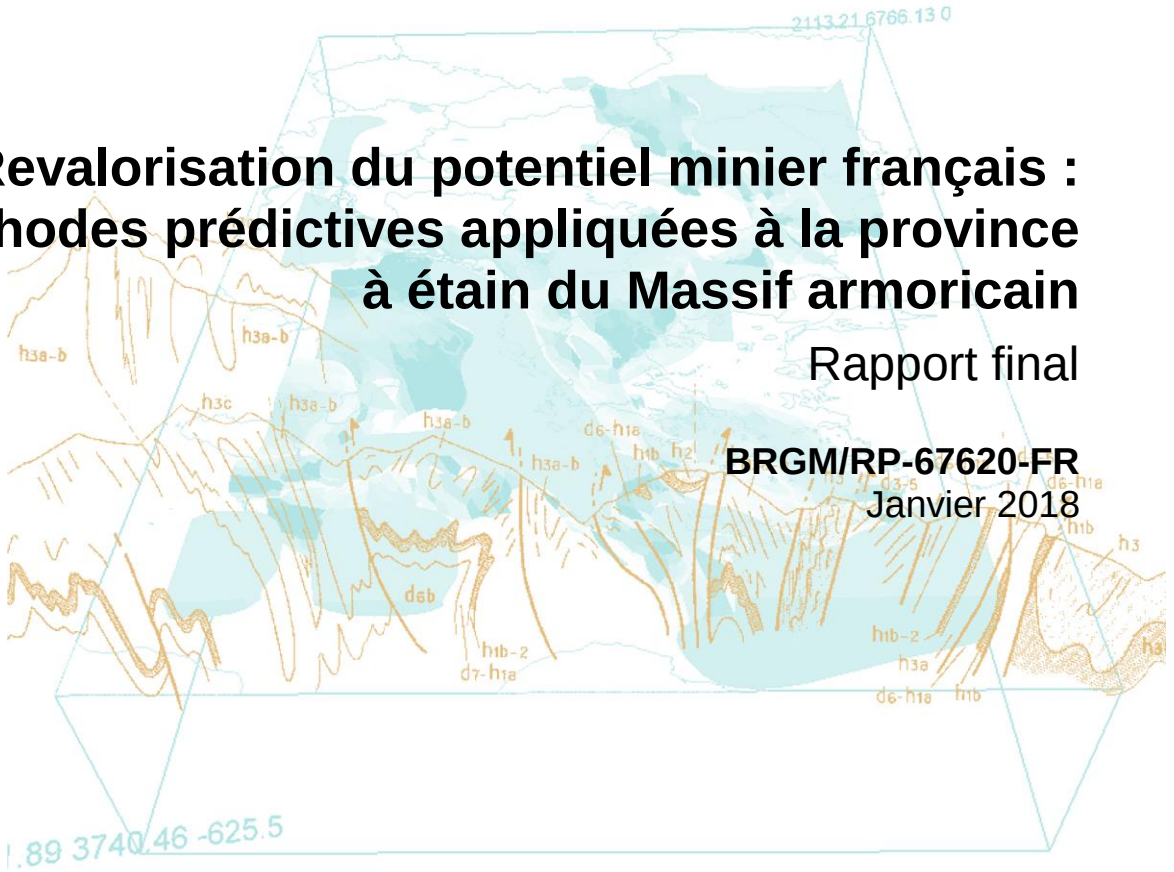
Document public

Revalorisation du potentiel minier français : Méthodes prédictives appliquées à la province à étain du Massif armoricain

Rapport final

BRGM/RP-67620-FR
Janvier 2018



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Revalorisation du potentiel minier français : Méthodes prédictives appliquées à la province à étain du Massif armoricain

Rapport final

BRGM/RP-67620-FR
Janvier 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2017
avec le soutien du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

E. Gloaguen, B. Tourlière, A.S. Audion-Serrand

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : Daniel Cassard	Nom : Jean-Claude Guillaneau
Fonction : Responsable Scientifique de Programme	Fonction : Directeur de DGR
Date : 20/02/18	Date :
Signature :	Signature :

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Étain, Potentiel minier, Massif armoricain, Prédictivité, Favorabilité, Weight of Evidence, Cell-Based Association.

