géologique et minéralisations associées

La zone axiale de la chaîne des Pyrénées est composée de terrains allant de l'Infracambrien au post-Hercynien (Figure 6). Ce chapitre synthétise la géologie, la géodynamique et les minéralisations associées à chaque étage stratigraphique.

3.1. INFRACAMBRIEN ET CAMBRIEN

Les séries infracambriennes et cambriennes sont les plus anciennes de la Zone Axiale des Pyrénées. Il s'agit de séries schisto-gréseuses d'épaisseur plurikilométrique divisées en trois entités principales (Laumonier, 1998 et Laumonier *et al.*, 2004) : (i) le groupe de Canaveilles ; (ii) le « sous-groupe » d'Évol ; (iii) le « sous-groupe » de Jujols (NB : les sous-groupes d'Évol et de Jujols constituant le groupe de Jujols ; Laumonier *et al.*, 2004).

- le groupe de Canaveilles qui est rattaché au Vendien (= Briovérien ; Néoprotérozoïque supérieur) est subdivisé en deux formations :

(1) La formation de Canaveilles, d'une épaisseur de 2 000 à 3 000 mètres est un ensemble pélito-grauwackeux métamorphique avec des niveaux de marbres calciques ou magnésiens et des niveaux intercalés de volcano-sédiments (volcano-sédimentaire plagioclasiqque et tufs rhyodacitiques à andésitiques). Les faciès volcaniques sont datés à 580 Ma ;

(2) La formation de Cabrils, plus pélitique, se caractérise par des niveaux enrichis en matière organique. Des niveaux de marbres, de volcano-sédiments et localement de conglomérats sont également décrits.

Le groupe de Canaveilles, représente l'encaissant exclusif de minéralisations stratoïdes à sidérite, considérés comme des amas de substitution, ainsi que des minéralisations non sulfurées à fluorine, dont certaines paraissent elles aussi stratiformes.

- le « sous-groupe » d'Évol (Cambrien inférieur) est subdivisé en trois formations :

(1) la formation de Trégura olistotromique (à blocs chaotiques) et niveaux carbonatés ;

(2) la formation d'Évol inférieure caractérisée par un ensemble de grès grossiers et de microconglomérats ;

(3) la formation d'Évol supérieure caractérisée par un ensemble gréso-pélitique.

Le district zincifère des Pyrénées Centrales, dans sa partie inférieure, correspondrait probablement à des formations similaires au sous-groupe d'Évol, (terrains d'âge Cambrien).

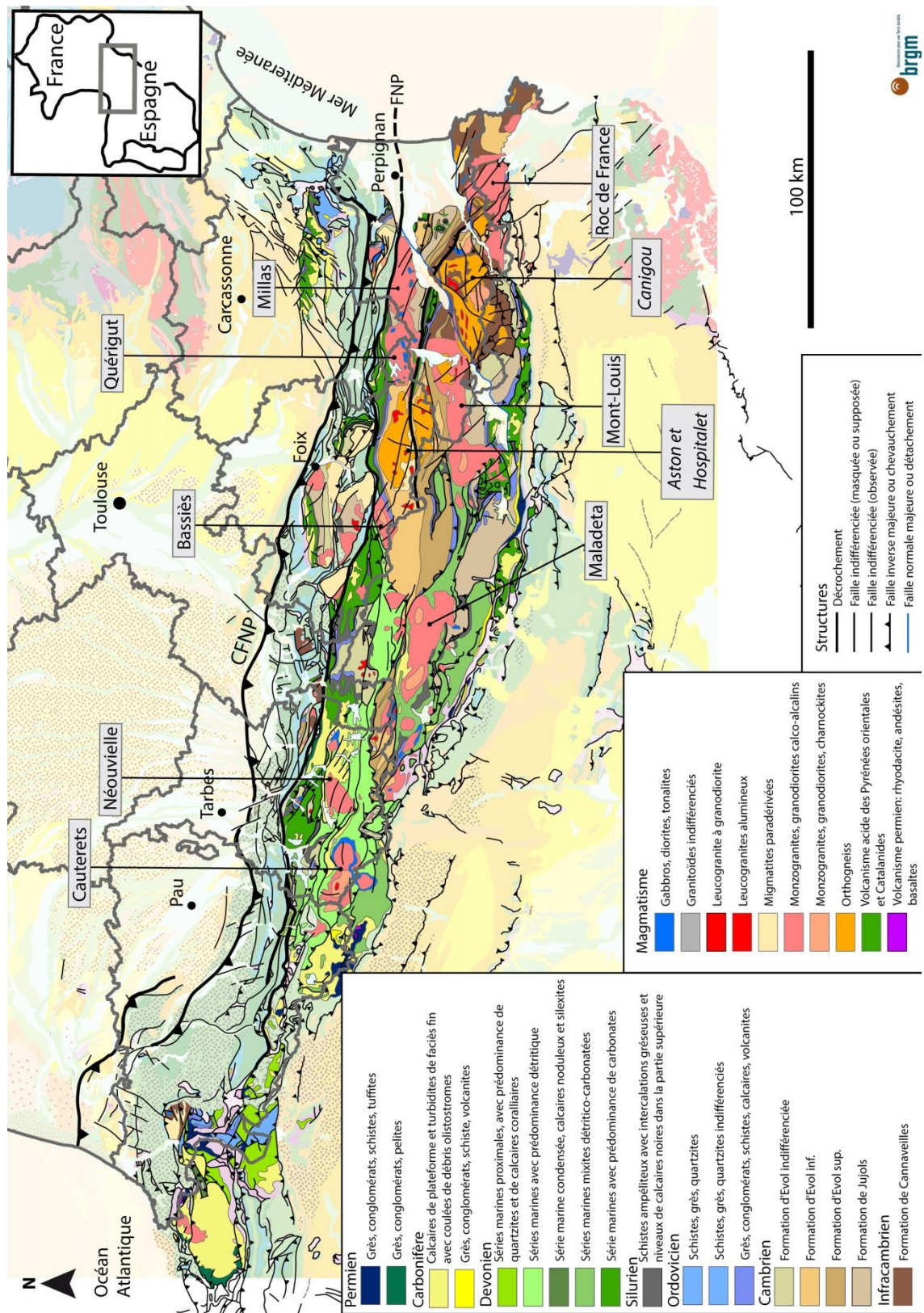


Figure 6 : Carte géologique simplifiée de la zone axiale des Pyrénées avec la localisation des dômes gneissiques (Aston, Hospitalet et Canigou) et des massifs granitiques hercyniens.

- le « sous-groupe » de Jujols, rattaché au Cambrien moyen et supérieur et à l'Ordovicien inférieur (Trémadoc), est divisé en trois formations :
 - (1) la formation de Volcebollère, caractérisée par un niveau repère de carbonates ;
 - (2) la formation de Jujols qui est une série argilo-gréseuse ;
 - (3) la formation particulièrement érodée grésopélitique de Font-Frède.

Aucune minéralisation significative ne semble se mettre en place au cours du Cambrien. En revanche, ces formations peuvent être l'encaissant de minéralisations associées à des événements ultérieurs tels que ceux de la phase Sarde (Ordovicien moyen) et la présence de niveaux carbonatés a rendu possible la formation de minéralisations de type skarn.

3.2. ORDOVICIEN ET PHASES SARDES ASSOCIÉES

Les formations de l'Ordovicien supérieur, premiers dépôts datés par la paléontologie (Casas *et al.*, 2012), en particulier les formations repères du Caradoc (conglomérats à galets de quartzites et de quartz) et de l'Ashgill (séquences pélito-grauwackeuses et schistes troués), reposent en discordance sur les dépôts rattachés au Cambrien et à la base de l'Ordovicien. Cette lacune de la majeure partie de l'Ordovicien inférieur et de la totalité de l'Ordovicien moyen est attribuée aux effets de la phase Sarde.

La phase Sarde, durant l'Ordovicien moyen, correspond à un court événement transpressif marqué successivement par la fragmentation et par des réorganisations locales de la marge du Gondwana (Stampfli *et al.*, 2013). Elle est encadrée stratigraphiquement par les événements distensifs Cambrien et Siluro-Ordovicien (Laumonier *et al.*, 2008). Cette phase a comme conséquence (i) le plissement, le soulèvement et localement le basculement des séries infracambriennes et cambriennes et (ii) l'érosion et l'interruption de la sédimentation faisant ainsi disparaître près de 3 km de séries sédimentaires (Laumonier *et al.*, 2008).

Antérieurement à la phase Sarde, dès l'Ordovicien inférieur, se mettent en place les grands laccolithes granitiques d'affinité calco-alcaline (Roger, 2004), en contexte extensif, qui constituent majoritairement les protolithes des dômes gneissiques hercyniens tels l'Aston, l'Hospitalet et le Canigou (Barbey *et al.*, 2001).

Du point de vue métallogénie, les minéralisations zincifères de la province pyrénéenne, qui se prolongent ensuite au Dévonien (Pouit, 1978), semblent se développer au cours de cette période en réponse aux événements de la phase sarde. Les minéralisations semblent principalement correspondre à des phénomènes de type « Sedex » (Pouit *et al.*, 1984) liés à un hydrothermalisme dans un bassin sédimentaire, avec un apport métallique en relation supposée avec le drainage des domaines émergés. Les phénomènes volcaniques décrits à cette période dans le domaine de Pierrefitte (Nicol, 1997) ne semblent pas jouer un rôle primordial. Une étude isotopique récente concernant les minéralisations Pb-Zn du Pic de la Mine (Haute-Garonne) indique une extraction crustale des métaux à l'Ordovicien suivie par des remobilisations ultérieures des minéralisations (Garcia-Sansegundo *et al.*, 2014).

D'autre part, comme les dépôts semblent principalement situés au niveau de pièges paléogéographiques en bordure des domaines de dômes, on pourrait envisager une influence du magmatisme ordovicien remobilisant les niveaux zincifères.

Localement, dans la région des Aspres (Pyrénées Orientales), à proximité des unités volcaniques felsiques de l'Ordovicien supérieur, il existe des minéralisations aurifères atypiques déconnectées de toute zone de fracture régionale (différentes du type

orogénique). Il s'agit de minéralisations à Au seul sans aucun élément métallique associé et à Au-Sb pour lesquelles une influence volcanique pourrait-être envisagée.

De plus, au cours de cette période, la mise en place des grands massifs laccolitiques granitiques du Canigou, de l'Aston et de l'Hospitalet a pu s'accompagner de phénomènes thermiques et hydrothermaux permettant d'expliquer la présence de minéralisations stratoïdes anté-hercyniennes de fluorine, sidérite et potentiellement scheelite dans les formations du groupe de Canaveilles.

3.3. SILURIEN

Stratigraphiquement au-dessus des sédiments schisteux de l'Asghill (Ordovicien supérieur), la série silurienne d'environ 200 mètres de puissance semble complète d'après Degardin (1987).

Il s'agit d'une période d'une durée de 50 Ma dont le contexte géodynamique très différent est marqué par la séparation du Gondwana et une dérive vers le nord des terrains pyrénéens.

Présents sur l'ensemble de la zone axiale des Pyrénées, les terrains siluriens sont composés de schistes noirs carburés traduisant un milieu de dépôt confiné et des conditions réductrices. Localement ces terrains sont fossilifères et présentent de rares intercalations de tufs basiques (basalte) et acides (andésite et rhyolite).

Ce faciès de régime calme est présent dans tout le sud-ouest de l'Europe et l'Afrique du Nord, et se prolonge jusqu'à la base du Dévonien (Dégardin, 1987), marquant l'extension maximale du domaine océanique. Ces schistes siluriens, très plastiques, ont servi de niveau de décollement lors de la déformation hercynienne (Kleinsmiede, 1960 ; Majesté-Menjoulas, 1979 ; Calvet, 1988 ; Garcia-Sansegundo, 1990, 1992, 1996 ; Carreras et Capella, 1994) et probablement aussi durant le Pyrénéen.

Du point de vue métallogénie, dans les Pyrénées centrales, les schistes noirs du Silurien ne renferment pas de minéralisations significatives connues. Toutefois, ils comportent des disséminations sulfurées et parfois des corps ferrugineux à sulfures résiduels. De plus, ils présentent systématiquement des niveaux géochimiques élevés pour différents éléments (e.g. As, Cu, Mo), qui sont classiquement interprétés comme des anomalies d'origine formationnelle associées aux schistes noirs.

Le réexamen des données tend à souligner l'importance du Silurien comme environnement facilitant le piégeage des minéralisations à Ni-Cu, Mo-Cu, Sb-Au.

3.4. DÉVONIEN

Les dépôts dévoniens forment une épaisse série, pouvant atteindre 2 500 mètres, de nature différente suivant les domaines. Ils sont essentiellement carbonatés (de plate-forme) au centre et à l'est des Pyrénées et de nature flyshoïde silico-clastique à l'ouest et au sud. Le passage du Silurien au Dévonien est généralement tectonique, mais avec à la base du Dévonien, une persistance de la sédimentation riche en matière organique, en particulier au niveau des calcaires de Salau où persistent des intercalations de schistes noirs.

Le Dévonien inférieur est relativement homogène, avec une série détritique fine alternant avec des carbonates. Le Dévonien moyen correspond principalement à des dépôts détritiques fins à caractère pélagique, surmontés localement (sud-ouest des Pyrénées) par des faciès calcaires récifaux (d'âge Givétien). Au Dévonien supérieur, ainsi qu'au Carbonifère inférieur, les variations de faciès s'accroissent, marquant la transition avec le début de l'orogénèse hercynienne. Cela se traduit par le passage d'une sédimentation

calme, pélagique, au nord-est à une sédimentation plus détritique au sud-ouest, avec l'opposition entre un faciès carbonaté et pélitique versicolore au nord (calcaires griottes, jaspes siliceux et calcschistes) et un faciès détritique, voire turbiditique au sud (séries de Sia, Lariste, Las Bordas).

Géodynamiquement et paléogéographiquement, le déplacement du domaine pyrénéen vers l'équateur permet une sédimentation carbonatée pendant le Dévonien (Robardet *et al.*, 1994). Les variations nord-sud de faciès, prononcées au Dévonien supérieur, peuvent mettre en relation d'une part au sud sud-est l'avant fosse flyshoïde d'un avant-pays continental émergé (Mirousse, 1966 ; Bodin, 1987) avec d'autre part, au nord, un domaine pélagique présentant de grandes failles listriques actives et parallèles à l'axe de la chaîne (Majesté-Menjoulas, 1979 ; Poblet et Casas, 1993). De plus, des traces limitées de volcanisme (cinérites) sont décrites dans la sédimentation dévonienne.

Du point de vue métallogénie, le Dévonien renferme de nombreuses minéralisations à zinc - plomb, mais aussi de façon plus marginale des gîtes de manganèse, fer, fluorine, magnésite et barytine, répartis dans toute la colonne stratigraphique.

Les minéralisations zinc - plomb du Dévonien, dont plusieurs niveaux minéralisés sont connus, sont apparentées aux minéralisations sédimentaires exhalatives (SEDEX) zinc - plomb de l'Ordovicien, sans influence volcanique associée :

- les niveaux minéralisés semblent principalement associés au Dévonien inférieur, en liaison avec le sommet de la barre calcaire d'âge Emsien (sommet du Dévonien inférieur). Ce niveau repère peut se suivre sur une cinquantaine de kilomètres depuis les bordures nord des domaines de Pierrefitte (Arbéost, Gazost, Nerbiou) et de Lys-Caillaouas (Sarrouyes, Superbagnières), où il est associé au « faciès anormal » des calcaires rubanés gris souris (CRGS) dit de type Nerbiou (Pouit, 1978, 1993), jusqu'aux bordures des domaines de Bosost (Argut, Crabères) et de Mariniana (Saubé, Bonabé, Carboire) ;

Il s'agit de minéralisations principalement stratiformes avec des paragenèses souvent à barytine (Froehlich, 1970) ; leur dépôt ne semble associé à aucune manifestation volcanique et correspondrait à des minéralisations de type SEDEX mises en place dans un contexte de bassin sédimentaire instable (Vegas, 1982 ; Pouit, 1984) ;

- le Dévonien supérieur est marqué par le seul niveau minéralisé zinc - plomb d'Arrens, sur la bordure ouest du domaine de Pierrefitte. Il passe latéralement à un gîte de barytine ou de quartz stérile et a été longtemps considéré comme un équivalent des minéralisations de l'Ordovicien et du Dévonien inférieur, dont il représenterait le seul témoin barytique (Pouit et Bois, 1984). Toutefois, des études stratigraphiques et métallogéniques plus récentes l'ont rapporté au Dévonien supérieur, d'origine surtout sédimentaire (Escande *et al.*, 1981 ; Escande et Majesté-Menjoulas, 1985) avec toutefois la présence de phtanites d'origine cinéritiques dans le Tournaisien (base du Carbonifère).

Le Dévonien supérieur est également marqué par de nombreuses occurrences de manganèse appartenant à la province manganésifère dévonienne supérieure-carbonifère inférieure commune aux Pyrénées et à la Montagne Noire. Le gîte le plus important est celui de Las Cabesses (Ariège), dans les calcaires griottes d'âge Faménnien. De nombreux autres indices manganésifères ont aussi été reconnus dans les calcaires faménniens et les formations schisto-quartzitiques au contact Dévonien-Carbonifère dans les Hautes Pyrénées, la Haute-Garonne et les Pyrénées orientales. Ces minéralisations d'importance limitée sont constituées de carbonates et de silicates de manganèse (rhodocrosite, rhodonite, friedelite, grenat), généralement oxydés en surface, parfois associés à des sulfures (pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite à or et argent à Las Cabesses), à des cherts pyriteux (vallées d'Aure et du Louron), ou riches en fer et phosphore (Usclat, Haute Vallée de la Garonne). Ces gîtes sont d'origine sédimentaire et ont été plus ou moins modifiés par le

métamorphisme (Perseil, 1968). Ils se présentent en couches lenticulaires, amas stratiformes et remplissages de poches karstiques.

Le Dévonien (Dévonien inf.) renferme également des minéralisations de fer, de faible importance, sous forme d'amas stratoïdes (sidérite et ankérite) similaires à ceux rencontrés dans le Cambrien et l'Ordovicien. On les retrouve dans les formations calcaires et dolomitiques du groupe de Rancié - Château-Verdun - Lassur (Ariège), de Rivenert (Ariège), de Barburet et de la région de Gavarnie (Hautes-Pyrénées). Par ailleurs, des gîtes de fer sous forme d'oolites chloriteuses, en couches de puissance métrique, ont été reconnus au sommet de l'Eifélien et à la base du Givétien dans les massifs des Aldudes et de Cinco-Villas (Quémeneur, 1974).

3.5. SÉQUENCES SYN-OROGÉNIQUE VARISQUE (CARBONIFÈRE MOYEN)

Les dépôts syn-orogéniques du segment varisque des Pyrénées correspondent au faciès « Culm ». Il s'agit de dépôts de type flysch grésopélitiques et conglomératiques associés à un remplissage chaotique et puissant caractéristique d'une avant-fosse orogénique. L'âge de ces flyschs évolue depuis l'est (Viséen sup.), vers le centre (Namurien) et vers le sud-ouest (Wesphalien) et est généralement attribué à la propagation de l'ouverture de l'avant-fosse, en accord avec le sens de propagation du front orogénique dans le sud de l'Europe (Franke et Engel, 1986), de l'est vers l'ouest des Pyrénées (DÉvolvé *et al.*, 1993 ; Majesté-Menjoulas et Debat, 1994).

La région pyrénéenne au cours du cycle varisque se situe au niveau de la zone externe méridionale du domaine orogénique, tardivement impliquée dans la déformation. Son organisation paléogéographique au Dévonien et au Carbonifère suggère une orientation WNW-ESE (120° à 150°E) de cette zone externe, en bordure d'un avant pays (Ebro) situé au sud-ouest.

D'autre part, des indications à l'échelle de la chaîne indiquent un poinçonnement par le « bloc Ebroïa » de la chaîne varisque ; les Pyrénées hercyniennes représentant la bordure nord de cette zone de poinçonnement. Malgré des progrès dans la connaissance de la tectonique, du métamorphisme et du magmatisme de la Zone Axiale des Pyrénées, le détail des étapes et les conditions dynamiques de la déformation hercynienne, dans cette partie de la chaîne varisque, ne font toujours pas l'objet d'un consensus.

Dans les Pyrénées, l'orogénèse hercynienne se déroule au cours d'une période relativement brève, de l'ordre de 20 Ma depuis le début du Namurien (325 Ma) jusqu'au milieu du Stéphanien (304 Ma), âge des premiers dépôts post-orogénique, et a été déconvoluée en trois étapes principales (Denèle *et al.*, 2009 et 2015) :

- la déformation D1 correspond à la phase chevauchante majeure dont la vergence vers le sud-ouest est en accord avec la sédimentation des flyschs du « Culm ». Cette déformation est marquée par un épaississement modéré et ne s'accompagne pas de faciès métamorphique de haute pression. Elle est syn à post-namurienne (323 à 308 Ma). C'est au cours de cette étape que les anciens massifs granitiques de l'Ordovicien (i.e. Canigou, Hospitalet, Aston) sont orthogneissifiés et développent des linéations subhorizontales vers le SW (Denèle *et al.*, 2009 et 2015) ;
- les déformations D2a et D2b se déroulent dans un contexte transpressif dextre marqué par une forte augmentation thermique (délamination supposée).

D2a se caractérise par le développement de fluidalités intra-magmatiques dans les intrusions, de phénomènes de migmatisation HT profondes au sein des complexes orthogneissiques ordoviciens, et d'étirement vers l'est des gneiss et des dykes de leucogranites associés.

D2b (à environ 304 Ma) est caractérisée par un bombement des gneiss et de leur couverture formant des grands dômes métamorphiques ;

- à environ 300 Ma, le stade orogénique D3 correspond à une déformation transcurrente tardive, orientée globalement est-ouest, associée à de grandes failles cisailantes et dont le fonctionnement est dextre-inverse dans un contexte métamorphique rétrograde (e.g. zone d'Arrens, réactivée ensuite au Pyrénéen), et s'accompagne d'un événement magmatique majeur avec la mise en place de nombreuses intrusions granitiques d'affinités calco-alcalines.

D'un point de vue métallogénique, les minéralisations d'importance économique sont en liaison avec le magmatisme hercynien majeur (305 à 300 Ma). Il s'agit principalement de skarns à scheelite tels que les gisements de Salau et Costabonne. Les autres minéralisations plutoniques sont marginales avec de rares granites différenciés à béryllium.

Contrairement à ce qui pourrait être envisagé, le stade transcurrent D3 n'est pas clairement associé à des minéralisations aurifères de type orogénique (Groves *et al.*, 1998). En effet, les résultats des travaux de prospection n'indiquent pas de groupement anomalique aurifère clairement associé aux directions favorables (WNW-ESE) ni d'association polymétallique accompagnant l'or (e.g. absence de corrélation nette entre l'or, l'arsenic, et les failles actives durant le stade D3).

3.6. LE DOMAINE POST-HERCYNIEN

La phase hercynienne de compression et d'épaississement crustal est suivie par une extension caractéristique de l'évolution structurale tardive des Pyrénées. Elle débute au Stéphanien (Carbonifère supérieur), moins de 10 Ma après l'épaississement crustal, et se poursuit jusqu'au début du Permien.

La transition entre les phases compressives et extensives correspond au hiatus sédimentaire du Carbonifère et au passage d'une sédimentation marine à une sédimentation continentale, accompagnée de volcanites basaltiques et andésitiques émises le long des failles en bordure des demi-grabens. Elle est contemporaine de l'émersion qui dure jusqu'au milieu du Trias (Lucas, 1985 ; Bixel, 1987).

3.7. BILAN DE L'ÉVOLUTION MÉTALLOGÉNIQUE HERCYNIENNE

Depuis le début des années 90, marqué par la fin des travaux d'exploration de l'inventaire, trois éléments géologiques majeurs modifiant profondément l'interprétation des Pyrénées hercyniennes ont été mis en évidence :

- la réinterprétation des dômes d'orthogneiss de type Canigou. Ils étaient considérés comme d'anciens socles précambriens pénéplanés, antérieurs aux séries cambro-ordoviciennes. Ils correspondent en fait à de vastes massifs magmatiques d'âge Ordovicien, c'est-à-dire sub-contemporains des événements de la phase sarde, qui se mettent en place sous forme de laccolite dans des formations plus anciennes d'âge Infracambrien à Cambrien ;
- la réinterprétation géodynamique et structurale du Paléozoïque inférieur et l'importance des événements sardes. L'évolution géodynamique en marge du Gondwana et les événements de la phase Sarde ont été sous-estimés, voire totalement ignorés. En contexte de marge active, des phénomènes d'extensions entraînent sur la marge du Gondwana l'individualisation de différents blocs de terrains. Des phénomènes de réorganisation au sein de cet ensemble sont à l'origine de la phase Sarde, correspondant à des événements tectono-métamorphiques peu intenses, associés à du magmatisme et des phénomènes d'extension en marge des domaines déformés. Ces événements ont été

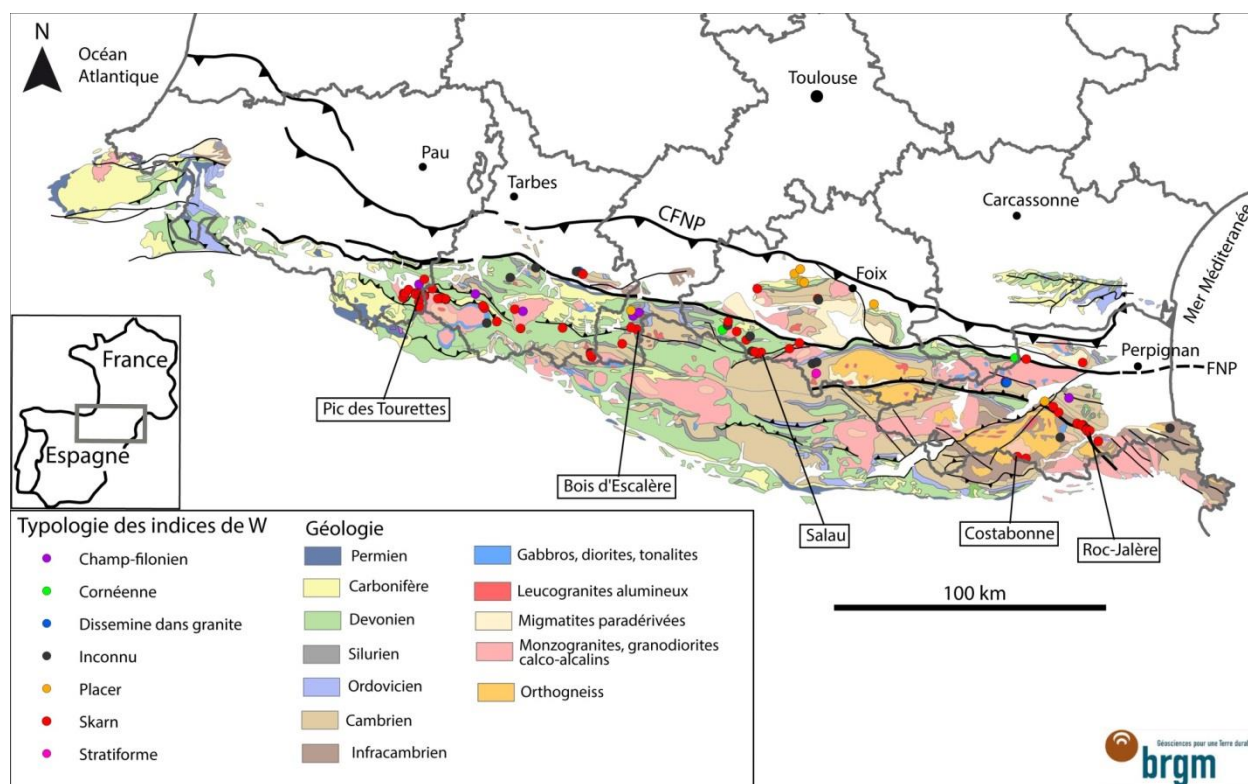
caractérisés récemment dans les Pyrénées. Ils se marquent par des plissements, du magmatisme et une importante érosion de la plus grande partie de l'Ordovicien ;

- la réinterprétation stratigraphique : la vision classique, basée sur une parenté des formations paléozoïques inférieures des Pyrénées avec des domaines voisins a été totalement remise en question. Le socle n'existe pas, les orthogneiss sont des roches intrusives encaissées par des formations d'âge Ediacarien, anciennement considérées comme cambriennes. Les formations anciennement dites cambro-ordoviciennes sont en fait essentiellement d'âge Précambrien à Cambrien inférieur (Cocherie *et al.*, 2005 ; Castineiras *et al.*, 2008). La plus grande partie de l'Ordovicien est absente. Celui-ci, a été érodé ou non déposé et se limite aux formations du Trémadoc (Ordovicien inférieur), localement préservées et, de manière plus fréquente, à des formations détritiques discordantes de l'Ordovicien supérieur (Caradoc, Asghill).