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

Gloaguen E., Tourlière B., Audion-Serrand A.S. (2018) - Revalorisation du potentiel minier français : Méthodes prédictives appliquées à la province à étain du Massif armoricain. Rapport final. BRGM/RP-67620-FR, 73 p., 44 fig., 7 tabl., 1 ann., 1 CD.

© BRGM, 2018, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'étain est un élément chimique préférentiellement concentré dans la croûte continentale à des teneurs de l'ordre de 1,5 à 5,5 ppm. Il est préférentiellement porté par des silicates, notamment les micas (biotite, muscovite) dont il est un constituant mineur. Les processus magmatiques et hydrothermaux qui conduisent à la formation de gisements sont capables de concentrer fortement l'étain et les processus d'altération de surface (altération chimique et mécanique) peuvent conduire à la formation de gisements secondaires (placers) avec des tonnages de cassitérite supérieurs au millier de tonnes et des teneurs dépassant localement le kilogramme par tonne. D'un point de vue métallogénique, Parmi les 8 types de gisements primaires d'étain connus seuls 6 types sont présents dans le Massif armoricain :

1) Les filons, veines, stockwerks et greisens associés à des intrusions de granites, exemples : La Villeder, Montbelleux, Abbaretz, L'Echasserie.

2) Les granites à métaux rares, exemple : Tréguennec.

3) Les porphyres et intrusions subvolcaniques, exemples : La Rousselière, Lanmeur, (Beauvain).

4) Les pegmatites LCT, exemples : Saint-Sébastien, Baud, Le Guilvinec.

5) Les stockscheiders, exemples : Penfeuteun, Scaer.

6) Les pipes bréchiques, par exemple Kervenguy (essentiellement à tungstène).

Si le potentiel économique des trois premiers types n'est plus à démontrer, cela reste à faire pour les pegmatites, les stockscheiders et les pipes brèchiques qui sont très rares ou peu minéralisés dans le Massif armoricain.

L'altération chimique et mécanique de ces différents gisements primaires peut conduire à la formation de placers dans les rivières (ex : Saint-Renan, La Hye) ou en bord de mer (Pénestin).

Le premier type de gisement est de loin le plus abondant, mais contient en général des tonnages faibles (inférieurs à 10 000 t Sn). Les autres types (à l'exception des pegmatites) sont plus rares, mais contiennent en général des tonnages en étain importants à très importants.

- les relations spatiales entre les minéralisations à étain, les grandes zones de failles, les granites peralumineux réduits et les caractéristiques des encaissants amènent à proposer les métallotectes suivants pour la recherche de minéralisations stannifères: la proximité de zones de failles majeures et des failles mineures associées ;
- des roches encaissantes de bas grade métamorphique et de faible perméabilité (schistes, granites antérieurs non déformés) ou à forte réactivité chimique (carbonates), soit une mise en place relativement haute dans la croûte ;
- un contexte de faible taux de déformation lors de la mise en place de l'intrusif qui privilégie la formation de structures perméables (filons, fentes de tension, etc.) piégeant les fluides plutôt qu'une forte déformation (par exemple une mylonitisation) qui conduit à la dispersion des fluides minéralisateurs.

Le Massif armoricain est la première province pour étain de France avec 55 % du stock métal connu, soit 34 080 t Sn métal. Les gisements sont d'âge varisque (320-300 Ma) à l'exception du district de Montbelleux d'âge Cambrien inférieur. **Le Massif armoricain contient au moins cinq districts économiques** (Abbaretz-Nozay, Montbelleux, Lanmeur, Tréguennec et Saint-Renan). Tous ces districts, à part le granite à métaux rares de Tréguennec, sont portés par des filons, veines, stockwerks et greisens associés à des intrusions de granites. Les skarns et amas sulfurés à étain sont inconnus dans le Massif armoricain. Par ailleurs, le potentiel en étain des gisements associés à des porphyres ou des intrusions hypovolcaniques reste à démontrer.

Ces éléments justifient donc la recherche de nouvelles cibles pour étain dans cette vaste province stannifère au moyen de nouvelles approches prédictives.

Pour réaliser cette étude, une carte de synthèse issue de l'harmonisation de la cartographie au 1/50 000 a été réalisée. À partir de cette carte et de la localisation des gisements et indices une succession d'approches basées sur les techniques du « Weight of Evidence » (WoE) et de la « Cell- Based Association » (CBA), avec plusieurs variantes, ont été réalisées.