Bien évidemment ces éléments ainsi que d'autres, en train d'émerger dans le cadre des travaux géologiques transfrontaliers, des derniers levés des cartes géologiques au 1/50 000 et du programme Référentiel Géologique de France (RGF), n'ont pas été pris en compte par les interprétations métallogéniques classiques des Pyrénées qui se sont interrompues avant la fin des années 1990 (Nicol, 1997).

4. Les minéralisations à tungstène (w)

Le tungstène n'est pas une substance historiquement exploitée dans les Pyrénées. La prospection du tungstène a débuté dans les années 1950 au marteau et à la lampe à UV de Wood sur les skarns, parfois complétée par des analyses alluvionnaires, afin de tracer les domaines à scheelite. La première découverte fut le gisement de Costabonne en 1951, dans les Pyrénées Orientales, qui n'a pas été exploité mais qui a permis d'établir un modèle d'exploration du tungstène se focalisant sur les skarns à l'interface des roches carbonatées et des intrusions granitiques hercyniennes (Figure 7). Ce modèle a ainsi permis la découverte du gisement majeur de Salau en Ariège en 1960 ainsi que des indices parfois exploités artisanalement dans les Pyrénées centrales (Hougaril, Cauterets...) mais peu étudiés en raison des contraintes liées au Parc National des Pyrénées.



Les gîtes pyro-métasomatiques de type skarn représentent la principale ressource pour le W sous forme de scheelite associée à différents minéraux en sous-produits (oxydes et sulfures de Cu, Fe, Mo, Zn, fluorine et traces d'Au, Co, Ag, Sn). Ils sont généralement, mais pas toujours, développés au contact entre une roche carbonatée et une roche intrusive.

Leur minéralogie est caractérisée par la présence de silicates calciques (magnésiens, ferifères) tels que : diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), hédénbergite ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) andradite ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_{12}$), wollastonite (CaSiO_3), forstérite (Mg_2SiO_4) etc. Les skarns se forment dans une roche carbonatée (calcaire ou dolomie) interagissant avec une roche intrusive silicatée et des fluides hydrothermaux de haute température entraînant un métasomatisme (apport Si, Al, Fe, Mg) dans les domaines de température et de pression des minéraux skarnifères, c'est-à-dire des profondeurs de plusieurs kilomètres.

Les travaux de prospection réalisés par l'Inventaire pour le tungstène ne couvrent pas tous les terrains paléozoïques de la Zone Axiale des Pyrénées françaises. Ces travaux concernent des analyses de prélèvements alluvionnaires en batée et des analyses de prélèvement géochimiques en «stream-sediment». Les résultats de l'alluvionnaire sont souvent dispersés, rendant leur interprétation difficile mis à part pour deux ou trois domaines. Les résultats de la prospection géochimique sont également dispersés et seulement de rares anomalies dans les Pyrénées centrales ont été mises en évidence. La *figure 8* montre une compilation des données géochimiques et alluvionnaires avec une représentation interprétée des grands domaines d'anomalies à W.

Sur la figure 8, 8 domaines d'anomalies géochimiques et alluvionnaires ont été mis en évidence avec 3 domaines de premier plan : Costabonne, Salau et Hougaryl.

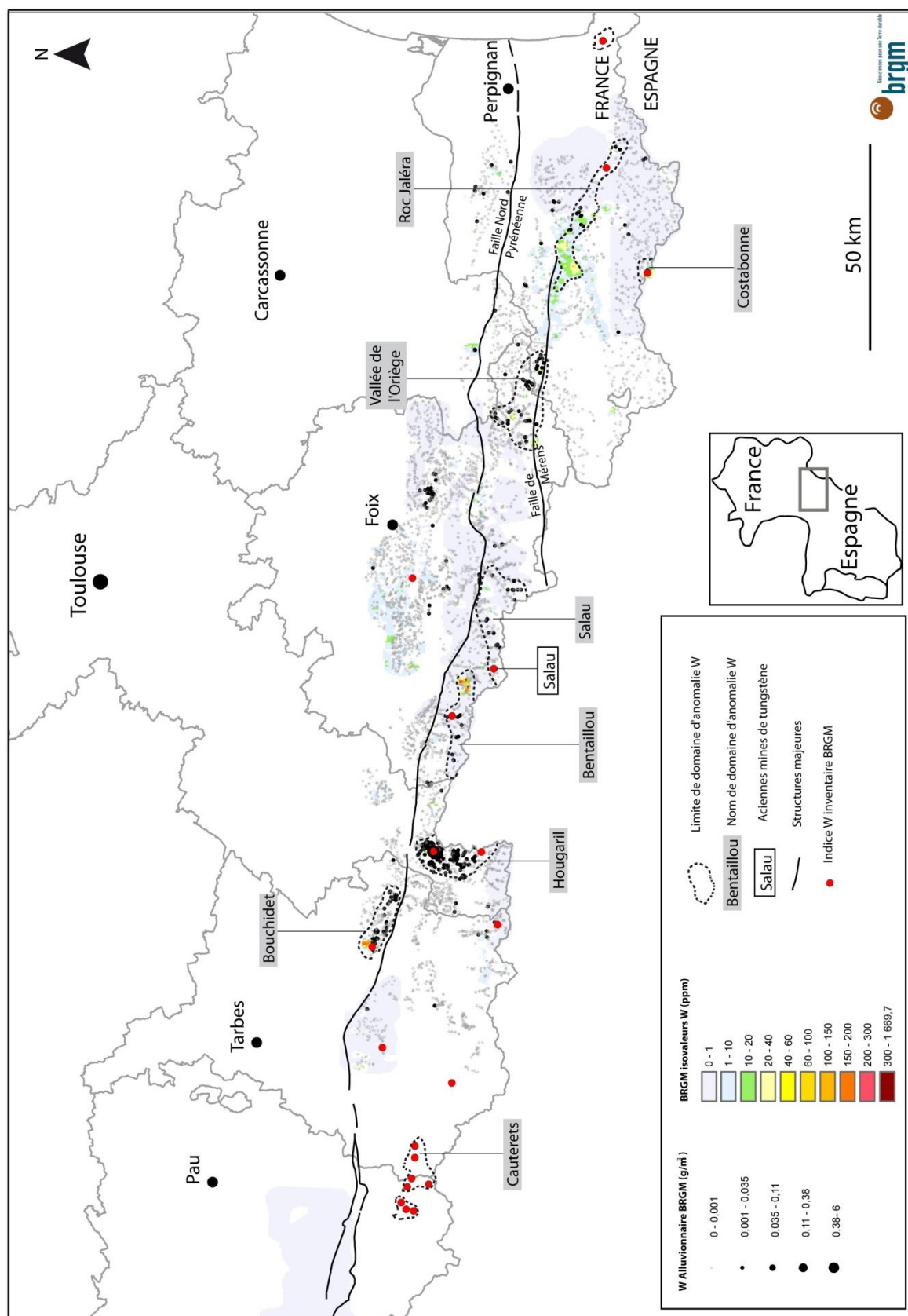
- **Le domaine de Costabonne**, proche de la frontière franco-espagnole dans les Pyrénées orientales, a une réponse extrêmement limitée concernant les analyses géochimiques et alluvionnaires.

Le gisement de Costabonne est le premier gisement de type skarn à scheelite mis en évidence dans les Pyrénées françaises dont la genèse est liée à la mise en place d'une intrusion granitique hercynienne au sein des calcaires et dolomies de la série infracambrienne de Canaveilles (Guy, 1988 ; Van Marcke de Lummen *et al.*, 1986 Baetens, 1989). Les skarns se présentent sous forme de lentilles minéralisées où la teneur en WO₃ est supérieure à 0,3%. Une exploration plus détaillée, réalisée par le BRGM entre 1952 et 1957, avec 4 066 m de sondages cumulés et 1 865 m de galeries sur 5 niveaux a permis d'identifier deux corps minéralisés majeurs : le « skarn Nord » et le « skarn Sud ».

Le « skarn Nord » est de taille plus importante et la scheelite est parfois accompagnée de sphalérite et pyrite. Le « skarn Sud » est de dimension plus réduite et la scheelite est parfois accompagnée de sphalérite, chalcopryrite et pyrite.

En 1959, les dernières estimations des ressources étaient de l'ordre du million de tonnes de minerai à environ 0,3 % de WO₃.

Le gisement de Costabonne, malgré un accès difficile, est une cible prioritaire concernant le tungstène dans la Zone Axiale des Pyrénées. Des travaux de réinterprétation des données disponibles avec une approche moderne et dans le contexte économique actuel seraient à entreprendre.



- **le domaine de Salau** est situé à proximité de la frontière espagnole, dans la haute vallée du Salat, en Ariège (09). Comme pour le domaine de Costabonne, la réponse concernant les analyses géochimiques et alluvionnaires est particulièrement faible et diffuse ;

Historiquement, les premiers indices de skarns à pyrrhotite minéralisés en scheelite ont été découverts par le BRGM en 1959 au-dessus du village de Salau. Des travaux d'exploration à l'interface de l'apex granodioritique du massif de la Fourque et des calcaires siluro-dévonien encaissants ont été menés entre 1960 et 1967 afin de caractériser la minéralisation en profondeur. En 1970, la Société des Mines d'Anglade (SMA) débute l'exploitation de Salau qui s'est poursuivie jusqu'en 1986.

Le gisement de Salau, particulièrement complexe, est composé de plusieurs lentilles de skarns minéralisées de taille variable et dont quatre principales ont été mises en évidence : la lentille « Sud », la lentille « Nord », la colonne « SC » et les lentilles et colonnes « Véronique ». Outre la scheelite et la pyrrhotite, les skarns de Salau contiennent parfois de la sphalérite, de l'arsénopyrite, de la chalcopryrite, du bismuth et de l'or avec des teneurs intéressantes.

Les derniers calculs de réserve réalisés en 1986 estiment le potentiel de Salau à 200 000 t de minerai à 1,7 % de WO₃. L'évolution du cours du tungstène, la reprise et la réinterprétation des données disponibles par une approche moderne et dans le contexte économique actuel devraient significativement augmenter ces réserves. Le potentiel or, non négligeable, est également à évaluer.

Ces paramètres font du gisement de Salau la cible prioritaire concernant le W dans la Zone Axiale des Pyrénées ;

- **le domaine du Hougari** est proche de la frontière franco-espagnole au sud du département de la Haute Garonne (31) et à l'est de Luchon. Ce domaine a été très peu couvert par la prospection géochimique, en revanche il a été particulièrement bien couvert par la prospection alluvionnaire de l'inventaire et de différentes campagnes stratégiques. Les campagnes alluvionnaires ont permis de mettre en évidence des indices de scheelite et cassitérite en batée menant à la découverte des minéralisations du Hougari et de Bois d'Escalère (skarn à scheelite). Cette dernière a fait l'objet d'un PER déposé en 1986 par le BRGM et la SMA qui n'a pas débouché sur une exploitation ;

Le contexte géologique des indices du domaine du Hougari est complexe et mal compris. Il est situé dans la partie occidentale de la structure antiformale du dôme métamorphique de Bossost, encaissé dans des terrains essentiellement ordoviciens et siluriens qui ont subi plusieurs phases tectono-métamorphiques (Mezger *et al.*, 2003), essentiellement HT-MT et BP. L'indice minéralisé du Hougari évoque également la présence d'une coupole granitique à enveloppes différenciées à Au-As, B, W-Sn et Cu-Mo-Ag dans des terrains siluriens.

Ainsi, bien que trop peu étudié, le domaine du Hougari présente, outre des anomalies alluvionnaires en tungstène, des anomalies polymétalliques variées. Lancer un nouveau programme de prospection géochimique sur ce domaine constitue un objectif de travaux nécessaires à la consolidation de ces résultats avec une bonne chance de succès.

D'autres domaines d'anomalies comme la vallée de l'Oriège, le Bouchidet ou encore le Bentaillou sont mis en évidence par les résultats des prospections alluvionnaires et géochimiques. Cependant, ces anomalies paraissent avoir été négligées et aucune étude ne les mentionne dans le détail.

Enfin, le domaine de Cauterets présente une forte concentration d'indices de tungstène (skarn à scheelite dans des formations dévoniennes), mais en raison de la présence du Parc National des Pyrénées aucune prospection géochimique ou alluvionnaire n'a été réalisée dans le secteur.

En conclusion, les gisements de Salau (anciennement exploité) et de Costabonne doivent être les cibles privilégiées pour toute reprise d'activité d'exploration et d'exploitation dans la Zone Axiale des Pyrénées.

Les résultats des analyses géochimiques et alluvionnaires acquis lors de l'inventaire minier ont été insuffisamment contrôlés et valorisés sur le terrain. Une réévaluation de ces anomalies intégrant des études détaillées sur le terrain de tous les indices de tungstène seront nécessaires.

5. Les minéralisations aurifères

Les anciennes exploitations primaires sont rares et de petite taille (Glorianes, France, P-O et Ribes del Freser en Espagne), elles sont considérées comme étant d'âge hercynien et appartiendraient au type orogénique (Groves *et al.*, 1998). Les indices d'or alluvionnaires sont en revanche relativement fréquents et ont été exploités depuis l'époque gallo-romaine (Cauuet, 2005). Ils sont surtout développés dans les alluvions quaternaires de la zone ariégeoise de piémont, peut être issues d'un porteur intermédiaire détritique Oligo-Miocène (département de l'Ariège, Bassin du Ter, province de Lérida, Catalogne) voire Pliocène (Cerdagne, PO). En revanche, leur source initiale dans le socle reste hypothétique et peu documentée (Figure 9).

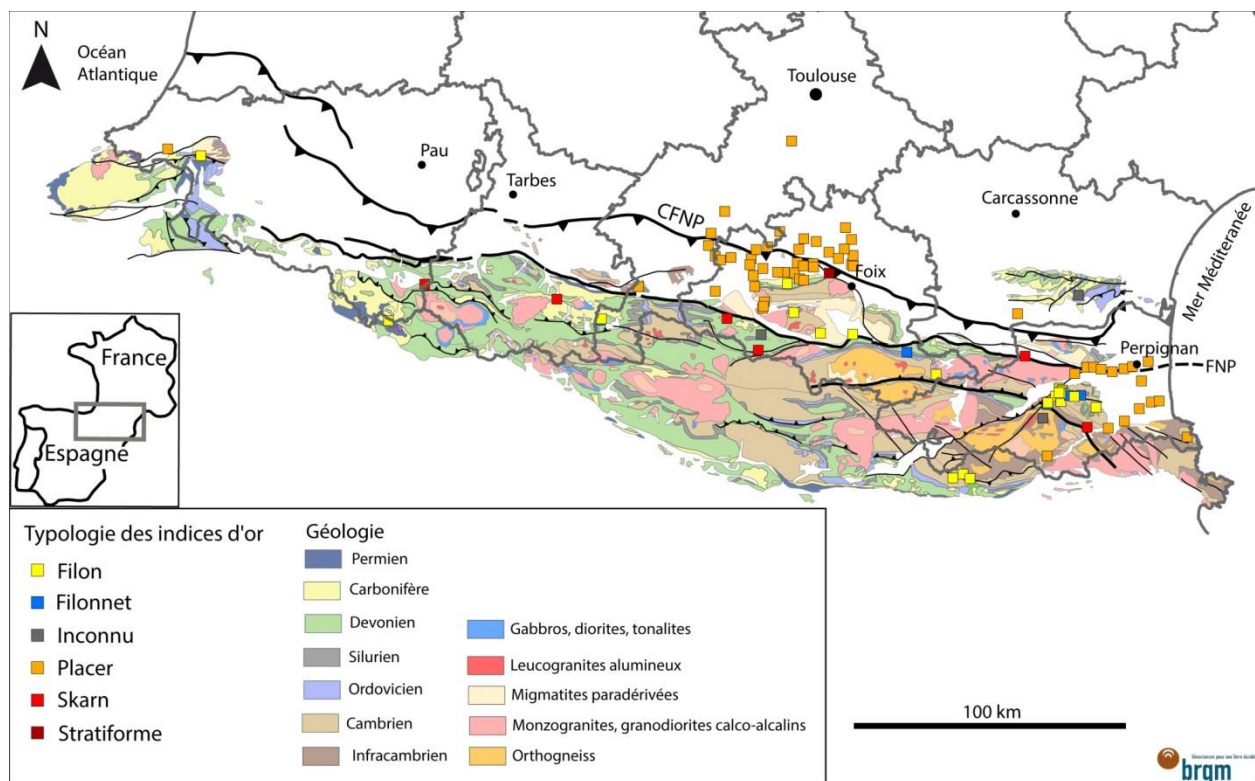


Figure 9 : Carte de localisation des minéralisations Au des Pyrénées classées selon leurs typologies.

Les travaux de prospection pour l'or du domaine de socle sont très incomplets et se limitent essentiellement à la reconnaissance des grandes structures régionales. Ils comportent des prélèvements géochimiques en «stream-sédiment», analysés pour l'or, et des prélèvements alluvionnaires en batée, avec évaluation de la quantité d'or observé.

Les résultats de l'alluvionnaire indiquent la présence de grandes zones aurifères où les résultats, mal focalisés, semblent surtout souligner les conditions locales d'alluvionnement et de pépétisation favorables. La géochimie effectuée avec des limites analytiques élevées et axée sur la reconnaissance de grandes structures régionales (structures majeures hercyniennes réactivées au Pyrénéen), montre quelques fortes teneurs dispersées et reste elle aussi difficile à interpréter en termes de cibles à explorer (Figure 10).

À une échelle locale, les travaux plus détaillés réalisés dans les Pyrénées orientales (Les Aspres) et en Ariège (Les Angles), montrent des résultats difficiles à interpréter en termes de structure minéralisée aurifère. L'origine de l'or est probablement multiple, le plus souvent associée à des concentrations diffuses à basse ou moyenne teneur (Salpeteur, 1993).

Sur la Figure 10, 7 domaines d'anomalies géochimiques et alluvionnaires sont mis en évidence et dont les plus documentés sont les domaines des Aspres et de la faille de Mérens dans les Pyrénées orientales.

- **le domaine des Aspres**, situé dans les Pyrénées orientales, a été partiellement couvert par la prospection géochimique et alluvionnaire du BRGM. Plusieurs indices minéralisés, dont certains ont été en partie exploités, sont décrits dans ce domaine, tels que Glorianes, les Aspres, Puig de Maurous, Serrabonne et la Chapelle Saint-Pons. En 1986 un permis exclusif de recherche (PER de Casefabre) a été déposé par le BRGM au nord-ouest des Aspres. Ce permis qui englobe notamment les indices de Glorianes, de Serrabonne et de la Chapelle Saint-Pons a fait l'objet d'une prospection géochimique et alluvionnaire à maille resserrée ainsi que des sondages ;

Les minéralisations aurifères des Aspres sont encaissées dans les formations infracambriennes et cambriennes sous forme de champs filoniens et lentilles de quartz et sulfures (arsénopyrite principalement et pyrite, galène, sphalérite...). L'or se trouve en inclusion dans l'arsénopyrite ou dans le quartz.

Les travaux du BRGM n'ont pas permis de mettre en évidence un contrôle clair de la minéralisation, ni un âge de mise en place. L'absence de grande structure cisailante tardi-hercynienne dans les Aspres permet cependant d'écarter le modèle de type orogénique ;

- **le domaine de la « faille de Mérens »** est localisé à l'ouest des Pyrénées orientales le long du grand accident régional tardi-hercynien de Mérens. Les travaux de prospection géochimique et alluvionnaire permettent de mettre en évidence une zone anomale d'une dizaine de kilomètres de long dans laquelle se situe l'indice de Nohèdes, contenu dans des grès grossiers et conglomérats cambriens de la formation d'Évol. Les investigations réalisées par le BRGM n'ont pas permis de proposer un modèle précis concernant la minéralisation aurifère de Nohèdes où l'or semble être largement associé à l'arsenic et parfois au molybdène. Malgré la présence de la faille de Mérens proche de l'indice de Nohèdes, aucune évidence ne permet d'avancer une hypothèse de type orogénique.

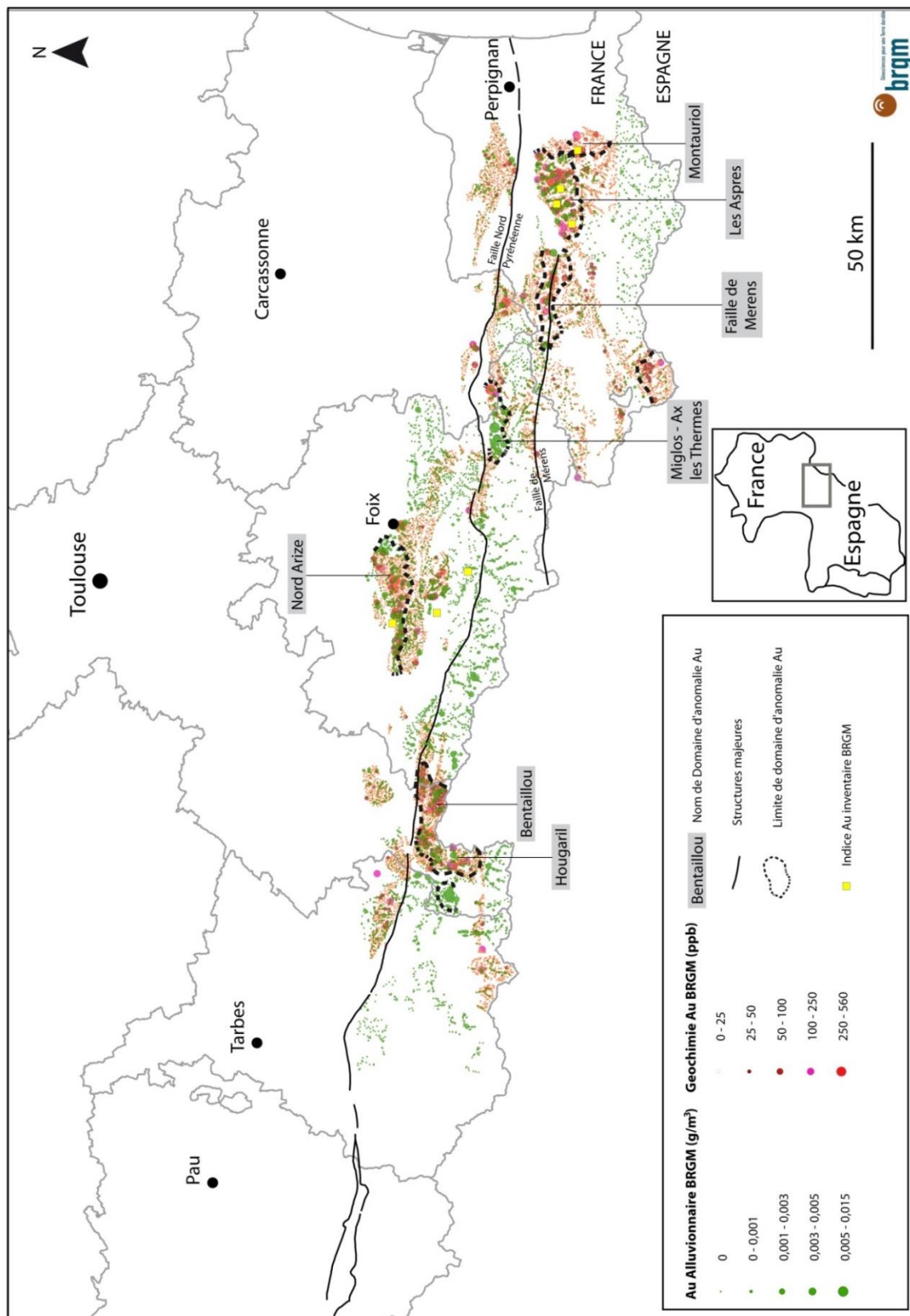


Figure 10 : Carte couplant les résultats de la prospection géochimique et alluvionnaire de l'Au réalisé par le BRGM dans la Zone Axiale et les massifs Nord Pyrénéens avec la localisation des indices Au de l'inventaire minier du BRGM et des grands domaines d'anomalies.

D'autres domaines anomaux (géochemie et alluvionnaire) concernant l'or dans la Zone Axiale (Hougaril, Bentaillou, Miglos...) et les massifs Nord-Pyrénéens (Nord Arize) n'ont pas été prospectés en détail après l'inventaire minier français.

Les indices aurifères mis en évidence dans le piémont ariégeois soulignent la présence d'or alluvionnaire dont l'origine (or primaire) est actuellement controversée ou méconnue.