Les résultats (Figure 1, ci-dessous) **conduisent à proposer en priorité une recherche de ressources en étain sur le pourtour du massif de Pontivy-Langonnet, les pourtours est et nord des massifs de Mortagne et de Partenay et le flanc nord et le prolongement NE du massif de Saint-Renan-Kersaint**. Les résultats obtenus sur les districts ayant des réserves importantes ne mettent pas en évidence de vastes zones prospectives dans un rayon de 10 à 20 km autour des gisements connus. **Ceci conduit à recommander la recherche de ressources complémentaires dans l'environnement immédiat (1 à 5 km) autour des gisements connus pour les districts d'Abbaretz, de Montbelleux, de Lanmeur. D'autres granites de type Tréguennec pourraient exister selon un axe ouest-est sur plusieurs dizaines de kilomètres à l'est de Tréguennec.**

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la convention 2017 n° 2102186360 signée le 20 juillet 2017 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/DEB) du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire et le BRGM.

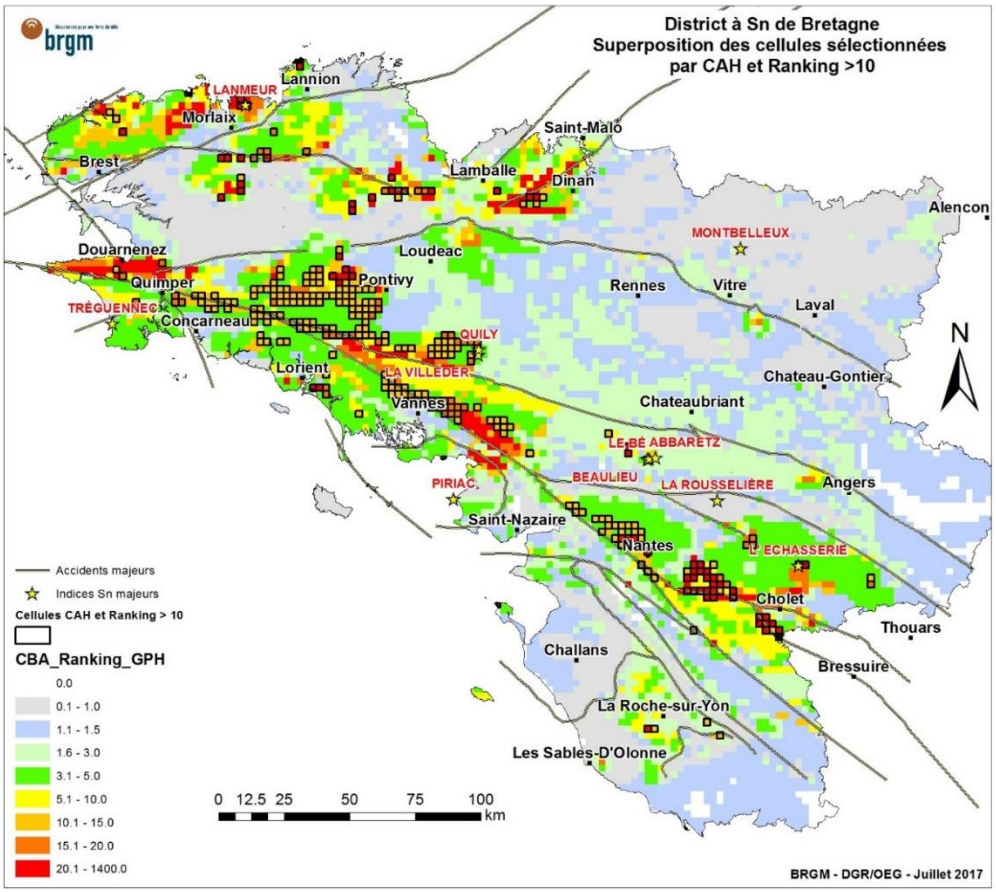


Figure 1 : Résultat de prédictivité étain sur le Massif armoricain : intersection des cellules favorables par la méthode CBA et par Ranking > 10.

Sommaire

1. Généralités sur l'étain 11

1.1. PORTEURS MINÉRALOGIQUES DE L'ÉTAIN 11

1.2. TYPES DE GISEMENTS PORTEURS D'ÉTAIN 12
1.2.1. Les gisements d'étain primaire : hydrothermaux ou magmatiques 12
1.2.2. Les principaux types de gisements porteurs d'étain 12

1.3. CONTEXTE GÉODYNAMIQUE ET METALLOTECTES 19
1.3.1. Contextes géodynamique des gisements d'étain 19
1.3.2. Metallotectes 20

1.4. L'ÉTAIN DANS LE MASSIF ARMORICAIN 21
1.4.1. Distribution de l'étain 21
1.4.2. Age des minéralisations à étain 22
1.4.3. Types de gisements d'étain dans le Massif armoricain 23
1.4.4. Principaux districts, gisements et tonnages 23
1.4.5. Les districts à ressources identifiées 27
1.4.6. Autres districts et indices 34

1.5. PRINCIPAUX ÉLÉMENTS EN VUE DE L'ÉTUDE DE FAVORABILITÉ 35

2. Études de favorabilité à partir des formations géologiques 37

2.1. CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL 37

2.2. CARTE GÉOLOGIQUE SYNTHÉTISÉE 38

2.3. WOE (WEIGHT OF EVIDENCE) 40
2.3.1. Principe 40
2.3.2. Résultats 40

2.4. CBA (CELL-BASED ASSOCIATION) 42
2.4.1. CBA par CAH 43
2.4.2. CBA par signature exacte 46
2.4.3. Classement sur CBA 49

2.5. UTILISATION DE DONNÉES GÉOPHYSIQUES POUR AMÉLIORER LES RÉSULTATS DE FAVORABILITÉ 52

2.6. SÉLECTION DES ZONES FAVORABLES 54

2.7. INTERSECTION ENTRE ZONES FAVORABLES ET CBA/CAH 55
2.7.1. À l'échelle de la province 55
2.7.2. À l'échelle du district 56

3. Conclusion 67

4. Bibliographie 69

Liste des figures

Figure 1 : Résultat de prédictivité étain sur le Massif armoricain : Intersection des cellules favorables par la méthode CBA et par Ranking > 10. 5

Figure 2 : Cassitérite en cristal de 2 cm sur une gangue quartzeuse (La Villeder, Morbihan) (© BRGM - Urbain de Cayeux). 11

Figure 3 : Photographies de différentes morphologies et types de gisements d'étain. Clichés E. Gloaguen....14

Figure 4 : Schémas conceptuels de différentes minéralisations à étain au toit d'une coupole granitique. À gauche d'après Cerny *et al.* (2005), à droite d'après Gloaguen et Dain (2001). 15

Figure 5 : Schéma conceptuel de différents types de minéralisations et morphologies associées à la mise en place d'intrusion granitiques à différents niveaux structuraux. D'après Jébrak et Marcoux (2008). 15

Figure 6 : Localisation (ellipse rouge) et géométrie de quelques exemples de minéralisations à étain en fonction de la profondeur de mise en place du granite et de la déformation régionale. D'après Gloaguen (inédit). 16

Figure 7 : Carte et coupe géologique du granite à métaux rares de Beauvoir, recoupant le stockwerk à tungstène d'Échassières, Allier. Modifié d'après Raimbault *et al.*, 1995. 17

Figure 8 : Stades de formation du placer stannifère Pliocène de La Hye (Morbihan). Modifié d'après Chauris et Houlgatte (1988). 18

Figure 9 : Différents types de contextes géodynamiques dans lesquels des minéralisations à étain sont rencontrées. Page précédente d'après Gloaguen et Dain (2001) : contextes de subduction océan-continent avec croûte continentale épaissie et contexte de collision continentale ; Ci-dessus : mêmes contextes que figure du haut avec en plus le contexte de rifting intra-continental avec magmatisme alcalin. D'après Robb (2005). 20

Figure 10 : Modèle métallogénique conceptuel d'échelle régionale pour les minéralisations à étain (tungstène). D'après Gloaguen (Inédit). 21

Figure 11 : Synthèse de la prospection alluvionnaire pour cassitérite dans le Massif armoricain (d'après Guigues et Devisme, 1969, modifié par Lulzac, 2012). Encart des différents domaines du Massif armoricain d'après Ballèvre *et al.*, 2013. 22