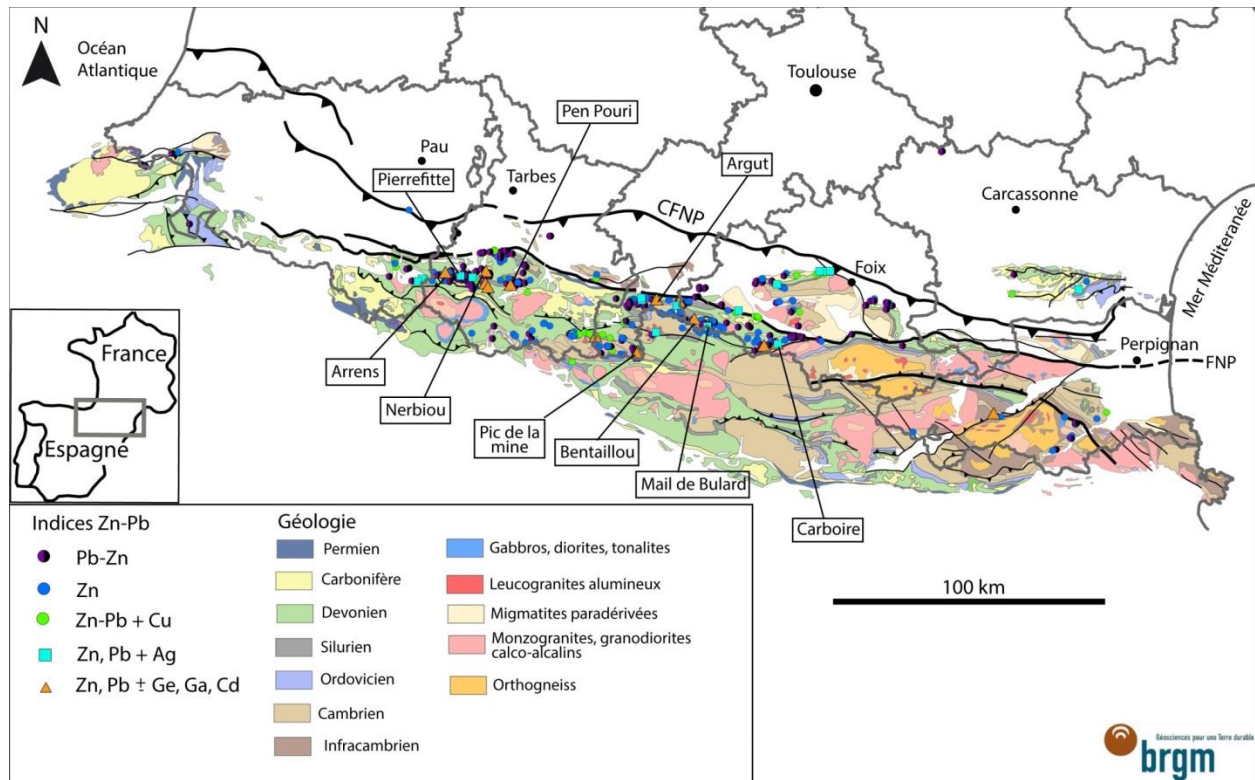
On notera enfin la particularité du domaine du Massif du Labourd, situé dans les Pyrénées atlantiques qui n'a pas été couvert par la prospection géochimique et alluvionnaire du BRGM mais qui est connu pour ses indices aurifères (Fortuné et Tollon, 1980).

En conclusion, les résultats des travaux (prospection alluvionnaire et géochimique) indiquent une répartition complexe des phénomènes aurifères sur l'ensemble de la Zone Axiale et Nord-Pyrénéenne, correspondant à plusieurs phénomènes distincts développant des minéralisations probablement diffuses. Ils ne permettent pas de recommander précisément un domaine et un modèle d'exploration. Les résultats seraient à réinterpréter avec des contrôles de terrain complémentaires et l'exploration à reprendre, sans idée préconçue.

6. Les minéralisations à zinc-plomb (+ germanium)

Le district zincifère des Pyrénées (Figure 11) est connu depuis l'époque gallo-romaine où certains gisements auraient été partiellement exploités.

Concernant l'époque moderne, c'est dans les années 1850 que des travaux de prospection puis d'exploitation en mine souterraine de zinc et de plomb ont débuté, alternant quelques périodes fastes interrompues par de nombreuses années de fermeture.



Les formations ordoviciennes et dévoniennes de la Zone Axiale des Pyrénées, dans les départements des Hautes-Pyrénées, de la Haute Garonne et de l'Ariège, présentent de nombreuses petites exploitations anciennes ainsi que des mines de taille plus conséquente telles que les mines de Pierrefitte, de Carboire et du Bentaillou.

Leur étude par les équipes du BRGM (Pouit *et al.*, 1979), réalisée en soutien des travaux de l'Inventaire et les thèses réalisées sur ce thème (e.g. Braux, Dommanget, Nicol, Vernhet), convergent pour indiquer qu'il s'agit principalement de gisements de type sédimentaire-exhalatifs (SEDEX) encaissés dans des carbonates et en relation étroite avec un hydrothermalisme de bassin en contexte extensif, remobilisés par les déformations et le magmatisme hercynien.

La mine de Pierrefitte représente l'exploitation la plus importante de la région avec plus de 2 Mt de minerai produites à une teneur moyenne de 8 % de Zinc - plomb.

Les travaux de prospection réalisés par le BRGM et la SNEAP (Société Nationale Elf Aquitaine Production) pour le zinc et le plomb restent incomplets et ne couvrent pas tous les terrains paléozoïques de la Zone Axiale des Pyrénées françaises. Les résultats des travaux de prospection ainsi que les indices miniers Zinc - plomb sont présentés dans la *figure 12* qui est une compilation des données géochimiques (BRGM et SNEAP) et alluvionnaires avec une interprétation des grands domaines d'anomalies à Zinc - plomb.

On précisera que les données géochimiques et alluvionnaires présentées dans la *figure 12* concernent le plomb et non pas le zinc. En effet, le plomb est systématiquement associé au zinc et beaucoup moins mobile que ce dernier. Les données plomb marquent donc mieux les anomalies que le zinc qui a tendance à se disperser plus facilement.

Sur la *figure 12*, 11 domaines d'anomalies géochimiques et alluvionnaires sont mis en évidence avec 3 domaines de premier plan : Bentaillou, Carboire et Pierrefitte.

- **le domaine du Bentaillou**, situé à cheval entre la Haute Garonne et l'Ariège, a été couvert uniquement par la prospection géochimique du BRGM mais la présence de nombreux indices de zinc et des anciennes mines de Bentaillou et du Mail de Bulard en font un sujet potentiel.

Les minéralisations ordoviciennes Zinc - plomb $\pm$ Ag du Bentaillou sont encaissées dans les calcaires blancs du Bentaillou d'origine récifale, les calcaires troués de l'Asghill et parfois dans des conglomérats lenticulaires, riche en galets de rhyolite et carbonate, considérés comme l'équivalent latéral du calcaire du Bentaillou. Il s'agit principalement de minéralisations stratiformes présentes sur au moins 3 niveaux et dont les relations avec leurs encaissants sont très mal connues mais sembleraient être contrôlées par un réseau de failles syn-sédimentaires de directions N110°E et nord - sud (Pouit, 1984) ;

- **le domaine de Carboire**, situé entre la faille Nord-Pyrénéenne et la frontière espagnole, a été principalement couvert par la prospection géochimique du BRGM et en partie par la prospection alluvionnaire de la SNEAP.

Peu d'indices minéralisés ont été décrits dans ce domaine mais la minéralisation de Carboire, qui se présente en 2 formations parallèles connues sur 1,5 km de long et plus de 500 m de dénivelé, semble être l'une des plus conséquentes du domaine paléozoïque des Pyrénées. Les minéralisations, principalement stratiformes et rubanées, sont encaissées dans des carbonates soit massifs soit lités et de schistes noirs du Dévonien inférieur. Cependant, le domaine de Carboire reste peu étudié et insuffisamment compris, notamment les contrôles paléogéographiques de la minéralisation, ce qui ne permet pas de proposer de modèle d'exploration satisfaisant ;

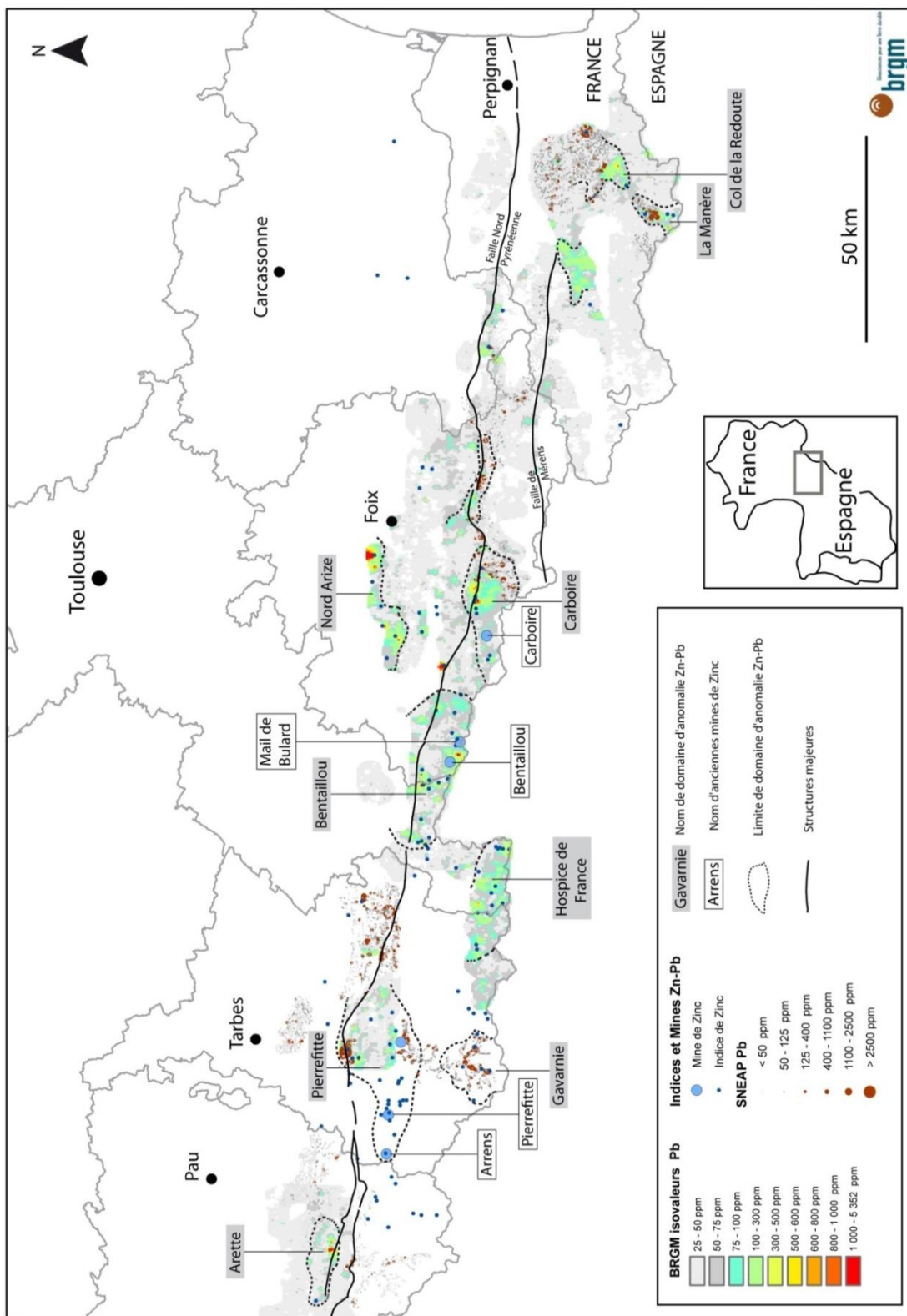


Figure 12 : Carte des résultats des campagnes de prospection géochimique BRGM et SNEAP du Pb dans la Zone Axiale et les massifs Nord Pyrénéens avec la localisation des indices et anciennes mines de zinc-plomb et des

- **le domaine de Pierrefitte**, situé au sud de la faille Nord-Pyrénéenne dans les Hautes-Pyrénées, n'a été que très partiellement couvert par les prospections géochimiques du BRGM et alluvionnaires de la SNEAP. Cependant, de nombreux indices minéralisés et d'anciennes mines, exploitées jusqu'en 1970, sont présents dans ce domaine ;

Dans le domaine de Pierrefitte, décrit comme une structure en anticlinorium, les minéralisations stratiformes Zinc - plomb sont principalement de type SEDEX et sont encaissées dans l'Ordovicien supérieur (Caradoc) et le Dévonien supérieur (calcaires de l'Emsien et du Famennien) (Pouit, 1985).

Les indices minéralisés de l'Ordovicien semblent négligeables et n'ont pas été étudiés. En revanche, les minéralisations zincifères stratiformes du Dévonien supérieur, telles que celles d'Arrens et du Nerbiou semblent contenir les réserves connues les plus importantes de la Zone Axiale des Pyrénées, avec un potentiel probablement supérieur à celui des anciennes mines.

En effet, les derniers travaux de prospection permettent d'estimer des réserves de Zinc - plomb entre 2 et 4 Mt à 5 - 10 % de Zinc - plomb et entre 1 et 3 Mt de barytine pour le gîte d'Arrens et environ 2 Mt à 10 % de Zinc - plomb pour celui du Nerbiou.

Cela fait d'Arrens l'objectif prioritaire principal concernant le Zinc - plomb dans les Pyrénées, voire en France. Sa faisabilité économique et technique est à entreprendre en priorité, avant d'envisager de nouvelles campagnes de prospection plus amont sur des sujets moins connus et plus difficiles dans les domaines de Carboire et du Bentaillou.

D'autres domaines d'anomalies comme la Manère, le Col de la Redoute, Arette ou l'Hospice de France semblent présenter un potentiel zincifère plus limité, marqué par de rares indices minéralisés et des réponses géochimiques dispersées.

L'intérêt du domaine du Nord Arize est, quant à lui, plus difficile à apprécier en raison d'une prospection géochimique très incomplète. Plusieurs indices minéralisés et une ancienne exploitation gallo-romaine sont signalés, ainsi que des corps barytiques d'aspect karstique. Ceci évoque des minéralisations de couverture dites MVT (Missipi Valley Type) en liaison avec la paléogéographie du Trias et du Lias.

En conclusion, de nombreux indices minéralisés et exploitations minières anciennes sont présents dans les Pyrénées, faisant de la Zone Axiale une province zincifère significative, mais dont les mines paraissent relativement petites, avec des teneurs moyennes ne dépassant pas 10 % de Zinc - plomb.

Dans cette province, le secteur d'Arrens dans le domaine de Pierrefitte montre la présence de ressources significatives en plomb-zinc et barytine ; il est considéré comme étant l'un des principaux gisements français pour le zinc et le principal pour la barytine. Il représente sans ambiguïté l'objectif principal pour les minéralisations à Pb-Zn et barytine des Pyrénées. Son développement permettrait d'envisager une reprise des travaux de prospection à l'échelle plus régionale en vue de découvrir des objectifs similaires.

Il existe d'autre part une seconde problématique, celle des métaux stratégiques, en particulier le germanium, comme sous-produit des minéralisations zincifères. Des minéraux germanifères ont été décrits dans la province zincifère pyrénéenne (Oudin *et al.*, 1988), toutefois la nature de ces minéraux et leur position par rapport aux minerais ne semble pas favorable. Cependant le niveau des connaissances reste très limité et ce thème reste totalement ouvert en raison d'études insuffisantes, en particulier dans le secteur d'Arrens et du Nerbiou.

7. Cartographie prédictive

Les techniques de la cartographie prédictive ont été utilisées sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne pour produire un ensemble de documents qui permettent un ciblage de zones à plus fort potentiel en minéralisations primaires à tungstène, or et zinc - plomb (Ge).

7.1. PRINCIPES ET TECHNIQUES

La cartographie prédictive consiste en un ensemble de techniques permettant de combiner des données géoréférencées d'origine diverses pour produire des zones favorables à la présence d'un phénomène recherché (« Target Generation »). Typiquement, pour des recherches de zones minéralisées, on va chercher à combiner les indices connus, la prospection géochimique et les cartes géologiques pour tenter de définir les formations et/ou les environnements géologiques favorables à la présence de minéralisations.

L'usage de ces techniques a été rendu possible par l'intermédiaire des logiciels de type SIG (Système d'Information Géographique) et aussi par la constitution de bases de données d'indices et mines et d'un corpus de cartes géologiques digitalisées intégrables dans ces systèmes. Pour les Pyrénées, on a pu avoir accès à une première version des cartes harmonisées au 1/50 000 issues du programme RGF. Ces cartes très détaillées ont nécessité d'être synthétisées pour le besoin de cette étude (cf §3.2)

Plusieurs techniques coexistent pour générer des cartes prédictives et, dans cette étude, nous en utiliserons 2 : le Weight of Evidence (WoE) et la Cell Based Association (CBA).

7.1.1. Weight of Evidence (WoE)

Le Weight of Evidence (WoE) est une approche statistique (Bonham-Carter *et al.*, 1989; Bonham-Carter, 1994) qui utilise les règles de Bayes pour combiner des données probantes avec l'hypothèse d'indépendance conditionnelle.

L'application de cette méthode suppose la présence d'un ensemble de points d'apprentissage sur une surface d'étude couverte de polygones (géologiques par exemple).

Le principe du calcul consiste à estimer pour chaque unité lithologique la probabilité d'y trouver une occurrence minéralisée par rapport à la probabilité de la trouver à l'extérieur de cette unité.

En pratique, la méthode que nous avons employée consiste à calculer le ratio du pourcentage d'indices contenus dans une formation sur le pourcentage de surface couvert par cette même formation, ce qu'on peut symboliser ainsi :

$$\text{WoE} = \% \text{ indices contenus dans la formation X} / \% \text{ surface formation X}$$

Quand on étend ce calcul à toutes les formations de la zone d'étude, cela revient à calculer une densité relative d'indices par unité de surface de chaque formation. En première analyse, plus WoE est élevé, plus la probabilité de trouver une occurrence par unité de surface est élevée et donc, plus prospective est cette formation.

Le WoE est un estimateur simple du potentiel d'une formation à contenir des minéralisations. En première intention et si les occurrences sont nombreuses, c'est une méthode satisfaisante de recherche de favorabilité.

Toutefois, on voit bien aussi que le WoE est sensible à la qualité de positionnement des points (une occurrence ne peut être que dans une formation et il faut qu'elle soit donc superposée à la bonne formation pour rendre bien compte de son potentiel) et aussi à la surface relative des formations (un indice sur une toute petite surface générera un WoE plus grand que plusieurs indices sur une surface plus grande, ce qui n'est pas forcément pertinent). Un autre défaut de la méthode est aussi de ne pas prendre en compte les regroupements d'indices (« clusterisation ») : si tous les indices sont localisés dans une même petite surface d'une formation, le WoE qu'ils vont générer sera appliqué à toute la surface alors qu'il est possible que seul le contexte spécifique autour des points soit favorable.

7.1.2. CBA (Cell Based Association)

Principes de la CBA

Comme le WoE est très sensible à la précision du positionnement des indices et à la surface relative des formations, on a développé une méthode dite CBA (Cell Based Association) qui permet de s'affranchir en partie de ce problème en considérant non pas une relation point/formation mais une relation point/cellule pluri-lithologique (carrée de 2 000 m x 2 000 m dans cette étude). Dans ce cas, ce qu'on va donc rechercher est un environnement géologique favorable plutôt qu'une formation unique contenant un ou plusieurs indices.

Dans chaque cellule de la grille, la présence d'une des formations de la zone d'étude est codée à 1 et son absence est codée à 0. On a fait le choix de ne pas prendre en compte les surfaces relatives de chaque formation, seule leur présence ou absence est considérée comme significative.

Il va de soi que cette démarche suppose que ce qu'on recherche réponde à une contrainte géologique (c'est aussi le cas pour le WoE), c'est-à-dire qu'il existe une relation entre les lithologies contenues dans la cellule et la minéralisation et que les cartes géologiques sont pertinentes pour y répondre.

On a utilisé 2 méthodes différentes pour sélectionner les cellules favorables, une par CAH et une autre par « ranking » à partir des associations présentes dans les cellules étalons (celles contenant un ou plusieurs gîtes).

- **Sélection à partir de cellules classées par CAH**

Cette méthode consiste à classer l'ensemble des cellules constituant la grille couvrant la zone d'étude par CAH (Classification Ascendante Hiérarchique). Cette classification est produite à partir des valeurs 1 et 0 présentes dans chaque cellule. On obtient ainsi une nouvelle carte dans laquelle les formations géologiques unitaires sont remplacées par une classe de CAH représentant les familles d'associations lithostratigraphiques présentes dans les cellules.

La recherche de zones favorables se fait alors par une simple démarche analogique en partant de l'hypothèse que les cellules contenant des minéralisations connues sont représentatives. Il suffit alors de rechercher sur toute la zone d'étude les cellules appartenant au même groupe que celles contenant une minéralisation. Une fois la carte géologique reclassée, elle est utilisable pour toutes les cartographies prédictives utilisant cette méthode.

- **Sélection à partir de cellules classées par ranking à partir des fréquences**

Toujours à partir des cellules codées, cette méthode consiste à faire le rapport entre les fréquences des formations présentes dans les cellules contenant un ou plusieurs indices avec les fréquences des mêmes formations dans toutes les cellules de la zone d'étude. La fréquence est calculée par le rapport entre le nombre de fois où la formation est présente dans toutes les cellules avec minéralisation. Pour la population totale, cette fréquence est calculée par le rapport entre le nombre de fois où la formation est présente dans toutes les cellules sur le nombre total de cellules de la zone d'étude.

$FRQ_form1_mineralisation = nb \text{ cellules minéralisées avec Form1} / Nb \text{ total de cellules minéralisées}$

$FRQ_form1_zone_étude = nb \text{ cellules de la zone d'étude avec Form1} / Nb \text{ total de cellules de la zone d'étude}$

$Ranking \text{ form1} = FRQ_form1_mineralisation / FRQ_form1_zone_etude$

Si ce rapport est supérieur à 1, on l'interprète comme une formation favorable car elle est plus abondante dans les cellules minéralisées que dans la population générale.

Le ranking (ou score) total est calculé par la somme des ranking de chaque formation présente dans les cellules avec minéralisation. Les formations non pertinentes comme les formations post-paléozoïques et le quaternaire ne sont prises en compte dans ces calculs.

7.2. RECODAGE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE

Pour atteindre un niveau de détail suffisant pour réaliser cette étude, il a été nécessaire de produire une carte géologique spécifique par synthèse des cartes géologiques harmonisées issues des cartes géologiques au 1/50 000 du programme RGF (Référentiel Géologique de la France). L'objectif était de conserver un niveau de détail incluant de petits éléments cartographiés tout en homogénéisant les descriptions des différentes pages de formations majeures du socle anté-mésozoïque.

Pour réaliser cette opération, il a été généré un codage de type litho-stratigraphique adapté à la thématique de recherche de zones favorables à la présence de minéralisations. Ensuite, les contours des polygones constitutifs des cartes ont été regroupés par leur nouveau codage synthétique (fonction « Dissolve »).

7.2.1. Codage lithologique

Clé de lecture des codes lithologiques :

Granitoïdes	Filons	Roches métamorphiques
DIOR : Diorite	DOLE : Filon de dolérite	AMPH : Amphibolites
GABB : Gabbro	PEGM : Filon de pegmatite	GNEISS: Gneiss
GDIOR: Granodiorite	FQTZ : Filon de quartz	LEPT: Leptynites
GRAN : Granite	LHERZO : Lherzolite	MARB : Marbres
MZGR: Monzogranites	OPHIT : Ophite	MCSH : Micaschistes
SYEN: Syénite	MINE : Filons minéralisés	MIGM: Migmatites
UB: Ultra basites		ORTG: Orthogneiss
		SCSH: Schistes
		ALBIT : Albitite

Formations diverses du socle	Formations sédimentaires et quaternaires	
CALC : Calcaires	ALLU : Alluvions	
CGT : Conglomérats	III : Formations tertiaires	
GRES : Grès	CSUP : Formations Crétacé supérieur	
GRWK : Greywackes	CINF : Formations Crétacé inférieur	
FLYSH : Flysh	JSUP : Formations Jurassique supérieur	
KORN : Cornéennes	JMOY: Formations Jurassique moyen	
LYD : Lydiennes (jaspes)	JINF: Formations Jurassique inférieur	
QZITE : Quartzite	TRIAS: Formations triasiques	
VOACI : Volcanites acides	BAUX : Bauxites	
VOBAS : Volcanites basiques		
VSED : Volcano- sédimentaire		
PERM : Permien		
CARB : Carbonifère s.l.		
DEVO : Dévonien s.l.		
ORDV : Ordovicien s.l.		
SILU : Silurien s.l.		

Tableau 1 : Codes lithologiques utilisés pour la synthèse géologique à partir des données RGF.

7.2.2. Codage stratigraphique

Pour ce codage numérique, il a été choisi de respecter au mieux les indications des cartes géologiques, notamment pour l'attribution des formations métamorphiques à leurs unités respectives (Tableau 2, Figures 13 et 14).

- 7** : Permien
- 6** : Carbonifère
- 5** : Dévonien
- 4** : Silurien
- 3** : Ordovicien
- 2** : Cambrien
- BC** : Briovérien
- PK** : Précambrien

Tableau 2 : Codage stratigraphique pour les formations anté-mésozoïques.

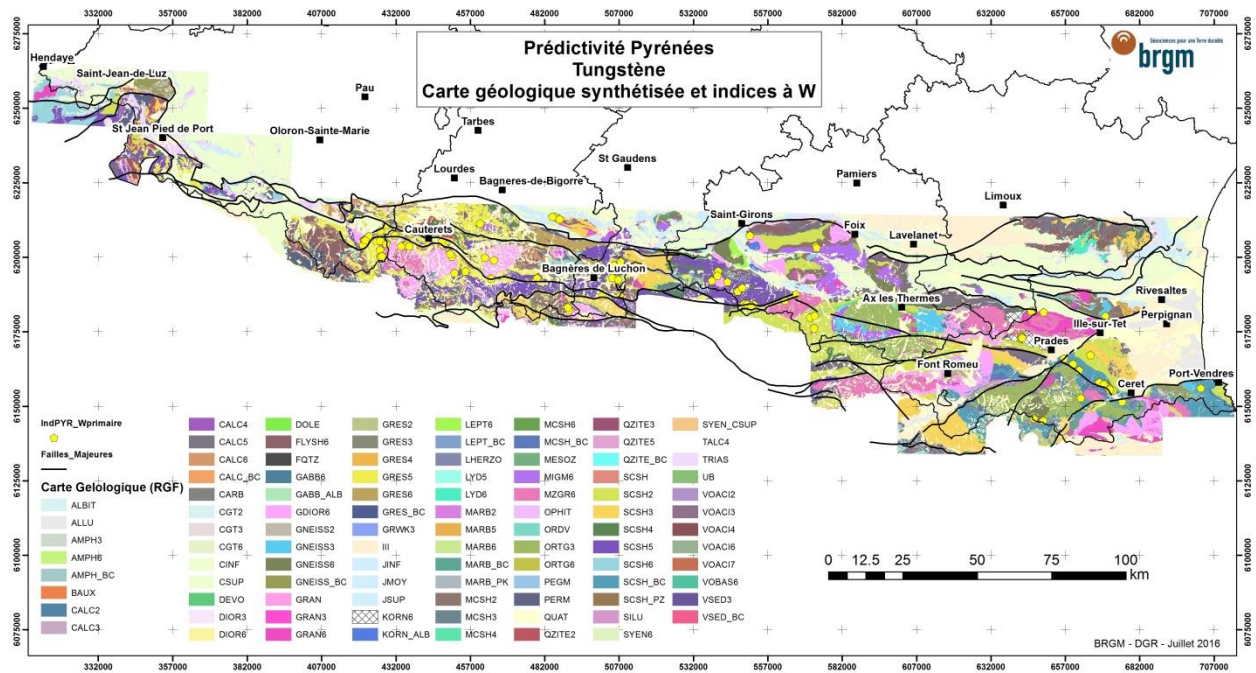


Figure 13 : Carte géologique des Pyrénées synthétisée (recodage). Source RGF.

Ainsi, MZGR6 se traduit en « monzogranite d'âge Carbonifère ».

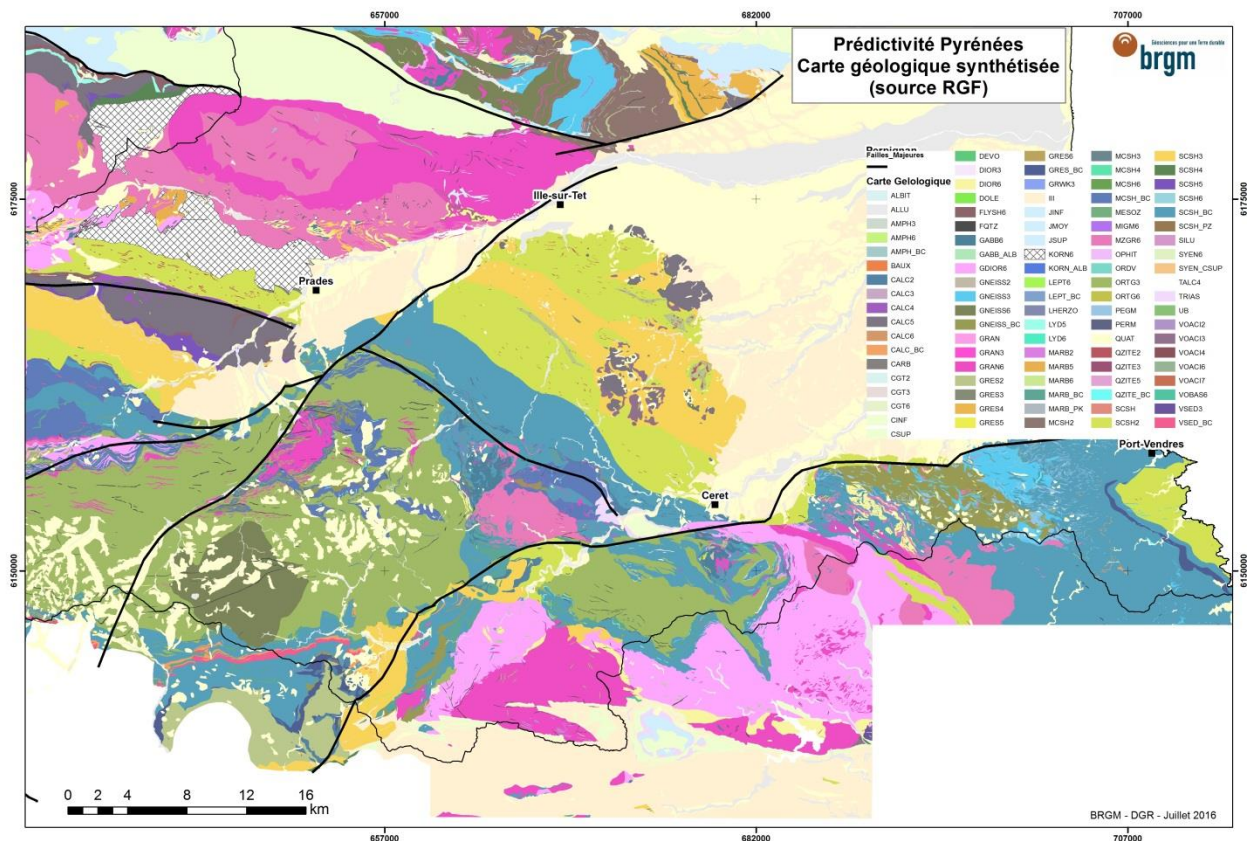


Figure 14 : Zoom de la carte géologique synthétisée des Pyrénées (source RGF).

Le codage des formations « hors socle » (Mésozoïque, Cénozoïque et Quaternaire) a été très simplifié car ces formations ne jouent *a priori* pas de rôles dans la genèse des gisements primaires des éléments recherchés.

8. Cartographie prédictive pour W

105 indices contenant du W sont répertoriés pour l'ensemble du massif. Sur ces 105 indices, 92 ont été sélectionnés comme correspondant à une source primaire dont 53 sont attribués à des skarns (roches carbonatées affectée par un métamorphisme de contact, source classique de gisements à W sous forme de scheelite dont l'exemple typique est celui de la mine de Salau en Ariège). Ces indices sont surtout abondants au centre du massif et vont ensuite jusqu'aux Pyrénées orientales. Ils sont inconnus dans les Pyrénées atlantiques.

8.1.1. Weight of Evidence

La méthode du Weight of Evidence (WoE) a été utilisée pour identifier les formations les plus favorables à la présence de W en utilisant les données de la carte géologique synthétisée et les 92 indices primaires (Figure 15).

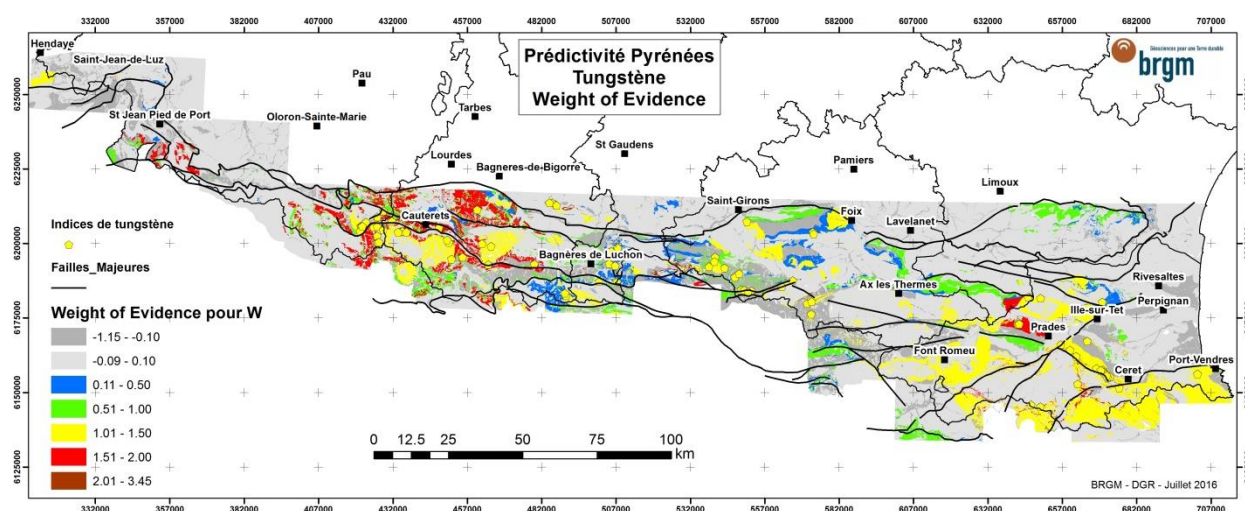


Figure 15 : Résultats du Weight of Evidence pour le W à l'échelle des Pyrénées.

La formation la plus favorable à la présence d'indices à W est représentée par les calcaires cambriens (Tableau 3) suivie des marbres briovériens et des cornéennes carbonifères (KORN6), toutes roches localement ou complètement affectées par le métamorphisme de contact et ayant pu développer des skarns.

Codage géologique	WoE
CALC2	3.45
MARB_BC	1.98
KORN6	1.76
GRES5	1.75
SCSH_BC	1.46
GRAN6	1.43
GDIOR6	1.26
GRES2	1.01
CALC5	0.56
MCSH2	0.48

SCSH4	0.40
QUAT	0.08
MZGR6	0.07
SCSH3	0.03
SCSH2	-0.12
SCSH5	-0.26
TRIAS	-0.55
ALLU	-1.16

Tableau 3 : Valeurs du WoE pour les formations favorables à la présence d'indices à W.

Les formations détritiques dévoniennes GRES5 et SCSH5 montrent aussi des scores élevés très certainement à relier à des niveaux carbonatés avec développement de skarns.

Viennent ensuite les granitoïdes carbonifères (GRAN6 et GDIOR6) qui représentent les intrusifs qui ont généré le métamorphisme de contact et l'apport du stock métal.

Les formations des calcaires dévoniens qui encaissent le gisement de Salau ressortent avec un score plus faible (0,56) surtout du fait qu'ils couvrent 4,5 % de la surface de la zone d'étude à comparer avec les 0,18 % couverts par les calcaires cambriens. On constate ici un des biais de la méthode WoE où la surface relative des formations est un critère de pondération qui peut amener à minorer injustement certaines formations.

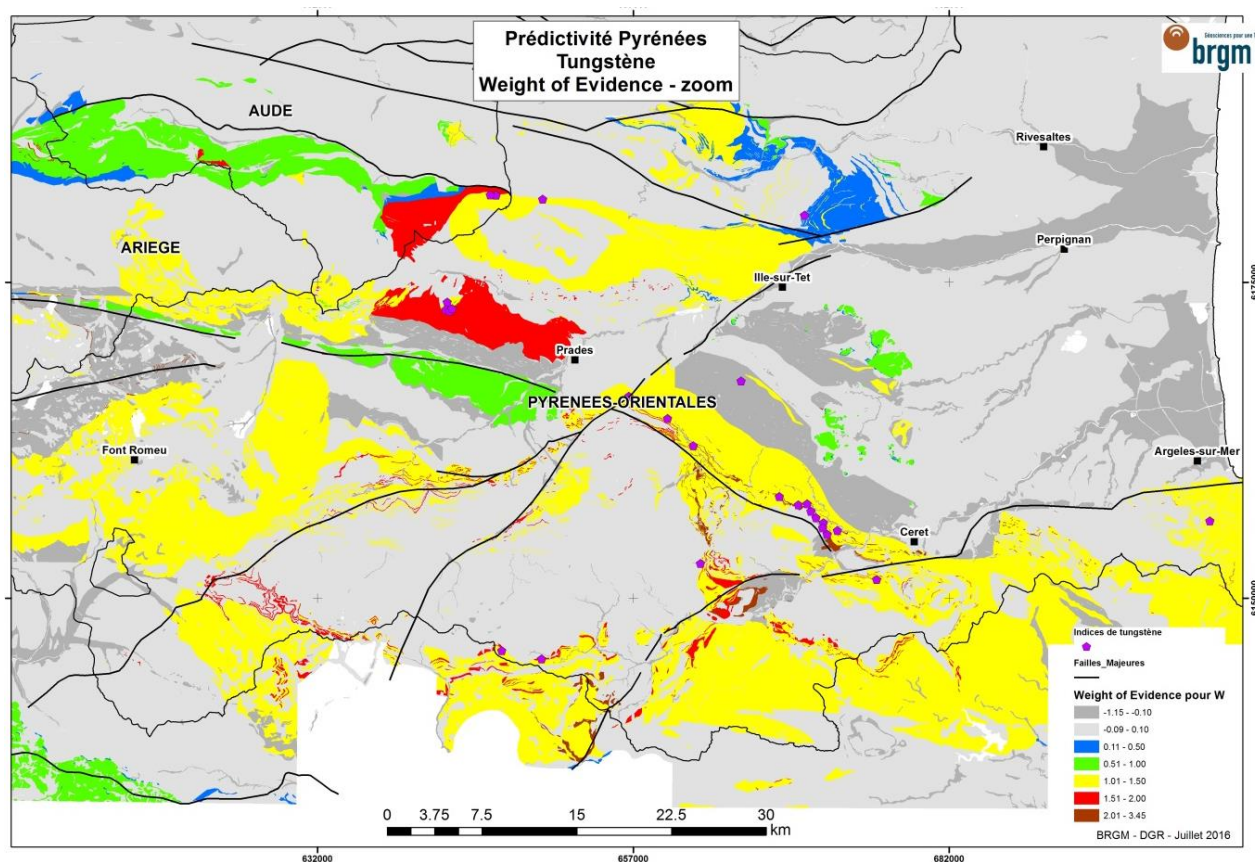


Figure 16 : Zoom sur le Weight of Evidence pour W sur les Pyrénées.

Les formations CALC2 (calcaires cambriens) et MARB_BC (marbres briovériens) sont surtout présentes dans la partie orientale des Pyrénées (Figure 16), dans la région du Vallespir et courent ensuite vers l'ouest sous forme de petits bancs dilacérés jusqu'en Ariège. La distinction entre ces 2 formations est fonction des auteurs des différentes cartes géologiques ; il est très probable qu'il s'agit des mêmes objets à l'origine.

Les calcaires dévoniens (CALC5) sont eux largement développés sur l'ensemble de la chaîne jusqu'aux Pyrénées atlantiques. Par contre, les grès sont plus développés en allant vers l'ouest (GRES5).

Ces 2 grands groupes de formations constituent une cible prioritaire pour la prospection du W dans les Pyrénées avec comme guide la proximité de corps magmatiques qui sont les vecteurs de la skarnification et donc, des éventuelles minéralisations. Toutefois, avec le WoE on peut transmettre des scores importants calculés à partir de phénomènes locaux à l'échelle de la chaîne ce qui peut produire des zones favorables anormalement étendues.

8.1.2. CBA par CAH

Comme expliqué dans le paragraphe 7.1.2, une CAH à 250 groupes a été calculée pour l'ensemble des cellules couvrant la chaîne pyrénéenne (Figure 17).

En sélectionnant les cellules contenant au moins un indice primaire à W (les 16 indices Promine), on peut identifier les groupes de CAH porteurs de minéralisation et en compiler les associations lithostratigraphiques majoritairement présentes.

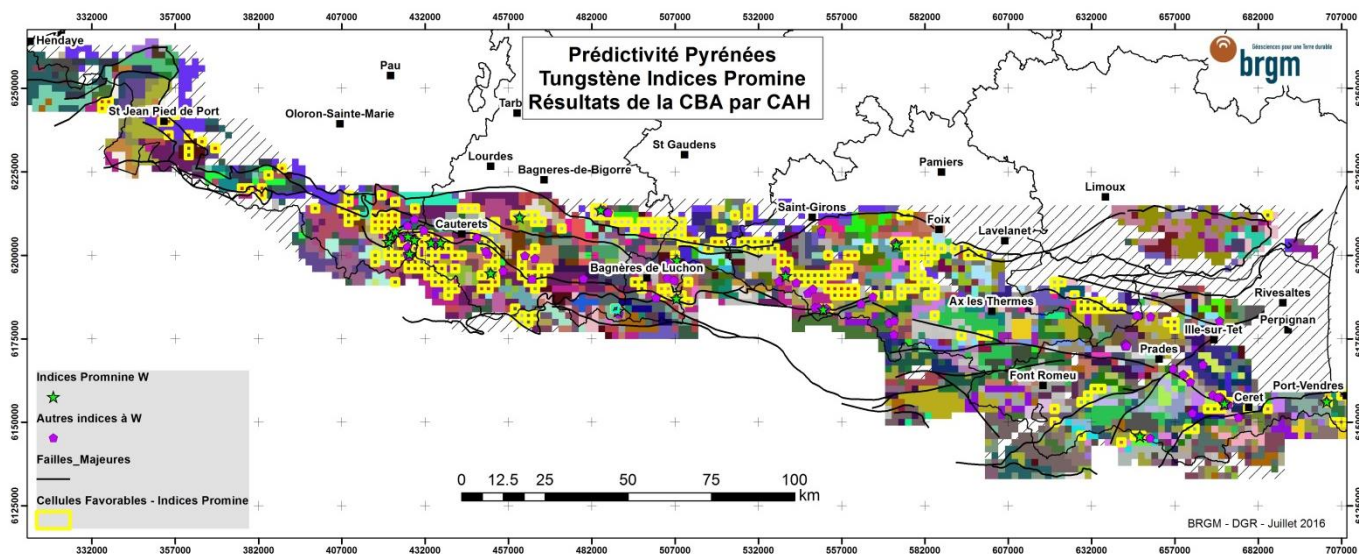


Figure 17 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par CAH à l'échelle des Pyrénées.

327 cellules sont sélectionnées sur les 4 765 cellules de la zone d'étude, soit moins de 7 % de la surface. Ces cellules sont surtout localisées dans la partie centrale de la chaîne en se prolongeant vers l'est.

CAH250	Nombre de cellules	Indice Promine associé	ASSOCIATIONS
56	28	SALAU	GDIOR6 GRES5 CALC5 SCSH5
57	21	ARTOUSTE	GRES5 MZGR6 GDIOR6 CALC5
58	51	SOUSSOUEOU	OPHIT SCSH5 TRIAS
74	57	CHIROULET	MIGM6 (GRAN6)
96	18	BOUCHIDET	QZITES2 SCSH3 SCSH4 GRAN6
124	1	COUARTAOU	CALC2 CGT2 GDIOR6 GRAN6 MCSH2 MCSH3 VOACI6
133	15	ESCALERE	MCSH6 MCSH2 GRAN6
162	48	AOUEN	LYD5 CALC5 FLYSH6 SCSH5
163	22	MALHARDOUN	LYD5 CALC5 GRES5 CALC6 GDIOR6 SCSH5
171	17	BOIS LAVIGNE	VOACI6 CALC5 CALC6 GRES5 FLYSH6
175	14	TOURETTES	MZGR6 VOACI6 GDIOR6 GRES5
193	2	HOUGARIL	SCSH SCSH3 SCSH4 SCSH5 (GRAN6)
201	5	LE BOSC	GNEISS_BC MCSH2 MIGM6 CALC2 GRAN6 QZITE2
211	11	ROC JALERA	MCSH_BC SCSH_BC GNEISS CALC2 GRAN6 MARB_BC
216	7	COSTABONNE	CALC_BC ORTG3 SCSH_BC GNEISS MARB_BC GDIOR6
217	10	ROC DE CHEVRES	CALC_BC SCSH_BC PEGM

Tableau 4 : Tableau des associations présentes dans les groupes de CAH associés à un indice Promine.

Les compositions majoritaires des groupes de CAH associés aux indices (Tableau 4) montrent la forte prépondérance de l'association de roches intrusives carbonifères (GDIOR6, MZGR6 et GRAN6) avec des roches carbonatées plus anciennes (Salau, Artouste, Couartaou, Malhardoun, Le Bosc, Roc Jalera et Costabonne). Les autres indices sont aussi associés à des intrusifs ou à des expressions d'intrusifs possibles (PEGM ou VOACI6) mais la présence des carbonates n'est pas exprimée sur la carte géologique (Tourette, Bouchidet, Escalère, Hougail).

8.1.3. CBA par fréquences sur les indices

La CBA par CAH fournit des résultats qualitativement intéressants mais il y manque une pondération qui permettrait de cibler plus facilement les meilleures cellules autrement que par des références à des gîtes ou indices spécifiques.

La CBA par fréquences est une des solutions qui permet de calculer cette pondération suivant le principe expliqué dans le paragraphe 7.1.2

Appliqué à la thématique W, cette technique permet, à partir de la somme des rapports de fréquence des formations associées à au moins un indice, de donner à chaque cellule une valeur numérique qui va augmenter en fonction de sa « richesse » en formations favorables.

Le résultat de ces calculs illustré dans la figure 18 montre la présence d'au moins 2 grandes zones favorables, une dans les Pyrénées orientales et une dans les Pyrénées centrales, en Ariège et dans les Hautes-Pyrénées. D'autres zones plus limitées sont aussi présentes dans les Pyrénées atlantiques.

On peut noter que ces zones aux scores les plus élevés semblent suivre certains accidents majeurs (figure 18).

Fréquence des formations pour les cellules avec indices W Promine																
CGT2	SCSH	CALC_BC	MCSH6	MCSH3	VOACI6	GNEISS2	GDIOR6	GRES5	LYD5	VOACI3	MCSH2	CALC2	MZGR6	GRAN6	GNEISS_BC	PEGM
0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.15	0.05	0.55	0.5	0.2	0.05	0.15	0.15	0.25	0.4	0.1	0.1
Fréquence des formations pour les cellules de la zone d'étude																
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.13	0.12	0.05	0.01	0.05	0.05	0.08	0.15	0.04	0.04
Rapports de fréquence																
9.93	9.53	9.16	7.01	6.44	6.01	5.41	4.15	4.04	4.00	3.45	3.25	3.09	3.02	2.71	2.66	2.28
Fréquence des formations pour les cellules avec indices W Promine																
MCSH_BC	SCSH5	MIGM6	CALC5	SCSH_BC	GNEISS6	QZITE2	GNEISS3	MARB_BC	OPHIT	FQTZ	CALC6	SCSH3	SCSH2	SCSH4	ORTG3	FLYSH6
0.05	0.35	0.1	0.55	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05
Fréquence des formations pour les cellules de la zone d'étude																
0.02	0.17	0.05	0.27	0.08	0.03	0.03	0.04	0.04	0.08	0.08	0.09	0.13	0.14	0.15	0.08	0.11
Rapports de fréquence																
2.17	2.10	2.05	2.04	1.95	1.67	1.53	1.34	1.25	1.24	1.19	1.10	0.76	0.71	0.69	0.63	0.45

Tableau 5 : Résultats des calculs de fréquences par formations associées aux indices W Promine.

Le tableau 5 montre les résultats des calculs des fréquences par formations associées aux 16 indices Promine (indices de référence) et celles pour les cellules de l'ensemble de la zone d'étude, ainsi que le rapport entre les deux. C'est la somme de ces rapports sur l'ensemble des cellules qui donne le score de « favorabilité » pour chaque cellule (figures 8, 9 et 10). Si le rapport de fréquence est inférieur à 1, cela signifie que la formation correspondante est moins représentée dans les cellules avec minéralisation que dans la population générale, ce qui peut s'interpréter par une « neutralité » de cette formation par rapport au phénomène minéralisateur.

On y retrouve la présence importante des intrusifs acides carbonifères et de leurs manifestations volcaniques (VOACI6). Par contre, en dehors de CALC_BC, les signatures carbonates (CALC 2, CALC5, CALC6) sont relativement plus faibles car ces formations sont fréquentes dans l'ensemble du massif. Toutefois, leur association via la somme des rapports de fréquence va permettre de bien mettre en évidence les cellules où les deux éléments sont présents dans une même cellule.

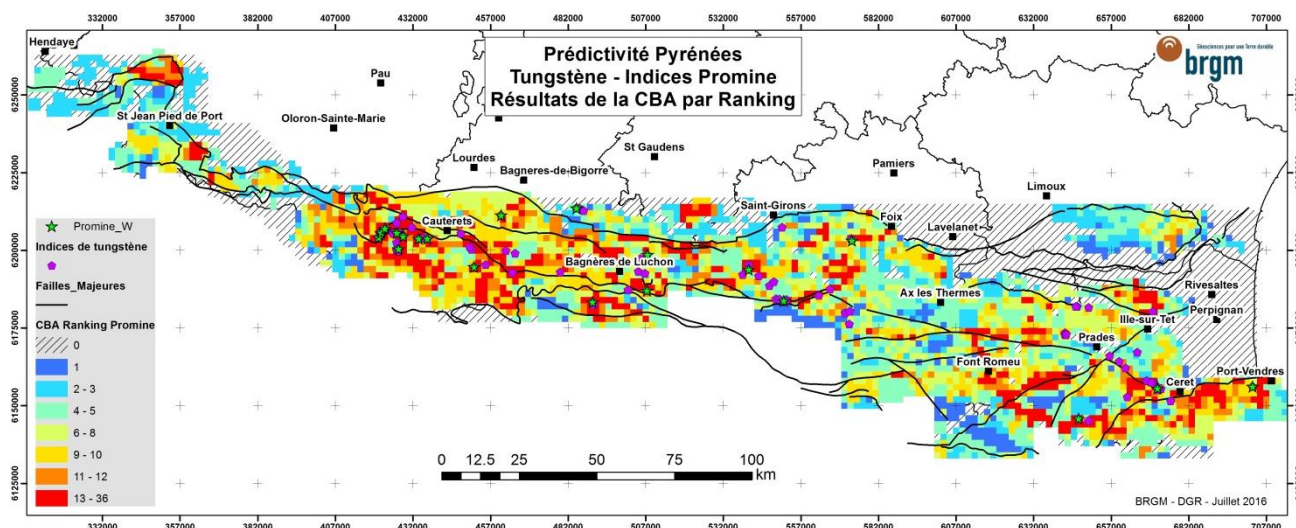


Figure 18 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées.

Sur la carte générale de la CBA par ranking de la figure 18 ressortent deux zones à forte densité de hautes valeurs de ranking : les Pyrénées-orientales de part et d'autre de la vallée du Tech et les Pyrénées-centrales entre Bagnères de Luchon et Cauterets. Le district de Salau, en Ariège ressort de manière plus discrète en suivant une structure WSW-ENE qui pourrait se prolonger vers le NE.

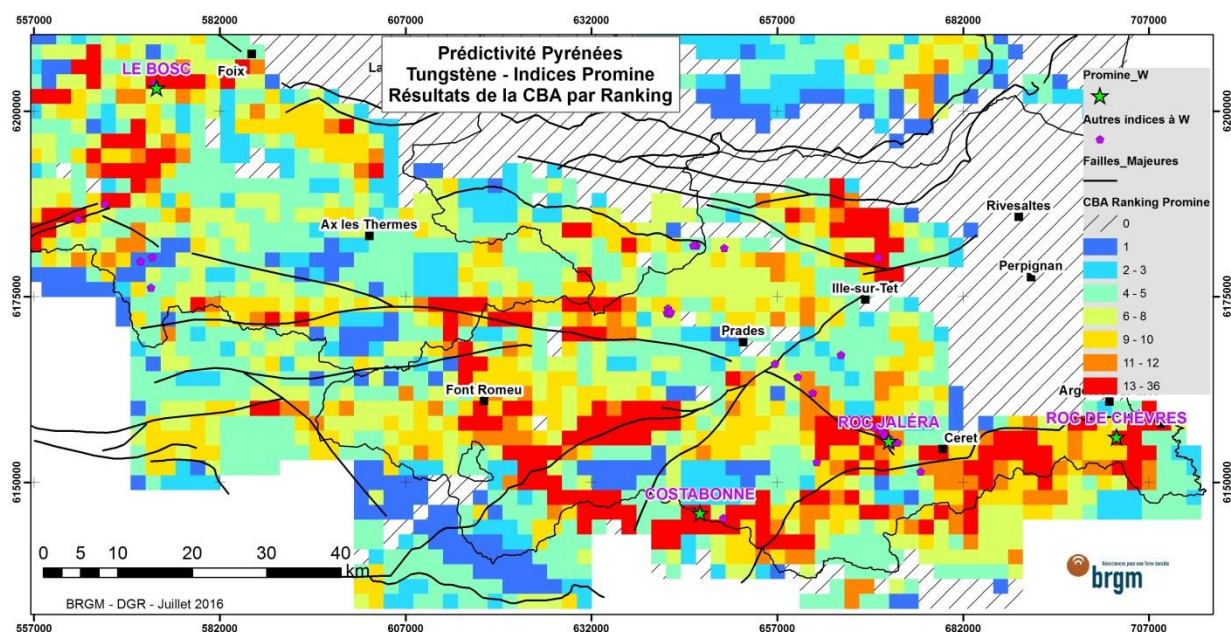


Figure 19 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées-orientales.

La figure 19 centrée sur les Pyrénées-orientales montre les scores élevés (>12) associés aux gîtes de Costabonne, Roc Jalera et Roc de Chèvres. Ces scores traduisent la présence d'intrusifs et de roches carbonatées surtout cambriennes ou antérieures (série de Canaveilles) avec génération de skarns minéralisés. Des indices de moindre importance sont aussi superposés à des cellules à score élevé ce qui permet de valider la démarche et de mettre en évidence un ensemble de cellules qui peuvent constituer des cibles à prospector.