Figure 12 : Principaux districts et indices à étain du massif armoricain. Modifié d'après Gloaguen et Dain (2001). 24

Figure 13 : Répartition du tonnage d'étain par type de gisement en France métropolitaine. 26

Figure 14 : Principaux types de gisements étudiés pour la prédictivité étain (source des données : base ProMine, Cassard *et al.,* 2015), géologie issue de la carte géolgique de la France au 1/1 000 000 27

Figure 15 : Cadre géologique du district de Montbelleux. Modifié d'après Mathey (2017). 28

Figure 16 : (a) Coupe 3D NE/SW et (b) NW/SE du gisement de Montbelleux (Gassot, 2017). SC : sondage carotté 29

Figure 17 : Carte géologique, réseau de fractures et filons minéralisés en Sn-Cu sur le secteur de Lanmeur (modifié d'après BRGM,1982). 30

Figure 18 : Carte géologique du secteur de Nozay-Abbaretz au 1/50 000 (Gatinel, 2011, modifié d'après Trautmann *et al.,* 1987). 32

Figure 19 : Carte géologique de la région de Plonéour-Lanvern avec localisation du dyke de granite de Tréguennec et des autres dykes similaires. Modifié d'après Lulzac et Apolinarski, 1986 33

Figure 20 : Carte géologique du dyke de granite à métaux rares de Tréguennec (Picault, 2010). 34

Figure 21 : Carte et coupe des principaux domaines géologique du Massif armoricain (Ballèvre *et al.,* 2013). 37

Figure 22 : Carte géologique synthétisée de Bretagne à partir des cartes harmonisées au 1/50 000 et localisation des principaux indices et gisements à étain. 39
Figure 23 : Résultats du WoE pour Sn dans le Massif armoricain....42
Figure 24 : Cellules appartenant à un groupe de CAH correspondant à un gîte à Sn 43
Figure 25 : Cellules classées par CAH associées aux gîtes de référence 45
Figure 26 : Granites et indices à Sn de référence....47
Figure 27 : Cellules ayant exactement la même association lithologique qu'une cellule avec un gîte de référence à Sn 48
Figure 28 : Superposition des résultats des cellules sélectionnée par CAH et par signature exacte....49
Figure 29 : Classement sur CBA à partir des rapports de fréquence sur les formations....51
Figure 30 : Carte de l'anomalie de Bouguer, les indices à Sn sont superposés aux zones légères (Bouguer < 0) 52
Figure 31 : Classement sur CBA intégrant les données lithologiques et l'anomalie gravimétrique de Bouguer....53
Figure 32 : Sélection des zones les plus favorables à la présence de minéralisations à Sn estimées par classement sur CBA (Valeurs > 10) en utilisant des paramètres lithostratigraphique et gravimétrique. 54
Figure 33 : Intersection entre cellules sélectionnées à partir de la CAH et cellules à ranking > 10 55
Figure 34 : Granites et cellules issues de la CBA par ranking > 10. Emprise des zones détaillées dans les zooms. 56
Figure 35 : Légende commune aux figures 35 à 43....57
Figure 36 : Nom des principaux massifs de granitoïdes de Bretagne 57
Figure 37 : Zones favorables, secteur nord 58
Figure 38 : Zones favorables, secteur nord-ouest 59
Figure 39 : Zones favorables, secteur sud-ouest....60
Figure 40 : Zones favorables , secteur sud....61
Figure 41 : Zones favorables, secteur de Piriac, la Rousselière....62
Figure 42 : Zones favorables, secteur sud-est....63
Figure 43 : Zones favorables, secteur centre....64
Figure 44 : Zones favorables, secteur de Monbelleux 65

Liste des tableaux

Tableau 1 : Production totale + réserves mesurées + ressources indiquées en étain métal des gisements de France métropolitaine (Source : BD ProMine 12/2017). Les gisements du Massif armoricain sont en gras. 25

Tableau 2 : Liste des codes stratigraphiques 38

Tableau 3 : Liste des codes lithologiques 39

Tableau 4 : Résultats obtenus par la méthode WoE appliquée aux indices d'étain du Massif armoricain - en rouge, les formations les plus pertinentes. 41

Tableau 5 : Associations majoritaires présentes dans les groupes de CAH associés à un gîte de référence à Sn. 44