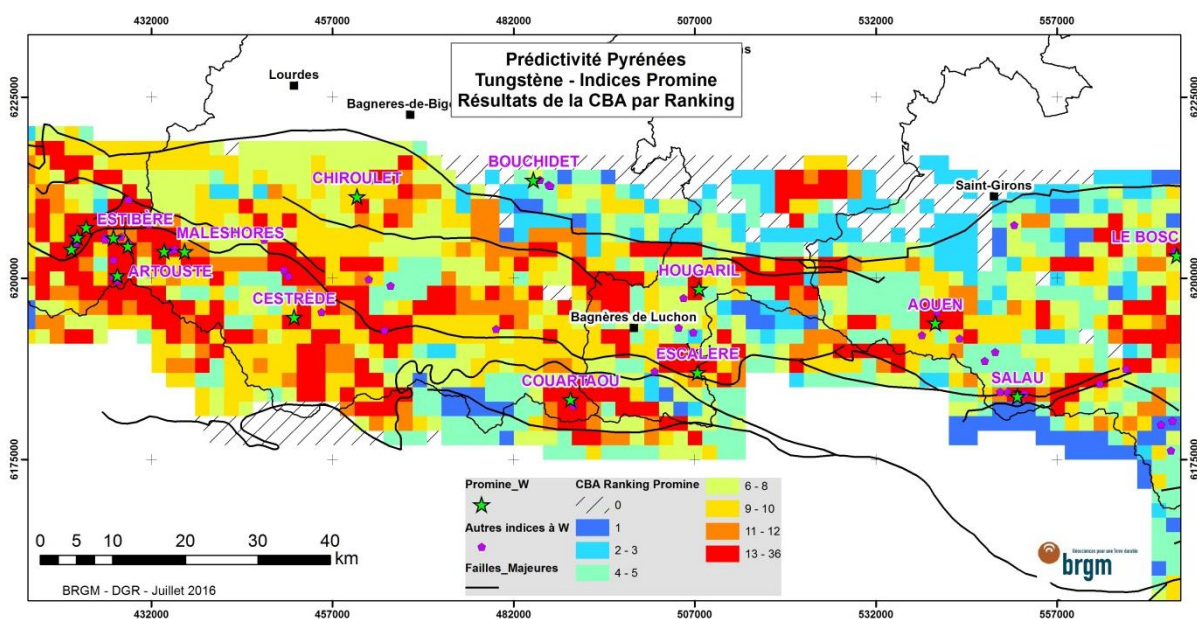


Figure 20 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées-centrales.

La zone des Pyrénées-centrales (Figures 19 et 20) montre une forte concentration de cellules à score élevé, globalement bien associées à une forte densité d'indices (district de Cauterets). Le district de Salau ressort plus discrètement mais est bien structuré en se prolongeant vers l'ENE suivant une structure régionale varisque. Les autres indices comme Hougail, Escalère ou Couartaou présentent un potentiel plus anecdotique même si certains ont fait l'objet de travaux détaillés (e.g. Escalère).

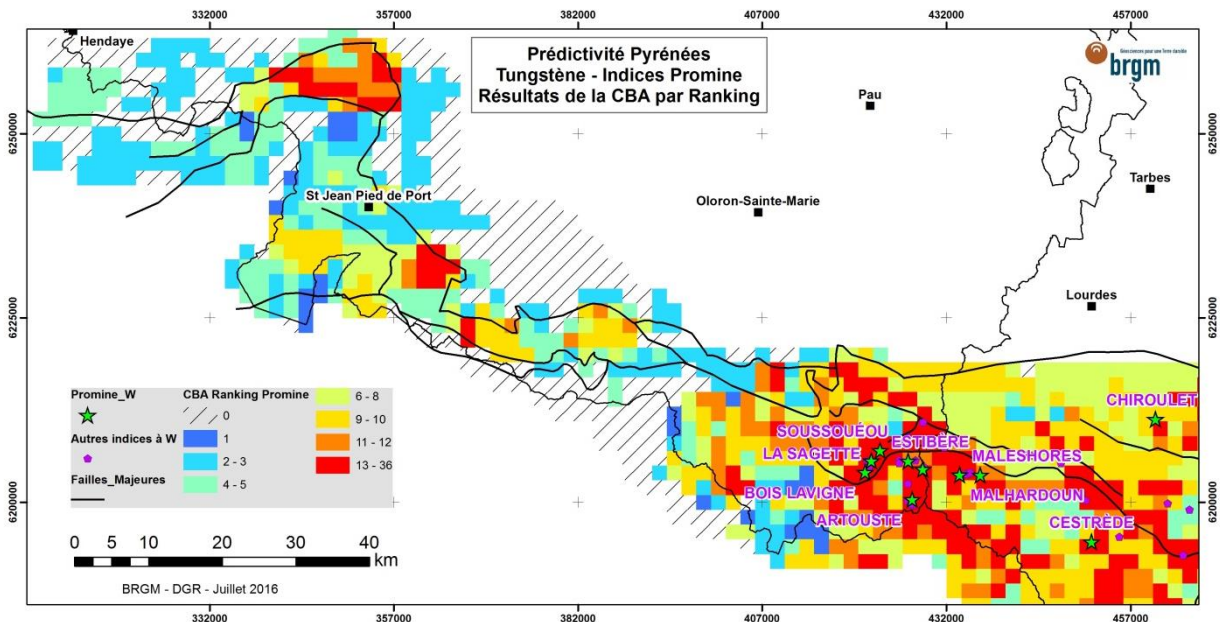


Figure 21 : Carte des résultats de la prédictivité W par la méthode CBA par Ranking à l'échelle des Pyrénées-atlantiques.

Dans le Labourd, au nord de Saint-Jean-Pied-de-Port ressort un ensemble de cellules à score élevé sans indice connu dans un contexte plus ancien de GNEIS2, GNEIS_BC, MCSH_BC, MCSH2, PEGM *a priori* moins favorable à la présence de minéralisation de type skarn à scheelite.

8.1.4. CBA par fréquences sur la géochimie

Sur les Pyrénées, les données de géochimie issues de l'Inventaire peuvent aussi être utilisées dans la même démarche que pour les indices. Il faut toutefois bien avoir conscience que les échantillons sont pris dans les ruisseaux (stream sediment) et qu'ils sont donc plus ou moins éloigné de la source primaire. Mais, avec une taille de cellule de 2 kilomètres de côté et en sélectionnant les teneurs en W > 40 ppm pour les échantillons analysés par le BRGM (les résultats des analyses SNEAP étant parfois douteux pour W), on peut estimer que globalement, ces échantillons correspondent à une source qui doit être dans ou proche des cellules qui les incluent.

L'intérêt d'intégrer ces données est de fournir un jeu de données complémentaire qui peut venir confirmer les résultats obtenus à partir des indices et, potentiellement, valoriser de nouvelles cellules. Toutefois, toute la zone n'a pas été échantillonnée et donc le jeu de données est partiel (cf. chapitre 4)

Seule la démarche par CBA par fréquences a été appliquée à ce jeu de données (Figure 22).

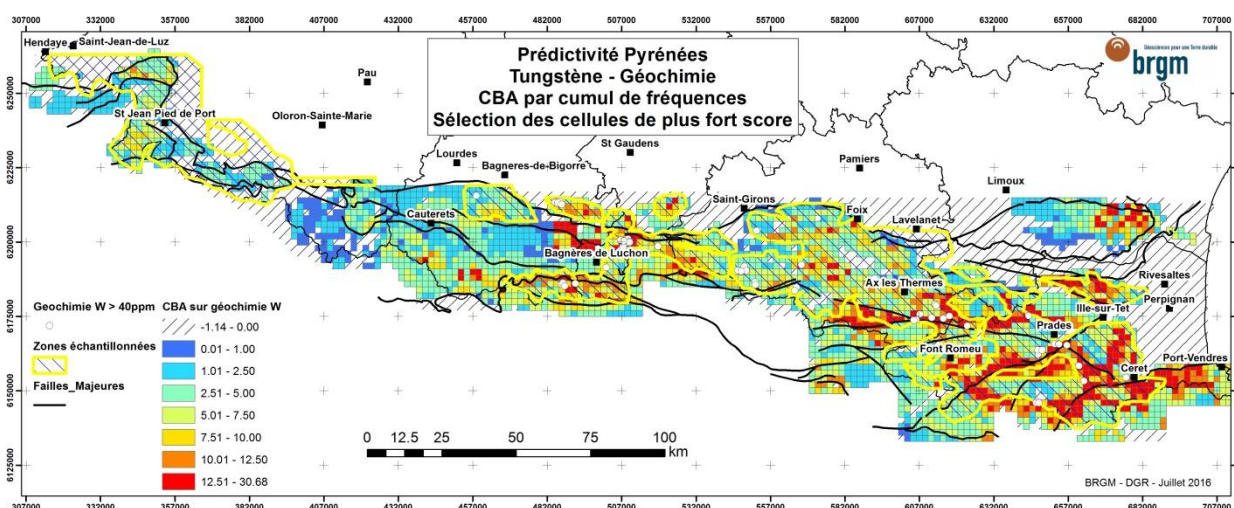


Figure 22 : Résultats de la CBA par somme des fréquences pour les échantillons de géochimie à plus de 40 ppm de W. Les zones ayant fait l'objet d'un échantillonnage de type Inventaire ont été contourées en jaune.

À petite échelle, les résultats obtenus sont très similaires avec ceux issus des indices, surtout dans la partie orientale et centrale de la chaîne (Figures 19 et 20). Ils sont par contre plus faibles pour la partie occidentale très mal échantillonnée (Figure 21).

Fréquence pour les cellules avec au moins un échantillon de géochimie à W >= 40ppm																			
AMPH	ORTG6	SCSH	MARB5	MARB6	VOAC13	GABB6	GNEISS3	CGT2	VSED_BC	MARB_BC	MIGM6	MCSH3	SCSH3	ORTG3	CALC2	LHERZO	GRAN6	GNEISS_BC	CALC3
0.02	0.02	0.07	0.02	0.07	0.10	0.14	0.19	0.02	0.05	0.14	0.02	0.02	0.40	0.24	0.14	0.02	0.38	0.10	0.05
Fréquence des formation pour la population totalopulation totale																			
0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.04	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.13	0.08	0.05	0.01	0.15	0.04	0.02
Rapports de fréquence																			
22.69	16.21	13.61	8.73	6.81	6.58	5.20	5.10	4.73	4.36	3.56	3.34	3.07	3.06	3.01	2.95	2.77	2.58	2.54	2.32
Fréquence pour les cellules avec au moins un échantillon de géochimie à W >= 40ppm																			
SCSH4	CALC_BC	QZITE2	SCSH_BC	MCSH_BC	SCSH5	KORN6	PEGM	MCSH2	SCSH2	MZGR6	GDIOR6	CALC5	DIOR6	VOAC16	GNEISS6	LYD5	FLYSH6	GRES5	
0.33	0.02	0.07	0.17	0.05	0.33	0.02	0.07	0.07	0.21	0.12	0.17	0.33	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
Fréquence des formation pour la population totalopulation totale																			
0.15	0.01	0.03	0.08	0.02	0.17	0.01	0.04	0.05	0.14	0.08	0.13	0.27	0.05	0.02	0.03	0.05	0.11	0.12	
Rapports de fréquence																			
2.29	2.18	2.18	2.16	2.06	2.00	1.72	1.63	1.55	1.52	1.44	1.26	1.24	1.00	0.95	0.79	0.48	0.22	0.19	

Tableau 6 : Rapport des fréquences des formations entre les cellules contenant au moins un échantillon de géochimie à W > 40 ppm et la population générale.

Le tableau 6 des rapports de fréquence par formation montre une plus grande variabilité des formations associées aux environnements associés aux échantillons à plus forte teneur en W par rapport aux indices Promine. Les intrusifs acides (en rouge) et les carbonates (en vert) sont toujours là mais la présence d'autres formations a priori peu propices aux minéralisations à W illustre probablement le fait que les environnements autour des sites de prélèvement de ces échantillons de géochimie ne sont pas ceux des minéralisations primaires.

8.1.5. Synthèse - Zones prospectives

Pour souligner les zones les plus prospectives (Figures 14 à 18), on a choisi de sélectionner les cellules présentant des scores supérieurs à 8,5 à partir de la CBA par fréquences sur les indices et d'y ajouter les cellules à score > 10 pour la géochimie. En fond, en contours rouges, on a disposé les résultats du WoE pour illustrer la meilleure sélectivité de la favorabilité par la prise en compte d'un environnement plus complexe que la simple information « monoformationnelle ».

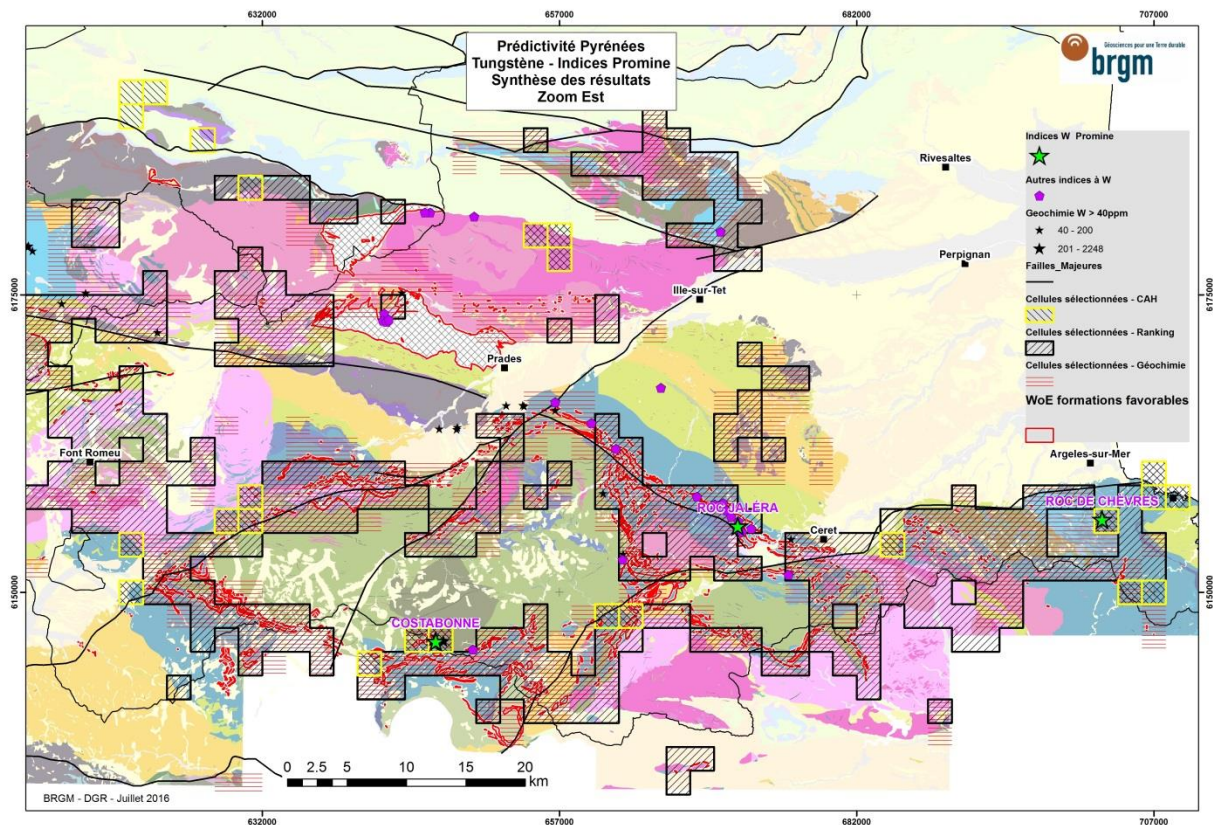


Figure 23 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées orientales.

La figure 23, centrée sur les Pyrénées-orientales, met en évidence les zones les plus favorables déterminées par différentes méthodes prédictives concernant le W. Plusieurs cibles potentielles en relation ou non avec des indices connus peuvent justifier de travaux exploratoires plus détaillés. En effet, outre le gisement potentiel de Costabonne, qui est une cible prioritaire pour le W dans les Pyrénées, 3 zones favorables d'intérêt prospectif se dégagent :

- une zone de favorabilité localisée en aval de Prats de Mollo est mise en évidence par les différentes méthodes prédictives. Cette zone qui semble présenter des similitudes géologiques avec le district de Costabonne se localise au niveau du contact nord entre la granodiorite de la Jonquera au contact des formations carbonatées de la série de Canaveilles ;
- toute la bordure est du Canigou, soulignée par de nombreux indices (e.g. Roc Jalera) et se prolongeant jusqu'à Céret, présente une zone favorable mise en valeur par le WoE, le « ranking » et la géochimie. Il s'agit de niveaux carbonatés contenus dans la série de Canaveilles et à proximité d'intrusion magmatique ;
- enfin, la partie supérieure du bassin versant de la Têt et plus particulièrement la terminaison orientale de la granodiorite de Mont Louis au contact des calcaires et marbres de la série de Canaveilles présente des conditions favorables pour le W.

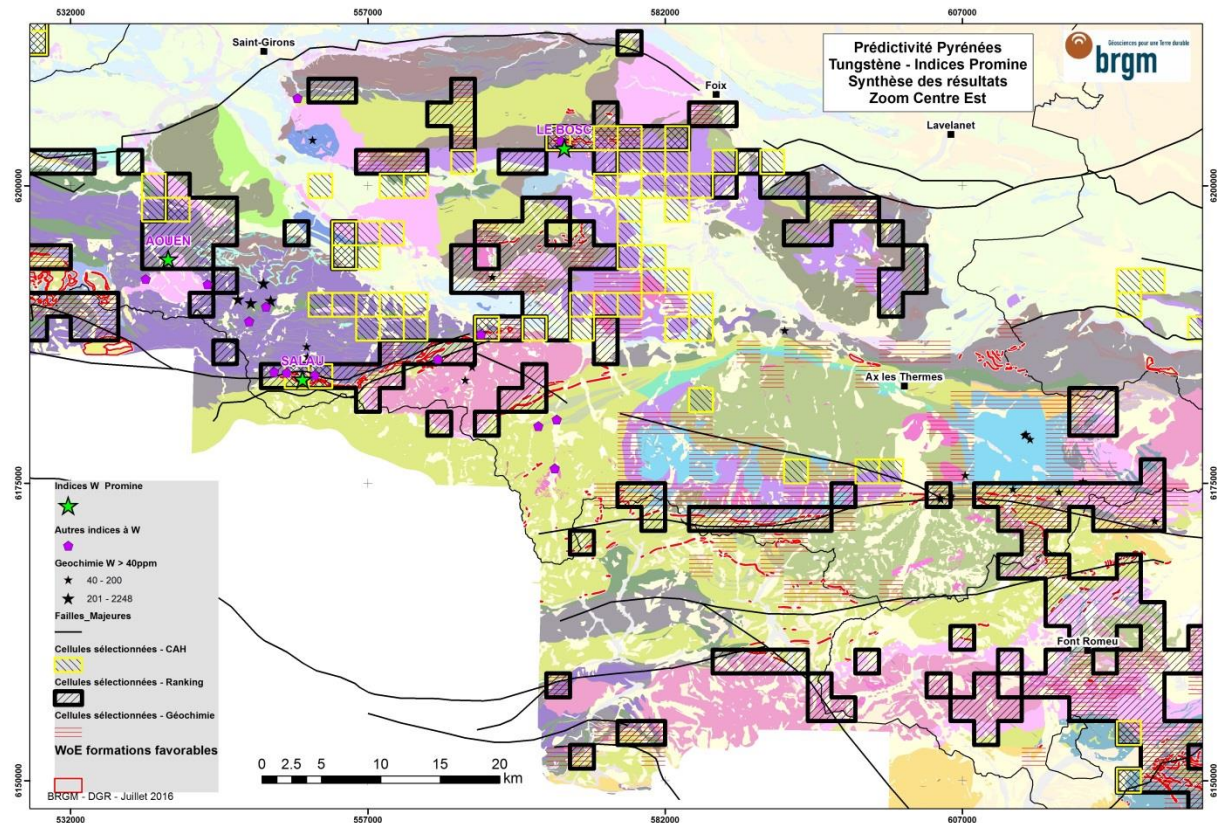


Figure 24 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées centre-est.

La zone des Pyrénées ariégeoises (Figure 24) présente un potentiel limité concernant le W. Seul le district de Salau ainsi que son prolongement sur la bordure nord du granite de Basiès présente une cible potentielle. En effet, cette zone favorable localisée dans les formations dévoniennes et cambriennes souligné par une structure varisque est mise en valeur par le WoE, le Ranking, la CAH et très localement par la géochimie de sédiments de ruisseau. Les autres zones contenant des cellules favorables, essentiellement issues du « Ranking », ne semblent pas regrouper suffisamment de paramètres pour en faire des cibles potentielles.

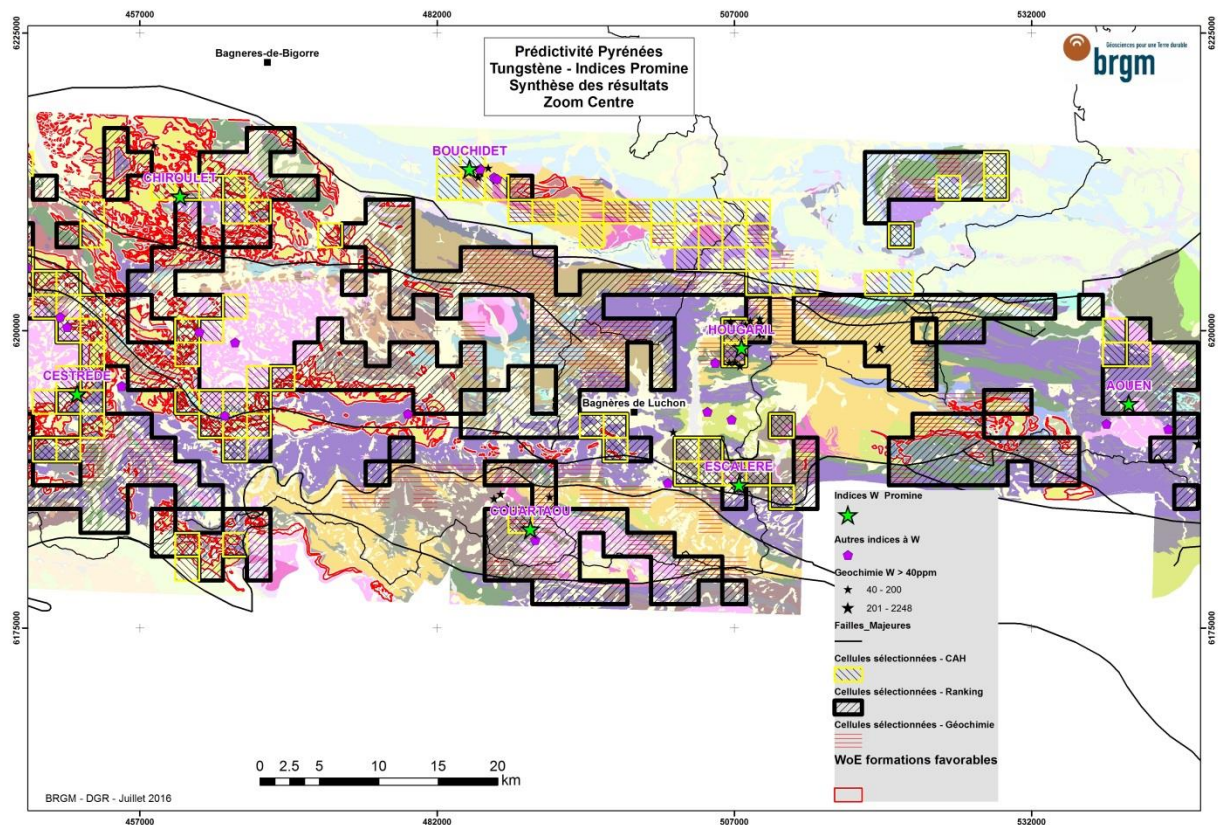


Figure 25 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées centrales.

La zone des Pyrénées du Comminges (Figure 25) comporte plusieurs indices de W issus de la base de données Promine relativement dispersés d'un point de vue géographique. Malgré des travaux d'exploration de détail menés sur l'indice d'Escalère, l'essentiel de ces minéralisations présente un potentiel anecdotique. Seule une zone mise en évidence par les analyses prédictives (WoE, CAH, Ranking) et qui ne comporte pas d'indices W connus peut présenter une cible potentielle. Il s'agit de la zone localisée autour du Cirque de Troumousse au sud de Piau-Engaly dans des formations dévoniennes à intercalations carbonatées sur la bordure ouest du granite de Bielsa dont le contexte géologique peut présenter des similitudes avec celui du district de Salau.

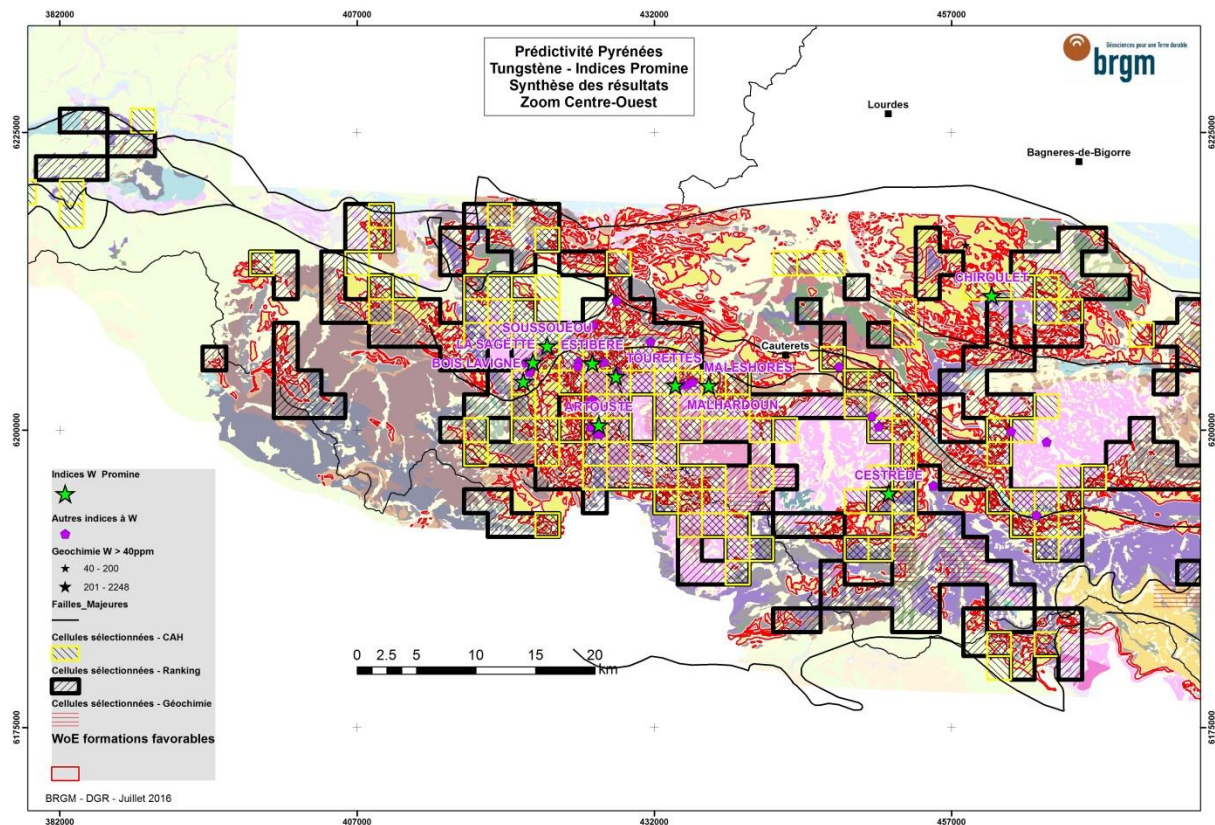


Figure 26 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées centre-ouest.