Tableau 6 : Associations exactes présentes dans les cellules contenant un gîte de référence à Sn - en fuschia, le granites protérozoïques, en beige les granites ordoviciens et en rouge les granite hercyniens. 46

Tableau 7 : Tableau des rapports de fréquence (FRatio) des formations associées aux gîtes à Sn de référence. 50

Liste des annexes

Annexe 1 : Liste des fichiers numériques sur le CD-ROM 73

1. Généralités sur l'étain

L'étain (de symbole Sn et de numéro atomique 50) sous sa forme β à température ambiante est un métal mou de couleur gris argent très malléable et qui fond à basse température (232 °C) d'où son utilisation depuis au moins l'antiquité, notamment pour la fabrication du bronze. Le clarke en étain de la croûte continentale est de l'ordre de 0,0003 % (Rudnick & Gao, 2003).

L'étain est principalement utilisé pour les soudures dans l'électronique et l'industrie (48,3 % de sa consommation en 2014), mais également dans la chimie (stabilisation du PVC, catalyseurs, pigments, etc., 15,5 %), la fabrication de fer-blanc (emballages, boîtes de conserve, 14,7 %), et plus marginalement, dans la fabrication des batteries plomb-acide (7,3 %), certains alliages (bronze, laiton, 5,2 %), les verres flottés (2 %) et d'autres usages (7,0 %) tels que les capsules de vin et de spiritueux ou les plaquettes de frein (BRGM, 2017).

En 2017, l'étain n'est pas jugé comme substance critique pour l'Union Européenne. Malgré une forte importance économique du fait de ses nombreux usages (score de 4,4/8[1]), les risques pesant sur les approvisionnements sont jugés modérés (score de 0,8/8) en raison de la multiplicité des producteurs dans le monde et en Europe (Cornouailles anglaise, Espagne Portugal, Suède) en particulier (European Commission, 2017a et 2017b).

1.1. PORTEURS MINÉRALOGIQUES DE L'ÉTAIN

Si l'on compte dans la nature un minimum de 95 espèces minérales[2] contenant de l'étain, ce métal est extrait de seulement trois à quatre espèces répandues dont la plus importante, est un oxyde, la **cassitérite** (SnO_2), puis dans une moindre mesure sous la forme de sulfures, la **stannite** (Cu_2FeSnS_4) et la **franckeite** (PbSnFeSbS).

Figure 2 : Cassitérite en cristal de 2 cm sur une gangue quartzeuse (La Villeder, Morbihan) (© BRGM - Urbain de Cayeux).

[1] Score de 4,4/8 dans la matrice de criticité de l'étain. N.B. un métal avec un score de 0 n'est pas critique, au contraire il est extrêmement critique avec un score de 8.

[2] 95 espèces minérales contenant de l'étain reconnues par l'International Mineralogical Association au 1/10/17. http://rruff.info/ima/

1.2. TYPES DE GISEMENTS PORTEURS D'ÉTAIN

1.2.1. Les gisements d'étain primaire : hydrothermaux ou magmatiques

Les gisements d'étain sont majoritairement associés à la mise en place et à la cristallisation d'intrusions de granites issus de la fusion de croûte continentale (Černý *et al*., 2005). En effet, c'est dans la croûte continentale que la concentration en étain est la plus forte. Les minéralisations en étain sont généralement hydrothermales - c'est-à-dire formées par des fluides - de haute température car associés à la fin de cristallisation du magma à l'origine du granite. En effet, malgré la cristallisation de nombreux minéraux anhydres et n'incluant pas d'étain (orthose/microcline, plagioclase, quartz, …), la saturation du magma en cassitérite est rarement atteinte, ce qui conduit à l'accumulation de fluides riche en étain entre les silicates en cours de cristallisation. L'étain et les autres éléments incompatibles dans la plupart des silicates se concentrent ainsi dans ces fluides interstitiels également riches en sel et donc appelés saumures magmatiques. La géochimie de ces saumures et notamment les concentrations relatives en chlore et fluor ont un rôle important. Lorsque le toit de l'intrusion granitique acquiert un comportement rigide en fin de cristallisation, il peut être fracturé sous l'effet des contraintes régionales et/ou l'influx de magmas sous-jacents. Cette fracturation (failles et fractures) ou ces zones en ouverture (fentes de tension) vont focaliser les fluides et piéger les saumures à métaux, lesquels conduisent à la formation de minéralisations. Les saumures à l'origine des minéralisations sont systématiquement mélangées et le plus souvent extrêmement diluées avec les fluides métamorphiques *a minima* ceux associés au métamorphisme de contact. Par ailleurs, l'étude des inclusions fluides et les données relatives aux isotopes stables montrent fréquemment l'arrivée de fluides météoriques en fin de fonctionnement du système hydrothermal (e.g., Vallance *et al.,* 2001).

La cassitérite d'origine magmatique, c'est-à-dire lorsque le magma en voie de cristallisation a atteint la saturation en cassitérite et donc cristallisé celle-ci, se trouve dans deux types distincts d'objets : dans certaines pegmatites de type LCT (Lithium-Césium-Tantale), dans des stockscheiders[3] au toit de certains granites et dans des granites à métaux rares, ces derniers étant extrêmement rares dans le monde (Figure 3). Tous les granites à métaux rares, petites intrusions d'un volume de l'ordre du km^3, contenant de la cassitérite, sont potentiellement des gisements primaires. En revanche, les pegmatites - objets en général de petite dimension[4] (volumes de l'ordre de 0,001 à 0,0001 km^3) - ne sont potentiellement des gisements primaires que si elles sont assez importantes (atteignant 100 x 10 x 50 m) ou s'il y a une très grande densité de corps de petite dimension.

1.2.2. Les principaux types de gisements porteurs d'étain

- **Gisements à cassitérite hydrothermale liés aux intrusions**

La géométrie, la minéralogie et les caractéristiques des gisements d'étain vont principalement dépendre de 4 facteurs principaux : 1) la géochimie et l'état d'oxydation du magma à l'origine du granite ; 2) le contexte structural de mise en place de l'intrusion ; 3) la profondeur de mise en place et la pression de fluide ; 4) la nature de l'encaissant.

[3] Terme d'origine Allemande qui désigne un faciès de granite particulier soulignant le sommet d'une intrusion. On observe généralement des cristaux pluridécimétriques de feldspath perpendiculaires au toit du granite dans une matrice granitique à pegmatitique. Les stockscheiders sont souvent minéralisés en cassitérite. Ils se rencontrent au toit de petites intrusions de leucogranite ou de granites à métaux rares, en général lorsque ceux-ci sont intrusifs dans des granites antérieurs.

[4] À l'exception des pegmatites archéennes géantes qui dépassent le kilomètre-cube, une grande pegmatite est de l'ordre de 100 x 10 x 50 m.

Les principaux gisements de cette catégorie sont les **filons, stockwerks** et **greisens associés aux coupoles & apex granitiques** (Figure 3, photos 1 à 3, Figures 4 et 5), les **skarns associés aux intrusifs granitiques en milieu carbonaté ou mafique** (Figure 3, photo 4), les **porphyres à étain-argent** (Figure 5) et les **pipes brêchiques** (Figure 6).