La zone des Pyrénées centrales (Figure 26) met en évidence de nombreuses zones favorables déterminées par les différentes méthodes prédictives concernant le W. L'essentiel de ces zones favorables comportent de nombreux indices de skarns à W essentiellement localisés dans les formations carbonatées dévoniennes et plus rarement carbonifères autour des granites de Cauterets et de Néouvielle. Cependant, incluse dans le Parc Naturel des Pyrénées, cette zone n'a pas fait l'objet de prospection géochimique et alluvionnaire lors de l'inventaire minier de la France et aucun des indices connus n'a fait l'objet d'une exploration détaillée.

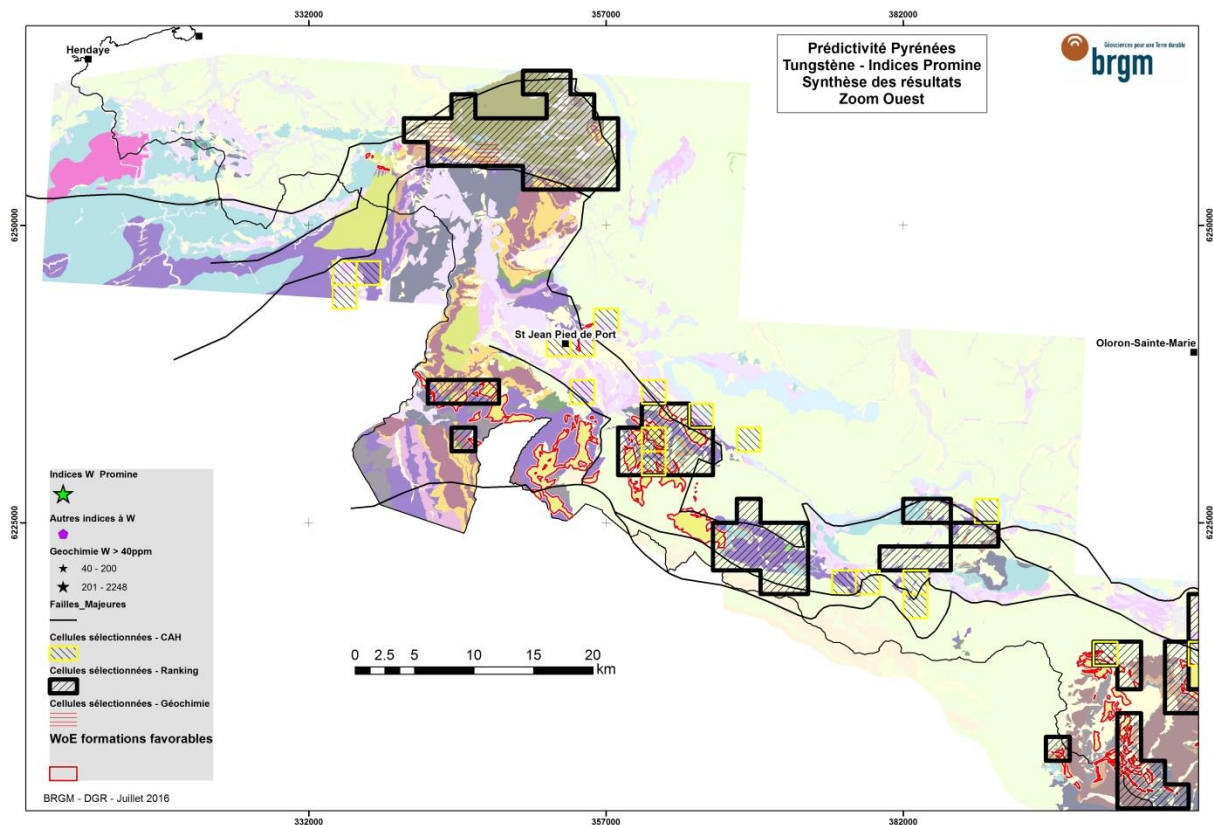


Figure 27 : Carte des résultats de la prédictivité W par les méthodes de Ranking, de CAH et de Géochimie à l'échelle des Pyrénées-atlantiques.

La figure 27, centrée sur les Pyrénées-atlantiques, met en évidence une surface représentée par les formations paléozoïques assez faible. Aucun indice W, issu de la base de données Promine, n'est connu dans cette région et les résultats de l'inventaire minier n'ont pas abouti à la découverte de nouvelle anomalie. Ainsi, malgré la présence de quelques cellules de favorabilité (CAH, Ranking et WoE) dans cette zone, le potentiel en W des Pyrénées atlantiques est très limité. En effet, si les roches encaissantes des minéralisations de W dans les Pyrénées (carbonates cambriens, ordoviciens et dévoniens) sont mises en évidence par le WoE, les formations intrusives à l'origine des minéralisations ne sont pas connues dans cette région.

8.2. CARTOGRAPHIE PRÉDICTIONNELLE POUR OR

Les indices d'or primaire ne sont pas assez nombreux pour pouvoir calculer un Weight of Evidence sur les Pyrénées. On a donc utilisé uniquement la démarche de type CBA.

8.2.1. CBA par CAH

On a utilisé les résultats de la CAH à 250 groupes pour sélectionner les cellules favorables à la présence d'or primaire à partir de 31 indices d'or. Les autres indices étant catalogués comme placers, ils n'ont pas été pris en compte car non directement reliés à la géologie environnante.

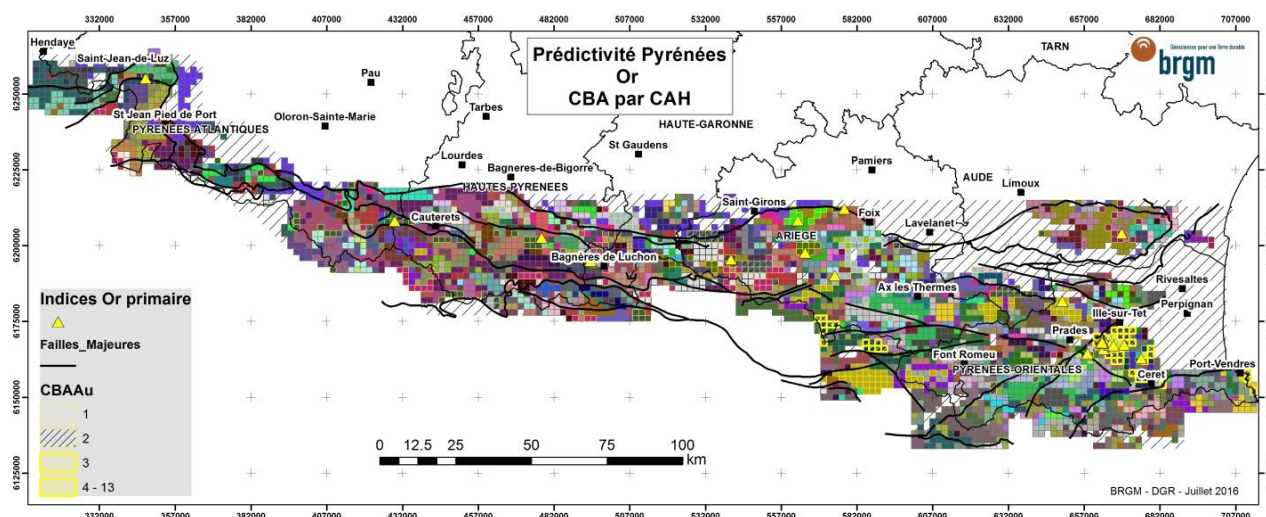


Figure 28 : CBA par CAH à 250 groupes. Sélection des cellules (surlignées en jaune) comptant au moins un indice primaire à or.

Les cellules de même groupe que celles contenant au moins un indice d'or sont au nombre de 404. Elles couvrent toute la chaîne pyrénéenne (Figure 28) avec une plus forte concentration dans sa partie orientale.

CAH250	Nombre de cellules	Nombre d'indices	Association majoritaire
98	30	13	QZITE2 SCSH2
100	15	3	GRES2 QZITES2 SCSH2
162	48	2	LYD5 CALC5 FLYSH6 SCSH5
209	10	2	MARB_BC MCASH_BC ORTG3 SCSH_BC GRAN6
53	59	1	SCSH5 CALC5 (GDIOR6)
61	77	1	MZGR6 (GRAN6)
74	57	1	MIGM6 (GRAN6)
109	17	1	GRWK3 SCSH4 SCSH2
141	5	1	GNEISS2 QZITE5 SCSH5 PERM QZITE3
149	14	1	GRES3 LYD6 SCSH4 FLYSH6 SCSH3
152	5	1	QZITE2 SCSH2 SCSH3 VOACI3 CALC5
160	39	1	CALC6 FLYSH6 CALC5 (GDIOR6)
167	10	1	CALC5 FLYSH6 GRES6 LYD6 (SCSH5)
189	4	1	CALC5 DOLE GRES5 VOACI6
194	14	1	GRES6 SCSH CALC5 CALC6 LYD5 SCSH5

Tableau 7 : Associations lithostratigraphique principales présentes dans les cellules issues de la CBA par CAH contenant au moins un indice primaire à or - lydiennes en bleu, roches volcanique ou volcano-sédimentaires en rose, calcaires en vert et intrusifs magmatiques en rouge.

Les associations présentes dans ces groupes sont plus diversifiées que celles définies pour le tungstène ce qui pourrait impliquer une plus grande variabilité métallogénique (tableau 7). On peut toutefois noter que sur les 15 groupes sélectionnés, 7 l'ont aussi été pour le tungstène (numéro de groupes en rouge, ces groupes ayant en commun la présence d'intrusifs magmatiques). La présence de formations volcaniques ou volcano-sédimentaires (en rose) ou des lydiennes (en bleu) pourrait être symptomatique des environnements les plus favorables. À noter aussi la présence relativement plus importante des formations détritiques (grès et quartzites) en association avec ces cellules favorables.

8.2.2. CBA par fréquences sur les indices

Les résultats de la CBA par cumul de fréquence montrent plusieurs zones à fortes valeurs de score se répartissant le long de la chaîne dans la province des Aspres, de Conflent, du Comminges, de la Vallée d'Aure et avec quelques cellules, dans la Soule et le Labourd. Le massif des Corbières ressort aussi comme favorable, surtout dans sa partie est (Figure 29).

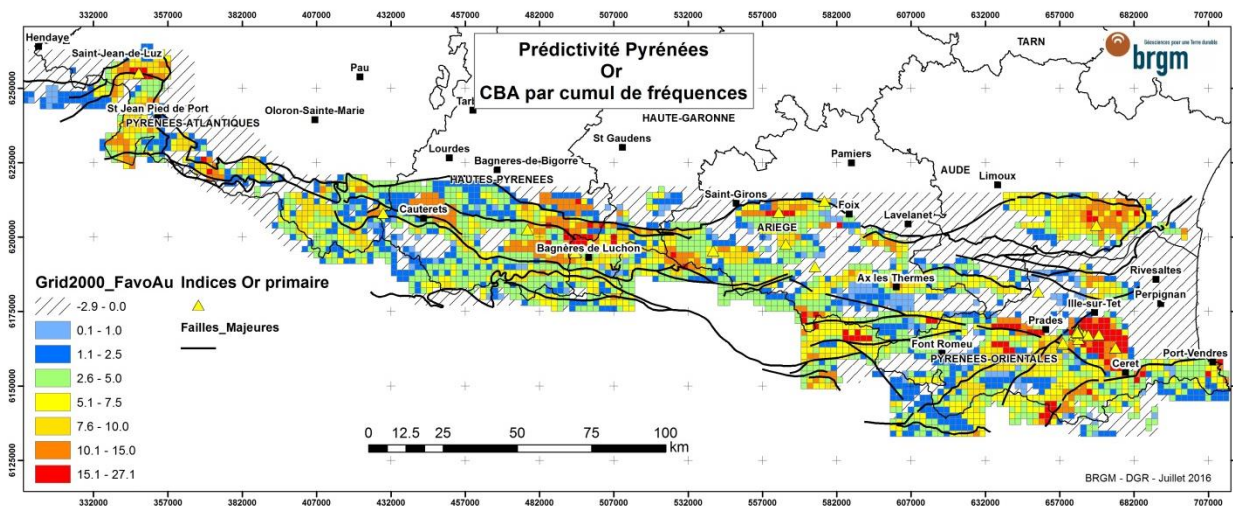


Figure 29 : Carte des résultats de la prédictivité Au par la méthode de la CBA par somme des fréquences à l'échelle des Pyrénées.

Fréquence pour les cellules avec au moins un indice d'or																		
QZITE2	SCSH	QZITE5	DOLE	GNEISS2	GRWK3	MCSH_BC	SCSH2	LYD6	VOACI3	GRES6	LYD5	GRES2	QZITE3	MARB_BC	SCSH3	CALC6	VOACI6	
0.33	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	0.48	0.10	0.05	0.10	0.14	0.10	0.05	0.10	0.29	0.19	0.05	
Fréquence des formations pour la population totale																		
0.033	0.005	0.008	0.009	0.009	0.010	0.023	0.141	0.029	0.014	0.029	0.050	0.037	0.020	0.040	0.132	0.091	0.025	
Rapports de fréquence																		
10.18	9.08	5.82	5.40	5.16	4.83	4.13	3.38	3.29	3.29	3.24	2.86	2.55	2.44	2.38	2.16	2.09	1.91	
Fréquence pour les cellules avec au moins un indice d'or																		
SCSH_BC	FLYSH6	SCSH5	GRES3	CALC5	SCSH4	GNEISS_BC	ORTG3	PEGM	MCSH2	DIOR6	MIGM6	GDIOR6	GRAN6	MZGR6	FQTZ	GRES5	TRIAS	
0.14	0.19	0.29	0.05	0.38	0.19	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	
Fréquence des formations pour la population totale																		
0.077	0.110	0.167	0.030	0.270	0.146	0.038	0.079	0.044	0.046	0.047	0.049	0.132	0.148	0.083	0.084	0.124	0.173	
Rapports de fréquence																		
1.85	1.73	1.71	1.58	1.41	1.31	1.27	1.20	1.09	1.03	1.00	0.98	0.72	0.64	0.57	0.57	0.39	0.28	

Tableau 8 : Rapport des fréquences des formations entre les cellules contenant au moins un indice primaire à or et la population générale.

Les formations avec les plus forts scores sont souvent à composante détritique (schistes et grès ou quartzites), issue de précipitations siliceuses (lydiennes) ou volcaniques (Tableau 8). Par contre, les intrusifs présentent des scores faibles. Les carbonates sont faiblement représentés.

8.2.3. CBA par fréquences sur la géochimie

Comme on l'a fait pour le tungstène, on a utilisé les échantillons de l'inventaire analysés pour or (Au > 25 ppb) soit 960 échantillons pour élaborer une CBA par fréquence. La répartition des échantillons est très inhomogène avec une forte densité dans les parties est et centre et une absence dans la partie ouest, sachant que les analyses pour or n'ont pas été réalisées pour tous les échantillons prélevés dans la chaîne (Figure 30).

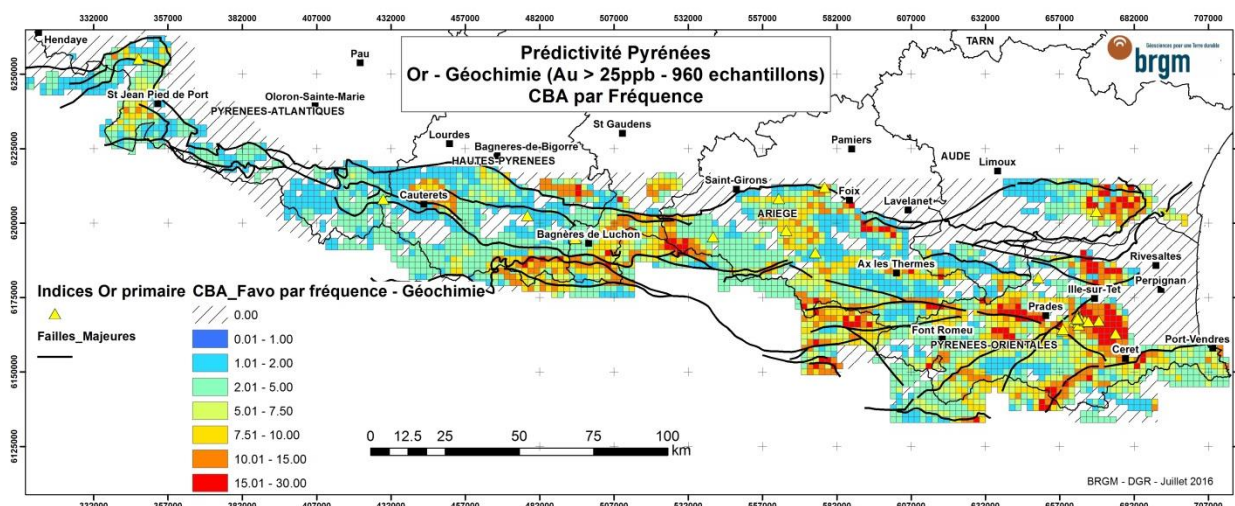


Figure 30 : Carte des résultats de la prédictivité Au par la méthode de la CBA par somme des fréquences pour les échantillons de géochimie à plus de 25 ppb d'or à l'échelle des Pyrénées.

Pour les calculs de fréquence, on n'a pris qu'une seule cellule avec au moins un échantillon avec Au > 25 ppb pour faire les calculs (soit 219 cellules).

Les résultats obtenus (Figure 30) sont très similaires à ceux obtenus à partir des indices avec, toutefois, des valeurs plus faibles en allant vers l'ouest (zone non analysée).

Fréquence pour cellules avec au moins un échantillon avec Au>25ppb																				
QZITE2	VOACI3	CALC4	MARB2	KORN6	VSED_BC	MCSH2	SCSH2	MARB5	SCSH3	GRWK3	MCSH6	MCSH_BC	CALC2	GRES3	VOACI6	SCSH4	CALC3	SCSH_BC	CGT3	FQTZ
0.23	0.09	0.05	0.01	0.06	0.04	0.16	0.49	0.01	0.43	0.03	0.02	0.07	0.13	0.08	0.06	0.37	0.05	0.18	0.03	0.16
Fréquence pour l'ensemble des cellules																				
0.033	0.014	0.010	0.003	0.014	0.011	0.046	0.141	0.003	0.132	0.010	0.007	0.023	0.048	0.030	0.025	0.146	0.021	0.077	0.013	0.084
Rapports de fréquence																				
7.11	5.99	4.44	4.35	4.29	3.77	3.56	3.46	3.35	3.24	3.24	3.20	3.16	2.73	2.57	2.56	2.50	2.44	2.37	2.14	1.95
Fréquence pour cellules avec au moins un échantillon avec Au>25ppb																				
MARB_BC	GRES4	SCSH	GRES2	SCSH5	ORTG3	DIOR6	PEGM	MIGM6	GNEISS3	QZITE_BC	CALC5	GNEISS2	AMPH3	CGT6	MARB6	GDIOR6	GNEISS_BC	AMPH6	GRES6	GRAN6
0.07	0.00	0.01	0.06	0.21	0.10	0.05	0.05	0.05	0.04	0.01	0.28	0.01	0.01	0.01	0.01	0.11	0.03	0.00	0.02	0.11
Fréquence pour l'ensemble des cellules																				
0.040	0.003	0.005	0.037	0.167	0.079	0.047	0.044	0.049	0.037	0.008	0.270	0.009	0.010	0.010	0.010	0.132	0.038	0.006	0.029	0.148
Rapports de fréquence																				
1.82	1.81	1.74	1.71	1.28	1.21	1.16	1.15	1.13	1.10	1.09	1.05	0.99	0.95	0.89	0.87	0.86	0.85	0.81	0.78	0.77

Tableau 9 : Rapports de fréquence entre les cellules contenant au moins un échantillon avec Au > 25 ppb et la population générale.

Dans le tableau 9, on remarque l'absence des lydiennes et la présence plus importante des formations d'origine volcanique acide (VOACI) ou volcano-sédimentaires (VSED ou GRWK).

8.2.4. Synthèse - Zones prospectives

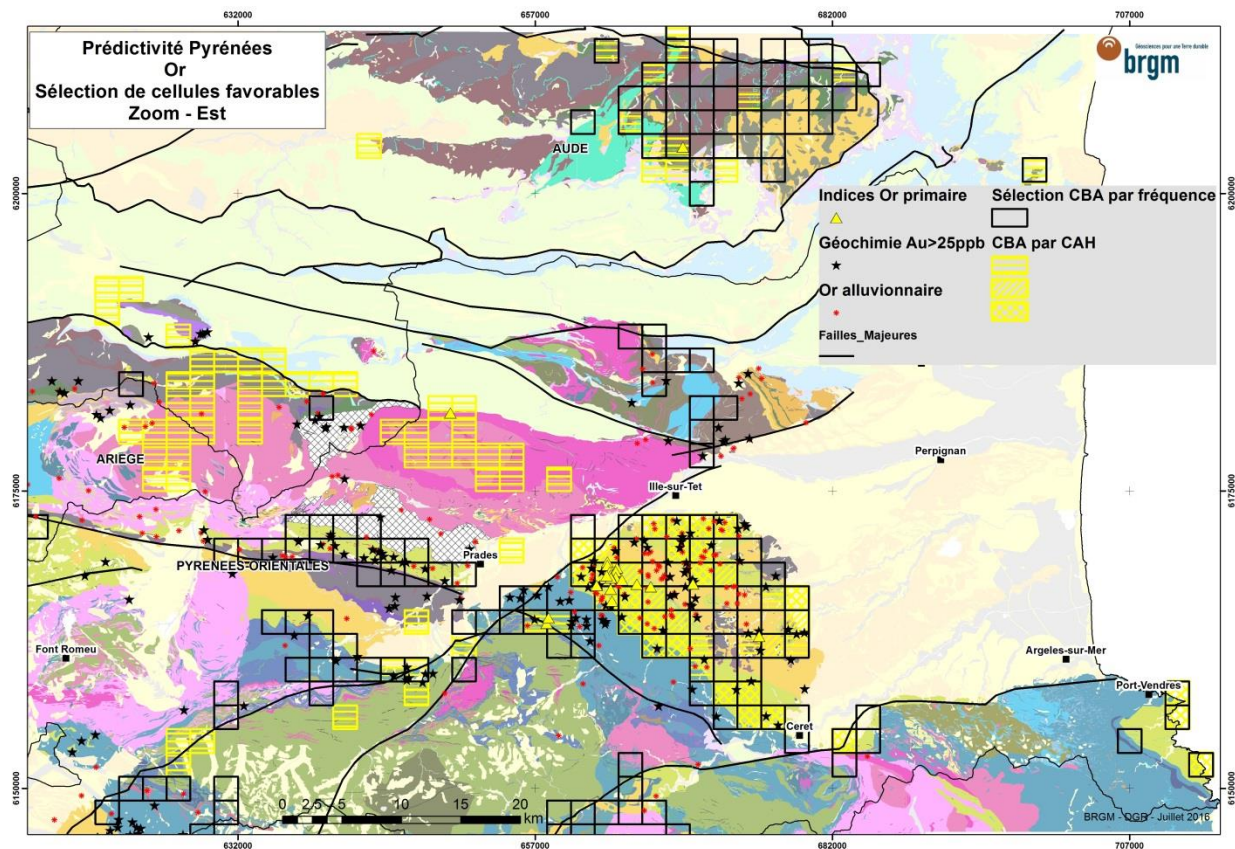


Figure 31 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or – Pyrénées-orientales.

La figure 31, centrée sur les Pyrénées-orientales, met en évidence les zones les plus favorables déterminées par différentes méthodes prédictives concernant l'or. Deux districts apparaissent comme étant des zones favorables pour l'or. Il s'agit du district des Aspres, localisé entre Céret et l'Ille-sur-Têt, et du district de la faille de Mérens dans le prolongement ouest des Aspres.

- le district des Aspres, particulièrement riche en indices d'or, est mis en valeur par de nombreux points de géochimie stream $Au > 25$ ppb et de nombreuses occurrences d'or alluvionnaire. Historiquement, plusieurs indices minéralisés dans ce domaine ont fait l'objet d'exploration détaillée (e.g. Puig de Maurous, Serrabonne, la Chapelle St Pons) et d'exploitation (mine de Glorianes, 350 kg produits). Les minéralisations aurifères des Aspres sont encaissées dans les formations infracambriennes et cambriennes sous forme de champs filoniens et lentilles de quartz. De plus tout le district est mis en valeur par la superposition des cellules « CBA par fréquence » et « CBA par CAH » ;
- le district de la faille de Mérens est localisé à l'ouest de Prades le long du grand accident régional tardi-hercynien de Mérens dans des grès grossiers et conglomérats cambriens de la formation d'Évol. Cette zone ne contient pas d'indice connu mais est largement mise en valeur par de fortes teneurs en géochimie stream et alluvionnaire ainsi que par les cellules « CBA par fréquences ».

Les cellules de « CBA par CAH » localisées sur les granites de Quérigut et de Millas sont probablement à relier à l'indice de Montagut, au nord du granite de Millas, décrit comme un skarn à W et Au. Cette zone ne présente pas de cible potentielle bien définie.

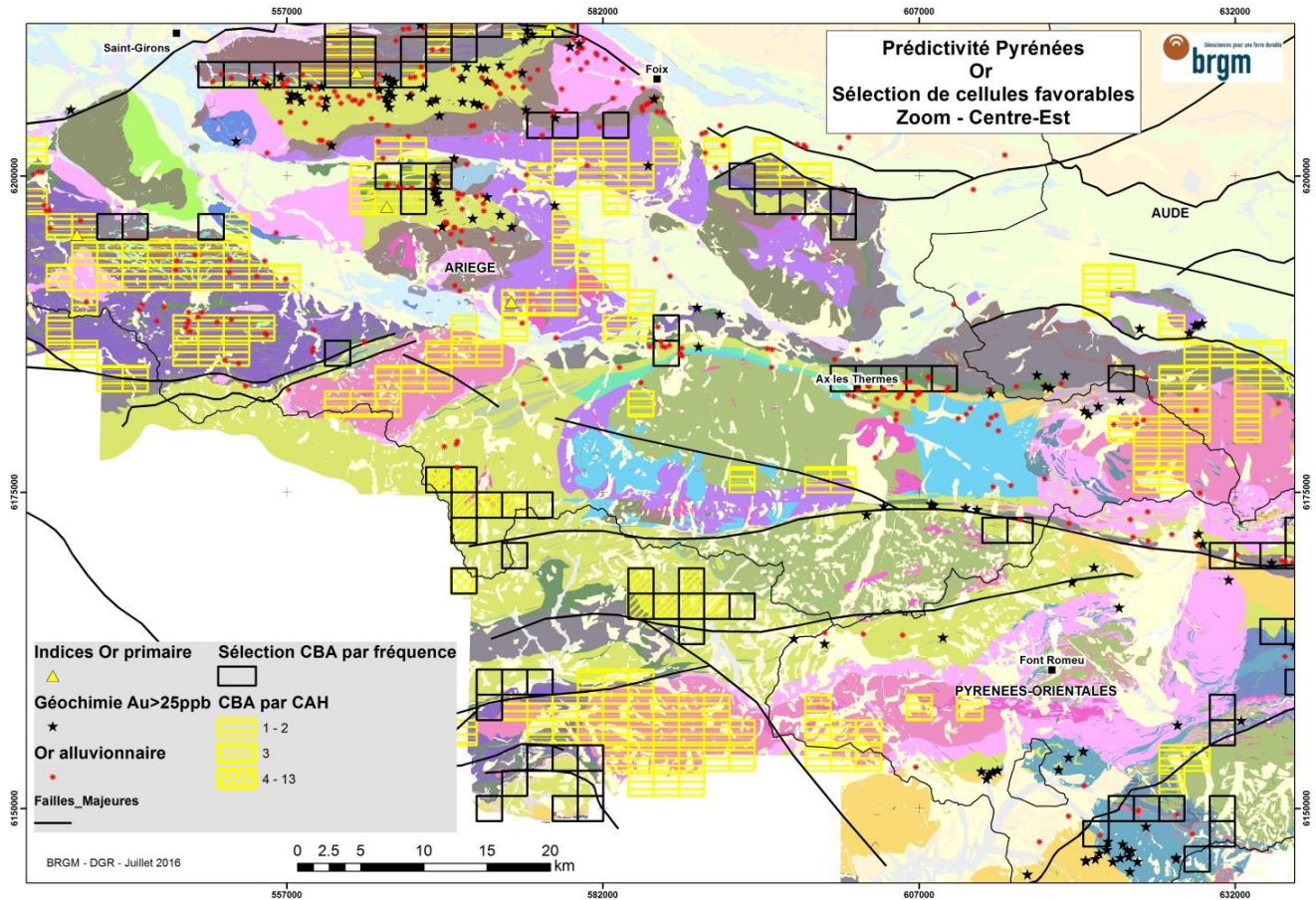


Figure 32 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or - Pyrénées centre-est.