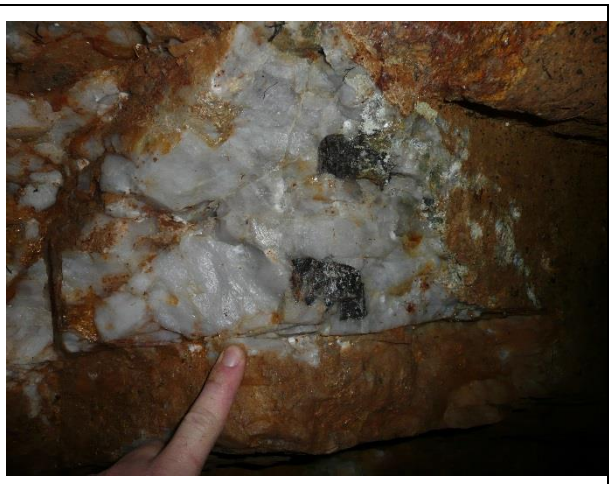
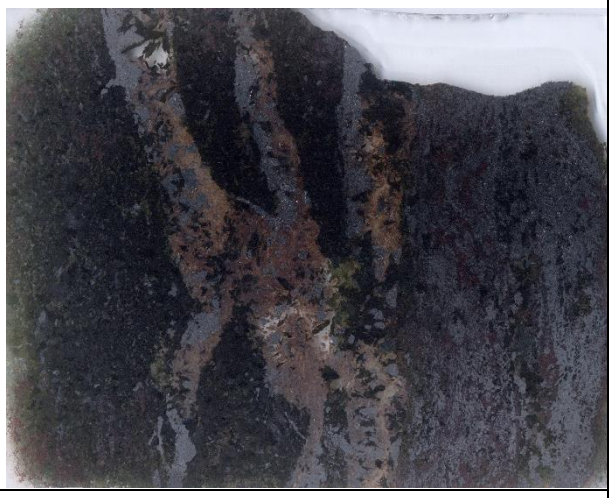
<table>
<tr><td> </td><td>  </td></tr>
<tr><td>Photo 1 : Mine de La Villeder (Le Roc-Saint-André, Morbihan) - Veines de quartz à cassitérite recoupant le granite avec altération de type greisen (zones ocres) aux épontes des veines.</td><td>Photo 2 : Mine de La Villeder (Le Roc-Saint-André, Morbihan) - Filon de quartz à cassitérite en cristaux pluricentimétriques.</td></tr>
<tr><td> </td><td>  </td></tr>
<tr><td>Photo 3 : Stockwerk de veines de quartz à wolframite de La Bosse (Echassières, Allier)</td><td>Photo 4 : Échantillon de skarn à cassitérite (brune), magnetite (gris) et amphibole (vert sombre) de Tellerhäuser - (Breitenbrunn, Saxe, Allemagne)</td></tr>
</table>

Photo 5 : Granite mylonitisé à métaux rares de Tréguennec (Finistère).

Photo 6 : Stockscheider au toit du granite à métaux rares de Montebras (Soumans, Creuse).

Photo 7 : Brêche à quartz du pipe brêchique à tungstène de Puy-les-Vignes (Saint-Léonard-de-Noblat, Haute-Vienne).

Photo 8 : Cristaux de cassitérite (petits cristaux noirs au centre) dans une pegmatite minéralisée du Cap de Creus (Cadaquès, Catalogne, Espagne).

Figure 3 : Photographies de différentes morphologies et types de gisements d'étain. Clichés E. Gloaguen.

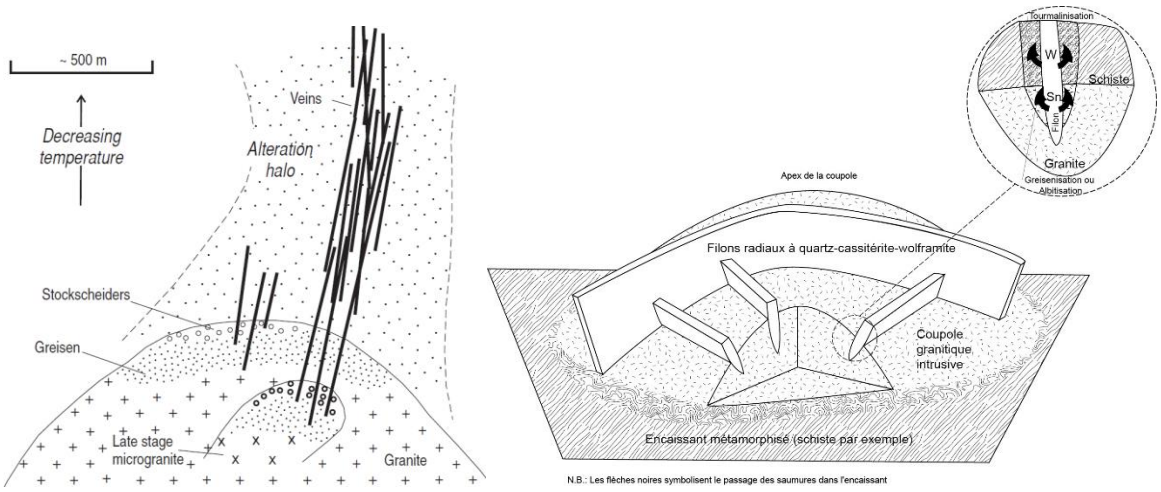


Figure 4 : Schémas conceptuels de différentes minéralisations à étain au toit d'une coupole granitique. À gauche d'après Cerny et al. *(2005), à droite d'après Gloaguen et Dain (2001).*