La zone des Pyrénées centre-est (Figure 32) contient peu d'indices d'or primaire mais certaines zones marquées par une superposition de cellules favorables et de points de géochimie stream et alluvionnaires peuvent présenter des cibles potentielles. En effet, les massifs nord pyrénéens (e.g Arize et 3 Seigneurs) présentent une superposition de cellules favorables ainsi qu'une forte densité de points anomaux issus de l'inventaire minier. Cependant aucuns travaux d'exploration de détail n'ont été réalisés dans ce secteur. Enfin le district d'Ax-les-Thermes, localisé le long de la faille Nord-Pyrénéenne en bordure nord du dôme de l'Aston, est marqué par l'alignement de cellules favorables « CBA par fréquences » et de nombreux indices alluvionnaires.

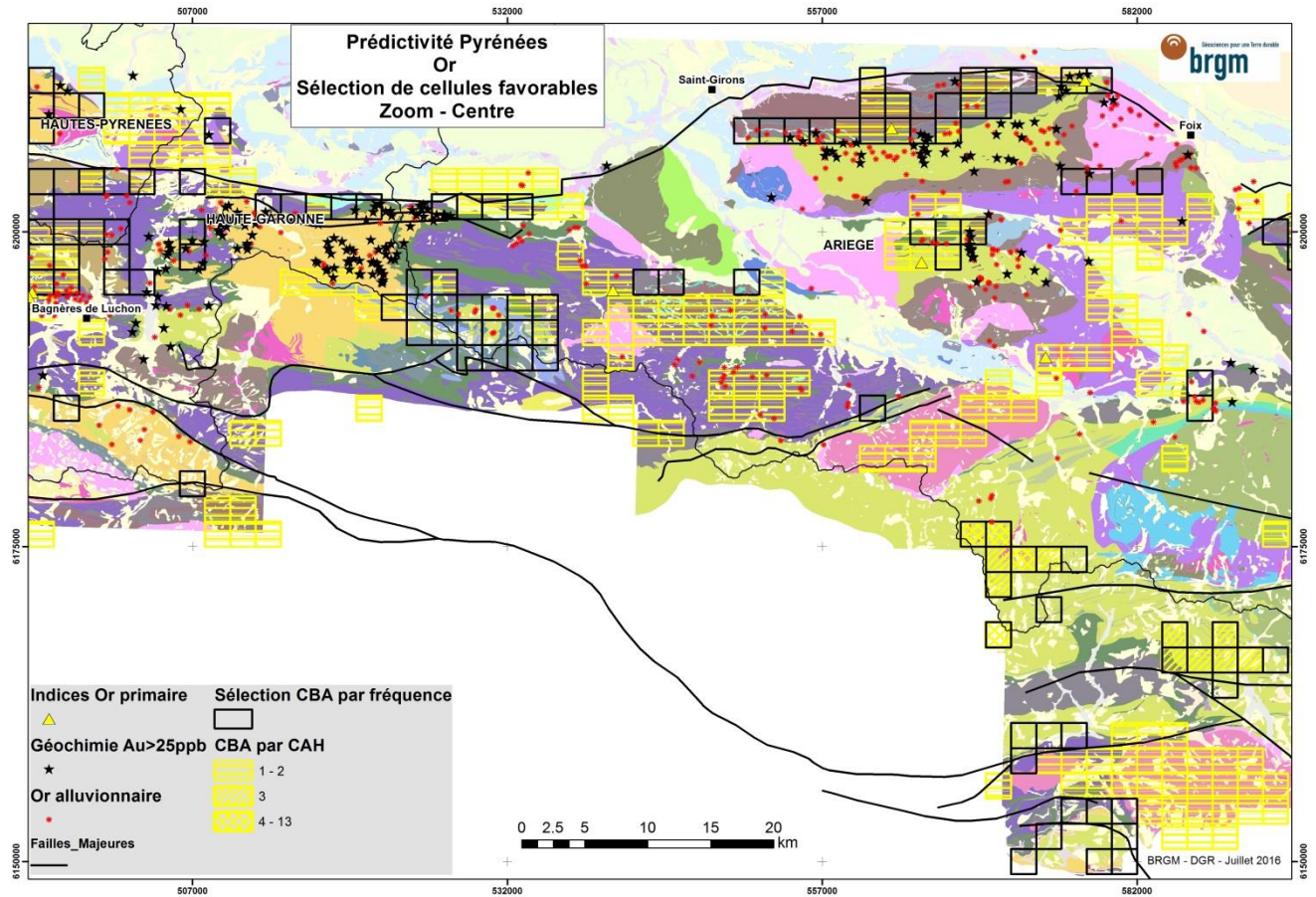


Figure 33 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or – Pyrénées-centrales.

La zone des Pyrénées centrales (Figure 33) montre une forte densité de cellules favorables localisées dans les formations carbonatées du Dévonien probablement influencé par la position de l'indice aurifère du Col-de-Lazie décrit comme étant un skarn à W et or associé. Cet indice n'a pas fait l'objet d'investigation complémentaire permettant de valider son potentiel. Enfin, une anomalie or déterminée en géochimie stream et localisée au sud de la Haute-Garonne (Hougaril) dans les formations cambro-ordoviciennes n'est pas confirmée par la présence de cellule favorable. Il peut s'agir ici d'une anomalie liée à la présence de schistes noirs du Silurien et de petites intrusions magmatiques qui pourrait nécessiter des investigations plus détaillées.

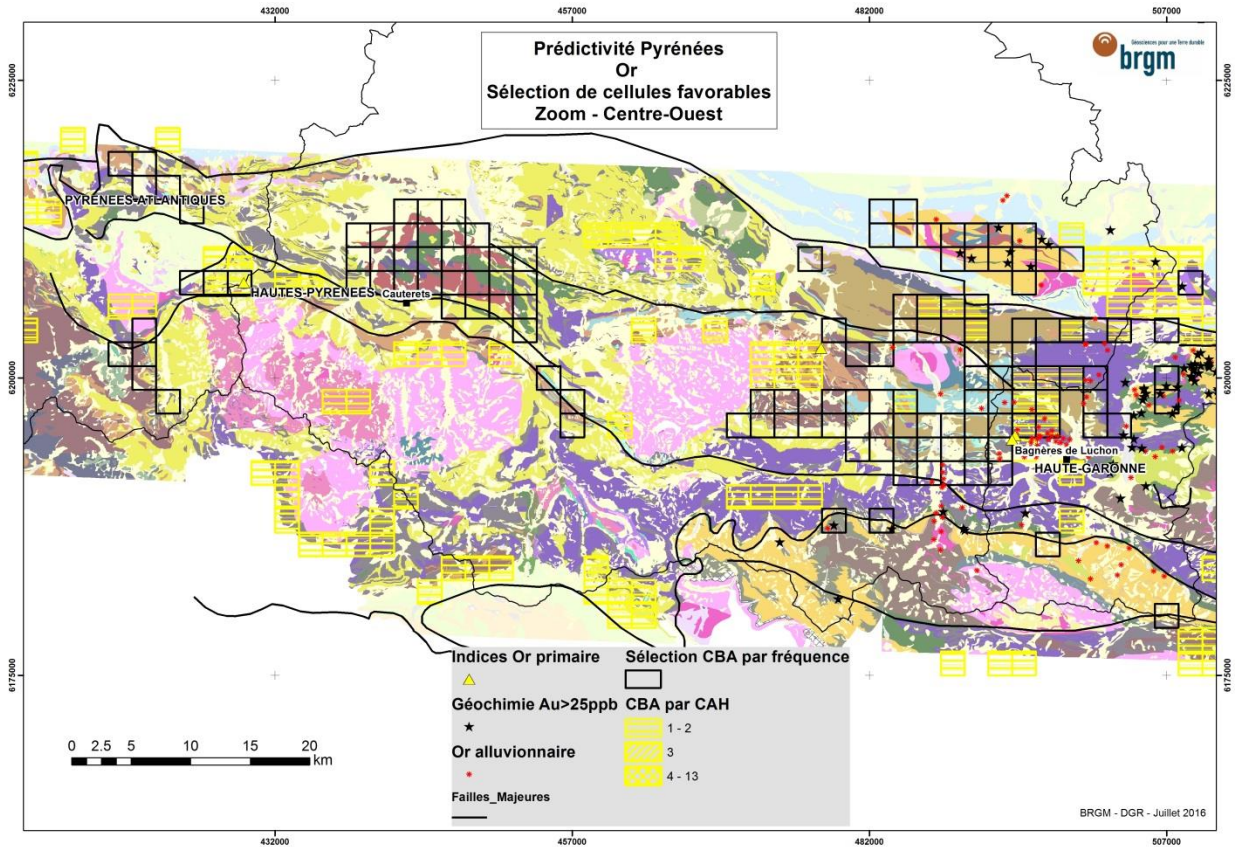


Figure 34 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or - Pyrénées centre-ouest.

Les Pyrénées centre-ouest (Figure 34) présentent deux zones favorables principales concernant l'or. La première concerne les formations détritiques marines dévoniennes et carbonifères à l'est du massif granitique calco-alkalin de Néouvielle et est mise en valeur par les cellules « CBA par fréquence » et « CBA par CAH ». La seconde englobe les formations détritiques cambriennes et les schistes noirs du Silurien au nord du granite de Cauterets et est valorisée principalement par la « CBA par fréquences ». D'autres zones représentées par quelques cellules semblent anecdotiques à l'exception de la partie sud du massif de Cauterets qui contient un indice de skarn aurifère connu dans les carbonates du Dévonien. Ce secteur qui fait partie du Parc National des Pyrénées n'a pas été échantillonné lors de l'inventaire minier.

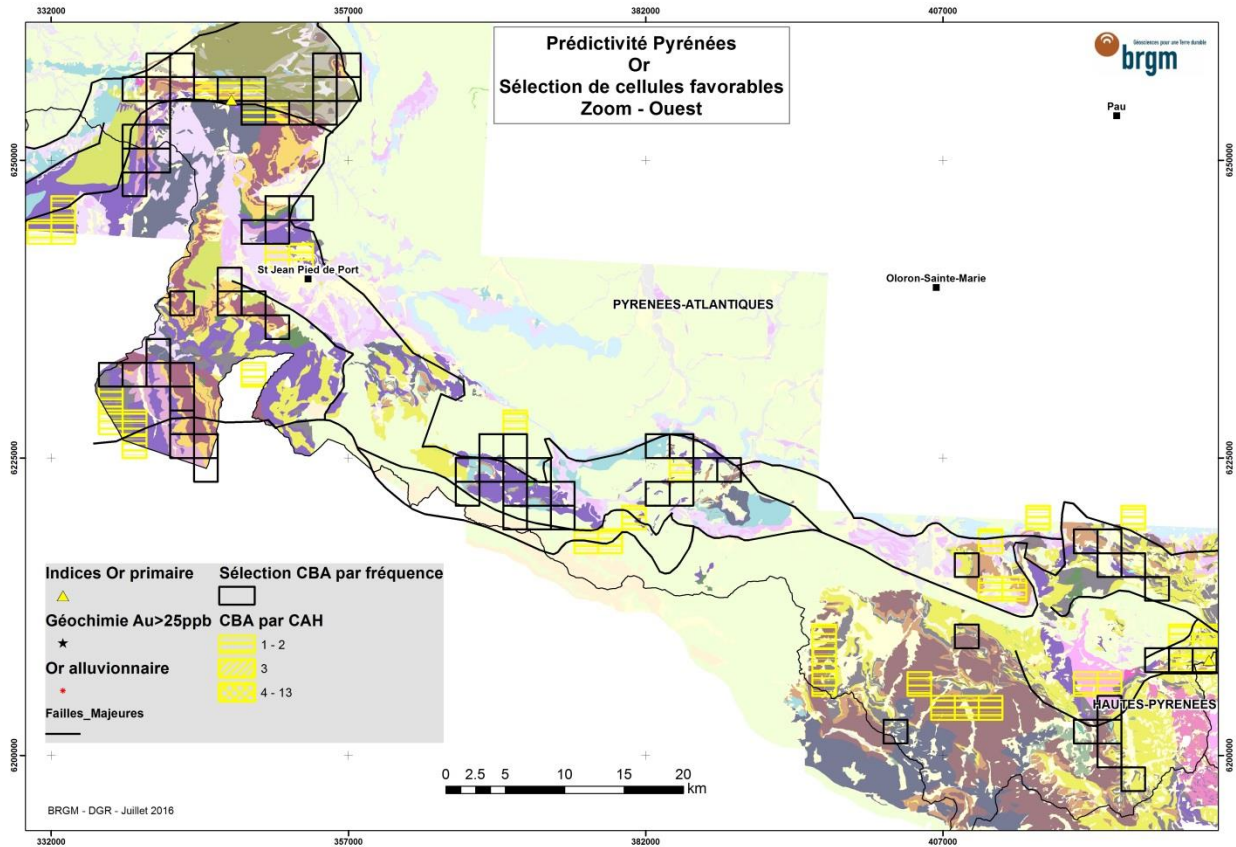


Figure 35 : Cellules issues de la CBA favorables à la prospection d'or – Pyrénées-atlantiques.

La figure 35, centrée sur les Pyrénées-atlantiques contient un seul indice d'or primaire dans le massif du Labourd et aucun indice issu des données géochimiques et alluvionnaire de l'inventaire minier. Les cellules favorables issues de la méthode « CBA par fréquences » sont essentiellement localisées sur les formations de quartzites et calcaires coralliaires du Dévonien inférieur et autour des schistes protérozoïques du massif du Labourd. Des investigations de terrain seraient nécessaires sur cette zone car les nombreuses occurrences connues dans les cours d'eau de la région (sur lesquels un permis d'exploration a été déposé par la société SUDMINE) ne sont pas expliquées par la présence de minéralisations primaires source.

8.3. CARTOGRAPHIE PRÉDICTIONNELLE POUR GERMANIUM (PB-ZN)

La province pyrénéenne est connue pour contenir des indices accompagnés de Germanium, porté parfois par des minéraux uniques (carboirite). Toutefois, ces manifestations sont anecdotiques et le germanium est économiquement un sous-produit de la métallurgie du zinc avec Ge inclus dans les cristaux de sphalérite (sulfure de Zn). 12 indices sont répertoriés comme contenant du germanium, dans la partie centrale, ce qui n'est probablement pas exhaustif, sachant que 581 indices à Zn sont connus sur la zone (Figure 36).

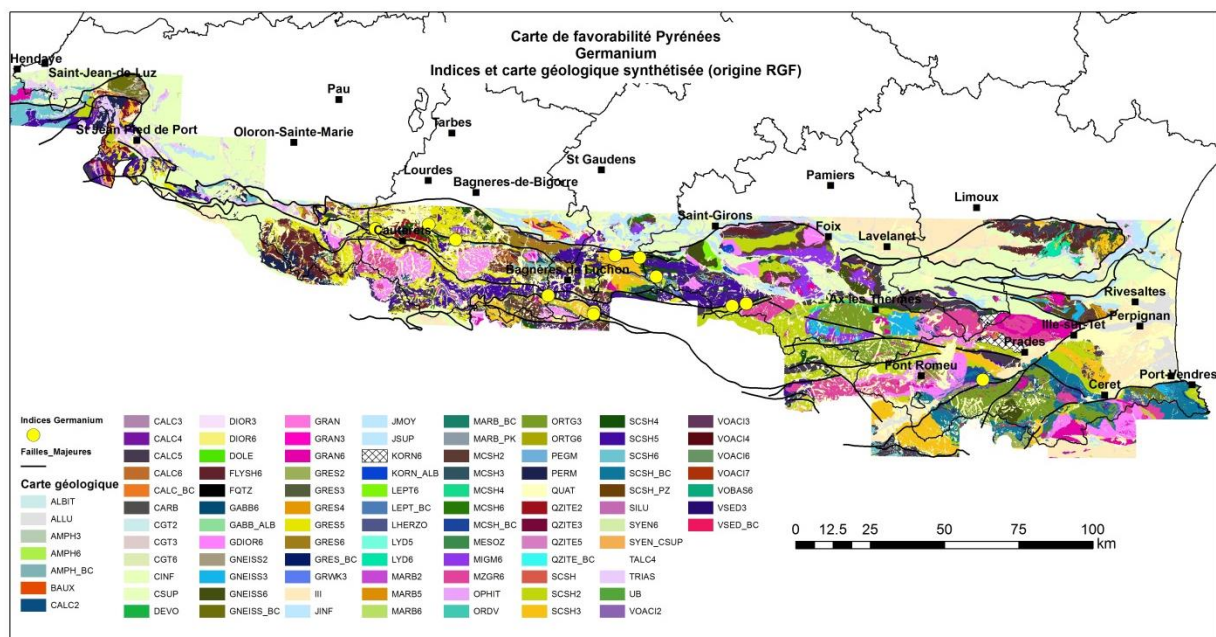


Figure 36 : Carte géologique synthétisée et indices à germanium (ronds jaune).

8.3.1. CBA par CAH

La superposition des indices à Ge avec les cellules classées par CAH permet de sélectionner les groupes présentant un environnement favorable à la présence de minéralisations à Ge (Figure 37).

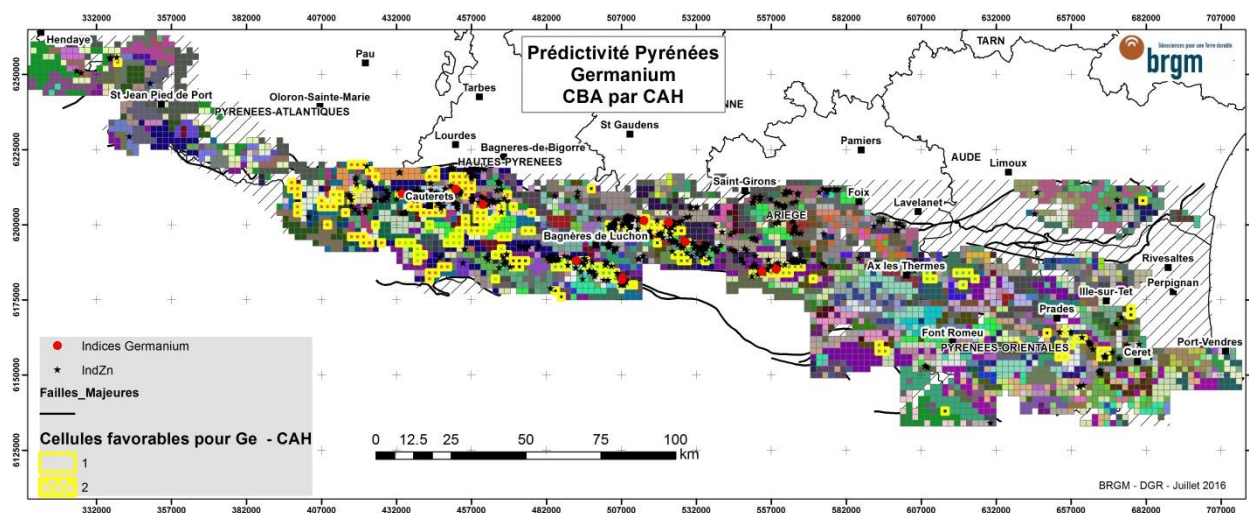


Figure 37 : CBA par CAH à 250 groupes. Sélection des cellules (surlignées en jaune) contenant au moins un indice à germanium.

CAH250	Nb cellules	Nb_indices Ge	Associaton lithologique
14	4	2	CALC3 CALC4 SCSH3 SCSH4 CALC5
50	27	1	SCSH3 SCSH4 SCSH5 CALC5
56	28	1	GDIOR6 GRES5 CALC5 SCSH5
95	13	1	GRES2 MZGR6 CALC2 SCSH2 GRES5
105	25	1	CALC3 SCSH3 SCSH4 CALC5
126	6	1	GRWK3 MCSH3 SCSH4 SCSH5 CALC3
137	7	1	CGT2 SCSH3 VOACI6 SCSH4
147	1	1	CALC5 GRES5
159	53	1	CALC6 GRES5 CALC5 FLYSH6
186	18	1	CALC5 VOBAS6 GRES5 CALC6 LYD5
231	14	1	MCSH_BC QZITE_BC GNEISS_BC ORTG3 GRAN6 SCSH_BC

Tableau 10 : Associations lithostratigraphique principales présentes dans les cellules issues de la CBA par CAH contenant au moins un indice à germanium - lydiennes et roches volcano-sédimentaires en vert, roches volcaniques en rose et intrusifs magmatiques en rouge.

191 cellules sont sélectionnées par cette méthode. Sur les 11 groupes, 2 sont en commun avec W (56 et 95) et aucun ne correspond à des cellules favorables pour Au (Tableau 10). Comme pour W, la présence de calcaires est prépondérante dans ces groupes mais, à la différence des groupes à W, les intrusifs magmatiques associés sont assez rares alors que 3 groupes sont associés à des manifestations volcaniques ou volcano-sédimentaires. Si ces groupes sont très concentrés sur la partie centrale du massif, ils sont aussi présents dans la partie orientale.

8.3.2. CBA par fréquences sur les indices

Les résultats de la CBA par cumul de fréquences montrent plusieurs zones à fortes valeurs de score surtout développées dans la partie centrale du massif ; on les retrouve aussi en petits groupes dans la partie orientale et atlantique, avec des valeurs de score un peu plus faibles (Figure 38).

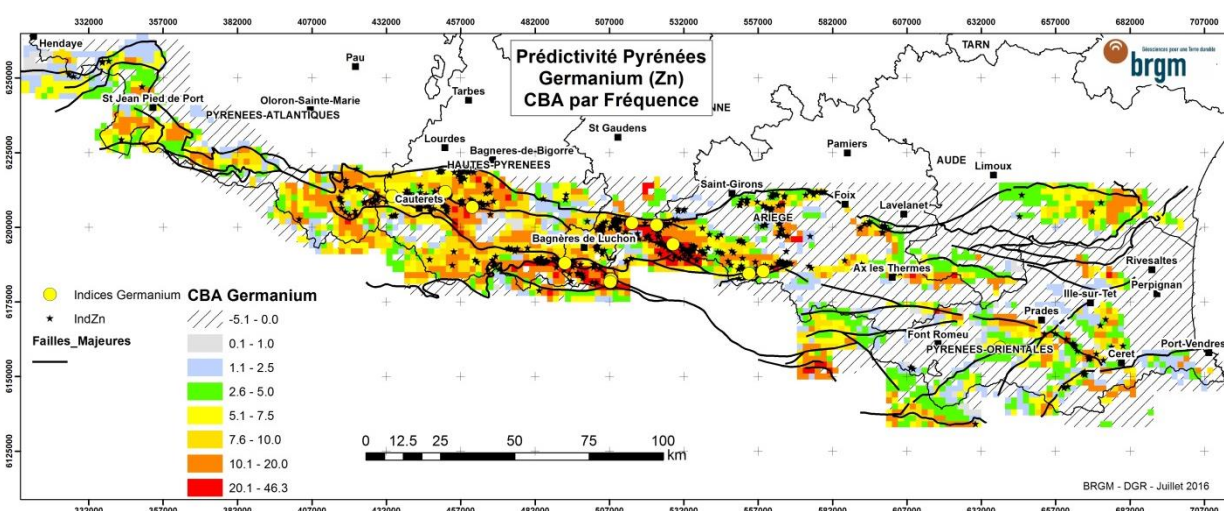


Figure 38 : Carte des résultats de la prédictivité Ge par la méthode de la CBA par somme des fréquences à l'échelle des Pyrénées.

464 cellules présentent des scores supérieurs à 12 ; elles confirment l'intérêt de la zone centrale. 218 indices à Zn sur 581 sont superposés à des cellules dont le score est supérieur à 12.

Fréquence des formations dans les cellules avec indice à Ge													
CGT2	MCSH3	QZITE_BC	GRWK3	CALC3	CALC4	VOBAS6	SCSH4	MCSH_BC	CALC2	GRES5	VOACI6	SCSH5	SCSH3
0.09	0.09	0.09	0.09	0.18	0.09	0.09	0.64	0.09	0.18	0.45	0.09	0.55	0.36
Fréquence des formations pour toutes les cellules													
0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.15	0.02	0.05	0.12	0.02	0.17	0.13
Rapport de fréquences													
18.05	11.71	10.83	9.22	8.84	8.84	7.88	4.36	3.94	3.75	3.68	3.64	3.27	2.75
Fréquence des formations dans les cellules avec indice à Ge													
CALC5	GRES2	GNEISS_BC	MARB_BC	CALC6	LYD5	SCSH6	GDIOR6	SCSH2	GRAN6	SCSH_BC	ORTG3	FQTZ	TRIAS
0.73	0.09	0.09	0.09	0.18	0.09	0.09	0.18	0.18	0.18	0.09	0.09	0.09	0.09
Fréquence des formations pour toutes les cellules													
0.27	0.04	0.04	0.04	0.09	0.05	0.05	0.13	0.14	0.15	0.08	0.08	0.08	0.17
Rapport de fréquences													
2.69	2.43	2.42	2.27	1.99	1.82	1.75	1.37	1.29	1.23	1.18	1.15	1.08	0.53

Tableau 11 : Rapport des fréquences des formations entre les cellules contenant au moins un indice à Ge et la population générale.

Le tableau 11 montre bien la faible implication des roches intrusives et la prépondérance des formations carbonatées, quel que soit leur âge. Les formations détritiques sont quasiment absentes des formations représentées, à l'inverse de l'or. L'impression générale confirmerait donc une prépondérance des gisements de type « sédimentaires exhalatifs » (SEDEX) connus par ailleurs pour pouvoir contenir du germanium.

8.3.3. Synthèse des zones favorables pour Ge(Zinc - plomb)

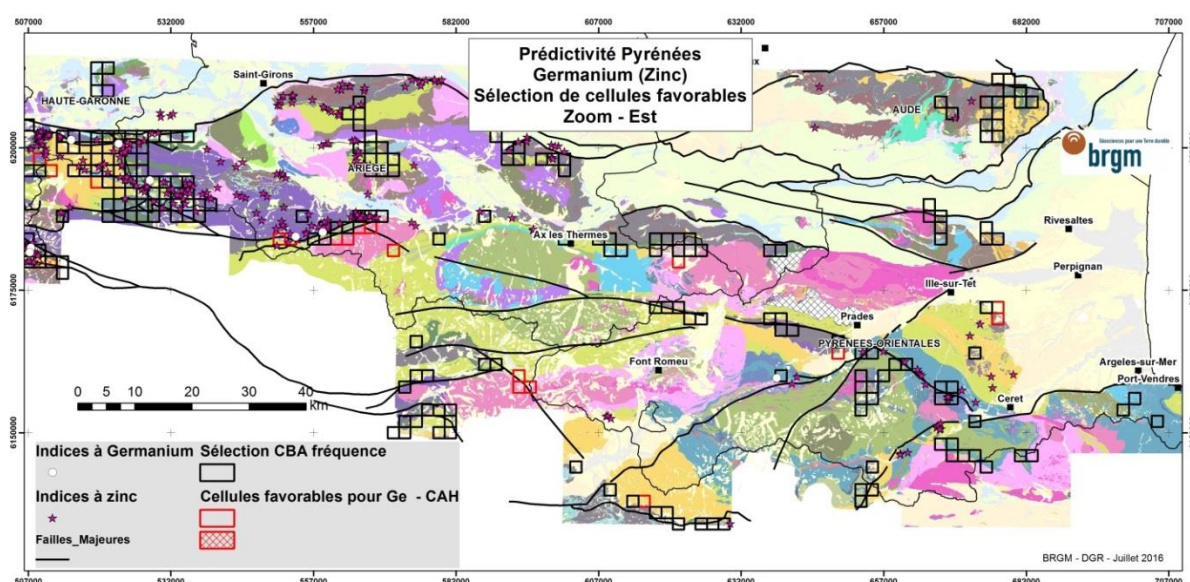


Figure 39 : Carte des résultats de la prédictivité Ge par les méthodes de la CBA à l'échelle des Pyrénées orientales et centrales.

La figure 39, centrée sur les Pyrénées orientales et la partie ariégeoise des Pyrénées centrales, met en évidence le faible potentiel de minéralisation à zinc dans les Pyrénées orientales et, à l'inverse, un potentiel plus important dans les Pyrénées centrales. Les périodes fertiles concernant la mise en place des minéralisations de zinc - plomb dans les Pyrénées sont l'Ordovicien supérieur et le Dévonien, il s'agit généralement de formations carbonatées qui ne sont pas représentées dans les Pyrénées orientales. En effet, le district zinc (germanium) des Pyrénées orientales est représenté par un seul indice de Ge décrit dans les formations protérozoïques de Canaveilles et quelques indices de zinc répertoriés dans les formations cambriennes essentiellement lié à des phénomènes de remobilisation plus tardifs.

En revanche, la partie ariégeoise et sud Comminges des Pyrénées centrales est particulièrement riche en indices de zinc et quelques indices de Ge connus (7 indices sur les 12 répertoriés) essentiellement encaissés dans les formations carbonatées de l'Ordovicien supérieur et du Dévonien. Il s'agit pour la plupart de mines anciennement exploitées (Argut, Bentaillou, Carboire, Pal de Rase). Les cellules favorables pour germanium dans ce district, suivant les méthodes « CAH » et « CBA par fréquences » mettent en valeur les formations cambro-ordoviciennes du dôme métamorphique de Bossost et les formations dévoniennes au nord du granite de Basiès. De plus, ces zones sont riches en indices de zinc.

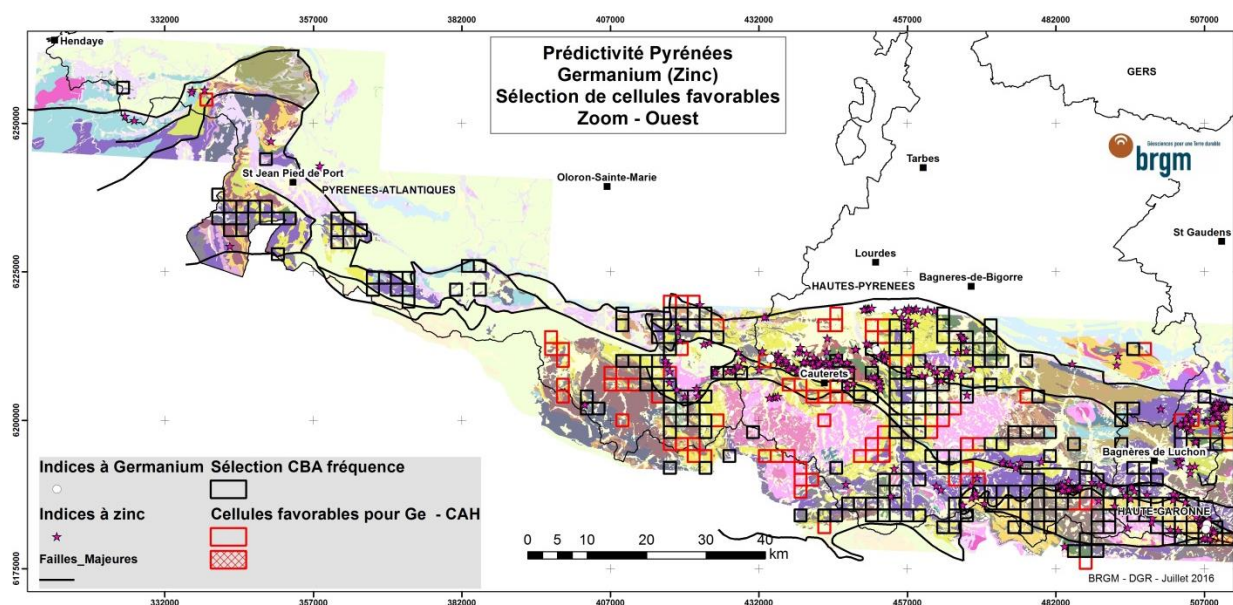


Figure 40 : Carte des résultats de la prédictivité Ge par les méthodes de la CBA à l'échelle des Pyrénées centrales et atlantiques.

La zone des Pyrénées centrale ouest (Figure 40) est très riche en indices de zinc majoritairement encaissés dans les formations carbonatées de l'Ordovicien supérieur et du Dévonien supérieur. 5 indices minéralisés à germanium (zinc) sont répertoriés dans cette zone (Pen Pouri, Nerbiou, Chèze Mayabat, Chèze et Pouy Ardouin). La répartition des cellules favorables pour le Ge est assez homogène sur cette zone et essentiellement axée sur les terrains ordoviciens et dévoniens qui définissent les cibles privilégiées pour la prospection du Ge. Les formations granitiques telles que Cauterets ou Néouvielle ainsi que les formations de type flysch carbonifère ne présentent aucun potentiel.

Enfin, la zone des Pyrénées atlantiques ne contient que très peu de cellules favorables et les indices de zinc connus correspondent pour la plupart à des filons typiques d'une remobilisation tardive.

9. Conclusion

Les connaissances concernant la chaîne des Pyrénées et plus particulièrement la Zone Axiale varisque des Pyrénées ont considérablement évolué au cours de la dernière décennie. En effet, trois éléments géologiques majeurs modifiant profondément l'interprétation des Pyrénées hercyniennes ont été mis en évidence :

- i) la réinterprétation des dômes orthogneissiques, anciennement considérés comme étant du socle précambrien, en de vastes intrusions laccolitiques ordoviciennes affectées par l'orogénèse hercynienne ;
- ii) la réinterprétation géodynamique et structurale du Paléozoïque inférieur et l'importance des événements sardes ;
- iii) la réinterprétation stratigraphique en intégrant notamment l'origine intrusive des gneiss ainsi que la phase sarde, responsable de l'absence d'une grande partie de l'Ordovicien.

Ces nouveaux paramètres remettent en cause les connaissances et les modèles établis concernant les ressources minérales dans la Zone Axiale des Pyrénées. Ces dernières ont été insuffisamment étudiées et prospectées, les derniers travaux datant des années 1990.

La compilation des données existantes et notamment les travaux du BRGM, acquis lors de l'inventaire minier national, couplée à de nombreux rapports nous permettent de mettre en évidence trois substances principales dans les Pyrénées et de valoriser ces données sous forme de carte prédictives :

- i) Au regard des besoins en métaux stratégiques et parmi toutes les substances pouvant présenter un intérêt économique, le tungstène semble constituer l'objectif principal de toute reprise d'activité, particulièrement dans les Pyrénées. En effet, les gisements de type skarn comme Salau et Costabonne doivent être les modèles privilégiés pour toute reprise d'activité d'exploration. Un contrôle détaillé des anomalies W, même les plus ténues, doit également être mis en avant en partant du constat que les cibles majeures (Salau et Costabonne) ne sont portées que par 2 ou 3 points anomaliques. Dans ce cadre, le domaine du Hougail constitue un secteur favorable à la reprise de type prospection géochimique.

Les cartes issues des démarches de prédictivité confirment l'intérêt de ces indices et en étendent les perspectives. D'autres zones pourraient aussi faire l'objet de travaux complémentaires surtout à l'est et au centre du massif ;

- ii) Le potentiel aurifère de la Zone Axiale des Pyrénées semble être démontré par les études géochimiques et alluvionnaires menées lors de l'inventaire minier national. En revanche l'origine de l'or (or primaire) est généralement méconnue et aucun modèle métallogénique ne peut être proposé. Cette thématique serait donc à reprendre depuis un stade amont, en envisageant des objectifs non conventionnels. Les cartes de prédictivité mettent en évidence plusieurs zones de premier intérêt, surtout à l'est (district des Aspres), au centre du massif, à l'ouest de Bagnères de Luchon et dans le massif du Labourd dans les Pyrénées. La présence de skarns à W et Au est aussi à retenir ;

- iii) Les minéralisations de zinc-plomb + germanium, historiquement connues et exploitées dans les Pyrénées, sont encaissées dans les carbonates ordoviciens et dévoniens et sont de types SEDEX. Le développement du gisement d'Arrens, dans le domaine de Pierrefitte, est la priorité du district zincifère de la Zone Axiale Pyrénéenne. Les premières études considèrent ce gisement comme étant l'un des principaux gisements français pour le zinc et le principal pour la barytine. Enfin, certains gisements à zinc - plomb non économiquement viables peuvent être valorisables par la présence de germanium. Les cartes de prédictivité produites sur cette thématique montrent que les secteurs les plus favorables sont situés dans les Pyrénées centrales, dans l'environnement direct des calcaires cambro-ordoviciens ou dévoniens.

10. Bibliographie

- Auréjac, J. B., Gleizes, G., Diot, H. & Bouchez, J. L.** (2004) - Le complexe granitique de Quérigut (Pyrénées, France) réexaminé par la technique de l'ASM: un pluton syntectonique de la transpression hercynienne. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175, 157-174.
- Baetens E.** (1989) - L'environnement géologique du gisement de tungstène de Costabonne. ENSM Paris, *Mém. Sci. Terre*, 8, 238 p.
- Barbey P., Cheilletz A., Laumonier B.** (2001) - The Canigou orthogneisses (Eastern Pyrenees, France, Spain): an Early Ordovician rapakivi granite laccolith and its contact aureole. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 332, 129-136.
- Barnolas A. et Chriron J.C.** (1996) - Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. *Édition du Bureau des Recherches Géologiques et Minières et de l'Instituto Tecnológico Geominero de Espana*, 729 p.
- Beaumont C., Muñoz J.A., Hamilton J., Fullsack Ph.** (2000) - Factors controlling the Alpine Evolution of the central Pyrenees inferred from a comparison of observations and geodynamical models. *Journal of Geophysical Research*, 105, 8121-8145.
- Bixel F.** (1987) - Le volcanisme stéphano-permien des Pyrénées. *Pétrographie-Minéralogie-Géochimie. Cuad. Geol. Iberica*, 11, 41-55.
- Bodin J.** (1987) - Le Dévonien inférieur et moyen des Pyrénées ariégeoises et centrales. Biostratigraphie, séries hétérotopiques et mise en évidence de nappes hercyniennes précoces. Thèse Univ. Toulouse-III, 255 p.
- Braux C.** (1980) - Étude géologique des hautes vallées d'Astau et du Louron. Les minéralisations Zn (Pb, Cu) et Mn. Thèse 3^{ème} cycle, Orléans.
- Calvet P.** (1988) - Étude structurale et métallogénique de l'anticlinorium de Pierrefitte : influence de la déformation sur les minéralisations stratiformes. Thèse Univ. Orléans, 283 p.
- Carreras J. et Capella I.** (1994) - Tectonic levels in the Palaeozoic basement of the Pyrénées: a review and a new interpretation. *Journal of Structural Geology*, 16, 11, 1509-1524.
- Casas J.M., Queralt P., Mencos J., Gratacos O.** (2012) - Distribution of linear mesostructures in oblique folded surfaces: Unravelling superposed Ordovician and Variscan folds in Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 44, 141-150.
- Castineras P., Navidad M., Liesa M., Carreras J., Casas J.M.** (2008) - U-Pb zircon ages (SHRIMP) for Cadomian and Early Ordovician magmatism in the Eastern Pyrenees: New insights into the pre-Variscan Evolution of the northern Gondwana margin. *Tectonophysics*, 461, 228-239.
- Cocherie A., Baudin T., Guerrot C., Autran A., Fanning M.C., Laumonier B.** (2005) - Evidence of the Lower Ordovician intrusion age for metagranites in the Late Proterozoic Canaveilles Group of Pyrénées and Montagne Noire (France): new U-Pb datings. *Bull. Soc. géol. France*, 176, 269-282.
- Degardin J.M.** (1987) - Le Silurien des Pyrénées : biostratigraphie et paléogéographie. Thèse Univ. Lille, 417 p.

Deloule E., Guillot F., Schaltegger U., Bertrand J.M., Baudin T. (2001) - Zircon U-Pb geochronology of Ordovician magmatism in the polycyclic Rutor Massif (internal W Alps). *International Journal Of Earth Sciences*, 91(6), 964-978.

Denèle Y., Olivier Ph., Gleizes G. (2008) - Progressive deformation of a zone of magma transfer in a transpressional regime: The Variscan Mérens Shear Zone (Pyrenees, France). *Journal of Structural Geology*, 30, 1138-1149.

Denèle Y., Olivier Ph., Gleizes G., Barbey P. (2009) - Decoupling between the middle and upper crust during transpression-related lateral flow: Variscan Evolution of the Aston gneiss dome (Pyrenees, France). *Tectonophysics*, 477, 244-261.

Denèle Y., Laumonier B., Paquette J.L., Olivier Ph., Gleizes G., Barbey P. (2015) - Timing of granite emplacement, crustal flow and gneiss dome formation in the Variscan segment of the Pyrenees. *Geological Society, London, Special Publication*, 405, 265-287.

Delvolvé J.J., Souquet P., Vachard D., Perret M.F., Aguirre P. (1993) - Caractérisation d'un bassin d'avant-pays dans le Carbonifère des Pyrénées : faciès, chronologie de la tectonique syn-sédimentaire. e. *R. Acad. Sci. Paris*, 316, II, 959-966.

Dommanget A. (1977) - Le cadre géologique des niveaux minéralisés (Pb-Zn) du Paléozoïque de la zone axiale des Hautes-Pyrénées ariégeoises (secteur Aulus-Port d'Aulus). Thèse 3^{ème} cycle, Paris VI, 224 p.

Escande B., Fortuné J.P., Permiugeat F. (1981) - Minéralisations barytiques et leurs relations avec l'encaissant dans la région de Pierrefitte-Arrens (Hautes-Pyrénées). *Compte Rendu D. G. R. S. T. Action concertée : valorisation des ressources: du sous-sol. N° 78-7-0209.*

Escande B., Majesté-Menjoulas C. (1985) - Âge dévonien moyen à supérieur de la succession calcaréodétritique à minéralisations stratiformes de la région d'Arrens (Hautes-Pyrénées). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 8, I, 2, 277-279.

Fortuné J.P. et Tollon F. (1980) - La Montagne Noire. In G. Pouit et J.P. Fortuné: Métallogénie comparée des Pyrénées et du Sud du Massif Central. 26ème C. G. 1., G22, 109-128.

Franke W., Engel W. (1986) - Syn-orogenic sedimentation in the variscan belt of Europe. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 8, II, I, 25-33.

Froehlich F. (1970) - Les montagnes du Sud d'Arrens (Hautes-Pyrénées) : étude géologique et métallogénique. Thèse 3^{ème} cycle, Paris VI.

Garcia-Sansegundo J. (1990) - Structure of the Paleozoic in the Aran valley, Axial Zone, Central Pyrénées. *Bull. Soc. Geol. France*, 8, VI, 2, 229-239.

Garcia-Sansegundo J. (1992) - Estratigrafia y estructura de la zona axial pireneica en la travesai dei valle de Aran y de la alta Ribargorça. *Bolet. Geol. y Mineralo.*, 103, 1, 42-93.

Garcia-Sansegundo J. (1996) - Hercynian structure of the Axial Zone of the Pyrenees : the Aran Valley cross-section (Spain-France). *Journal of Structural Geology*, 18, 1315-1325.

Garcia-Sansegundo J. (2014) - Structural control and geological significance of the Zinc - plomb ores formed in the Benasque Pass area (Central Pyrenees) during the post-late Ordovician extensional event of the Gondwana margin. *Ore Geology Reviews*, 56, 516-527.

Gleizes G., Leblanc D., Bouchez, J.L. (1998b) - The main phase of the hercynian orogeny of the Pyrenees is a dextral transpression. In: Holdsworth R.E., Strachan R.A., Dewey J.F. (Eds.), Continental Transpression and Transensional Tectonics. *Geological Society of London*, special paper, 135, 267-273.

Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. (1998) - Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews* 13, 7-27.

Guy B. (1988) - Contribution à l'étude des skarns de Costabonne (Pyrénées Orientales, France) et la théorie de la zonation métasomatique. Thèse de 3^{ème} cycle, Paris.

Kleinsmiede W.F.J. (1960) - Geology of the Vallée d'Aran (Central Pyrénées). *Leidse Geol. Meded.*, 18, 129-245.

Laumonier B. (1998) - Les Pyrénées centrales et orientales au début du Paléozoïque (Cambrien s.l.) : évolution paléogéographique et géodynamique. *Geodinamica Acta*, 11, 1-11.

Laumonier B., Autran A., Barbey P., Cheilletz A., Baudin T., Cocherie A., Guerrot C. (2004) - Conséquences de l'absence de socle cadomien sur l'âge et la signification des séries pré-varisques (anté-Ordovicien supérieur) du sud de la France (Pyrénées, Montagne Noire). *Bull. Soc. Géol. Fr.* 175, 643-655.

Laumonier B. (2008) - Les Pyrénées pré-hercyniennes et hercyniennes. In : Canérot J., Colin J.P., Platel J.P., Bilotte M. (dir.). Pyrénées d'hier et d'aujourd'hui, Pau, 20-21 septembre 2008. Éd. Atlantica, 23-35.

Lucas C. (1985) - Le grès rouge du versant Nord des Pyrénées. Essai sur la géodynamique des dépôts continentaux du Permien au Trias. Thèse Univ. Toulouse III.

Majesté-Menjoulas C. (1979) - Évolution alpine d'un segment de chaîne varisque : nappe de Gavarnie, chevauchement Cinq-Monts-Gentiane. Thèse d'Etat, Univ. Toulouse, 343 p.

Majesté-Menjoulas C., Debat P. (1994) - Pyrénées. In J. D. Keppie (Ed.) : Pre-Mesozoic geology in France and related areas. *Springer-Verlag, Berlin*, 442-457.

Matte P. (2001) - The Variscan collage and orogeny (480-290Ma) and the tectonic definition of the Armorica microplate: a review. *Terra Nova*, 13, 122-128.

Mirouse R. (1966) - Recherches géologiques dans la partie occidentale de la Zone primaire des Pyrénées. *Mém. Serv. Carte Géol. Fr.*, 451 p.

Nicol N. (1997) - Étude structurale des minéralisations Zinc - plomb du Paléozoïque du Dôme de Pierrefitte (Haute-Pyrénées). Goniométrie de texture appliquée aux minéraux transparents et opaques. Thèse 3^{ème} cycle, Orléans.

Oudin E., Pouit G., Tollon F. (1988) - Les minéraux en trace de Ni-Co, Sn, Ge-Ga, Pb-Sb, Ag et Au témoins de l'évolution de l'hydrothermalisme de l'Ordovicien au Dévonien dans les minéralisations zincifères des Pyrénées Centrales. *Bull. Minéral.*, 111, 49-63.

Perseil E. A. (1968) - Contribution à la métallogénie du manganèse dans la France méridionale. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Toulouse.

Poblet J., Casas J. M. (1993) - Evidence for Devonian-Carboniferous extensional tectonics in the Central Pyrénées. *Geodyn. Acta*, 6, 225-232.

Pouit G. (1978) - Différents modèles de minéralisations "hydrothermales-sédimentaires" à Zn (Pb) du Paléozoïque des Pyrénées Centrales. *Mineral. Deposita*, 13, 411-421.

Pouit G. (1984) - Les gisements à sulfures massifs exhalatifs-sédimentaires : une mise au point sur leur classification et la méthodologie de leur recherche. *Chrono Rech. Min.*, 476, 31-34.

Pouit G. (1986) - Les minéralisations Zinc - plomb exhalatives sédimentaires de Bentailou et de l'anticlinorium de Bossost (Pyrénées ariégeoises, France). *Chrono Rech. Min.*, 485, 3-16.

Pouit G. (1993) - Les horizons minéralisés en Zinc - plomb (Ba) du Paléozoïque des Pyrénées centrales françaises. *Chrono Rech. Min.*, nO 511, 21-31. Pouit G. et Alsac C., 1978 : Les faciès noirs tuffacés du Dévonien et de l'Ordovicien des Pyrénées centrales et leurs minéralisations Zn (Pb). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 287, D, 415-418.

Quémeneur J. (1974) - Les gisements de magnésite du Pays Basque: cadre géologique et sédimentologique, genèse de la magnésite en milieu sédimentaire. Thèse 3^{ème} cycle, Paris VI.

Robardet M., Verniers J., Feist R., Paris F. (1994) - Le Paléozoïque anté-varisque de France ; contexte paléogéographique et géodynamique. *Géologie de la France*, n° 3, 3-31.

Roger F., Respault J.P., Brunel M., Matte P et Paquette J.P. (2004) - Première datation U/Pb des orthogneiss ocellés de la zone axiale de la Montagne Noire (sud du Massif Central) : nouveaux témoins du magmatisme ordovicien dans la chaîne varisque. *C.R. Geosciences*, 336, 19-28.

Salpêtre I. (1993)- Synthèse régionale des Pyrénées-Orientales. Rapport BRGM Annexe 3 P 05493700, 84 p.

Stampfli G.M., Hochard C., Vérard C., Wilhem C., Von Raumer J. (2013) - The formation of Pangea. *Tectonophysics*, 593, 1-19.

Tourlière B., Pakyuz-Charrier E., Cassard D., Barbanson L., Gumiaux C. (2015) - Cell Based Associations : A procedure for considering scarce and mixed mineral occurrences in predictive mapping. *Computers & Geosciences*, 78, 53-62.

Van Marck de Lummen G., Verkaeren J. (1986) - Physicochemical study of skarn formation in pelitic rock, Costabonne peak area, eastern Pyrenees, France. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 93, 77-88.

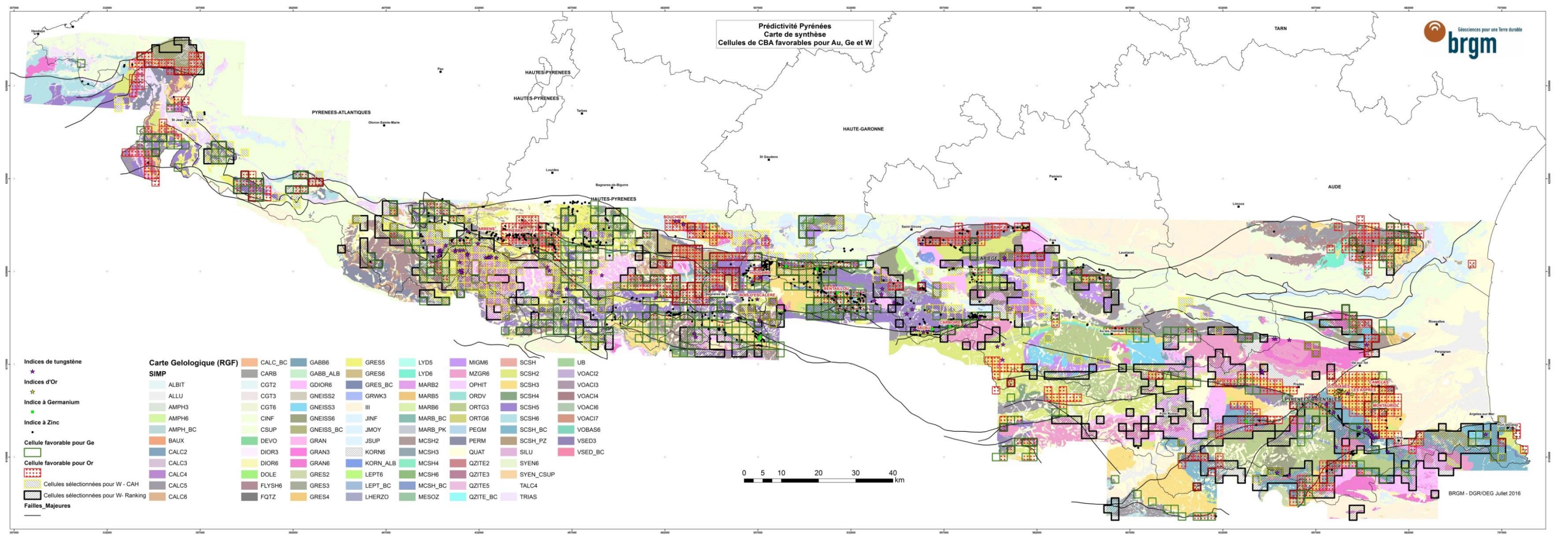
Vegas G. (1982) - Les minéralisations plombo-zincifères de la concession de Baren (Haute-Garonne) : leur contexte lithologique et géochimique. Thèse 3^{ème} cycle, Toulouse, 148 p.

Vernhet Y. (1981) - Les minéralisations zincifères de l'Ordovicien et du Dévonien du Val d'Orle (district de Sentein, Ariège) et de la région de Fourcaye (Val d'Aran, Espagne). Thèse 3^{ème} cycle, Paris VI, 225 p.

Von Raumer J., Stampfli G., Bussy F. (2003) - Gondwana-derived microcontinents - the constituents of the Variscan and Alpine collisional orogens. *Tectonophysics*, 365, 7-22.

Annexe 1

Carte prédictive de synthèse pour W, Au et Ge dans les Pyrénées





Centre scientifique et technique
Direction des g eoressources
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr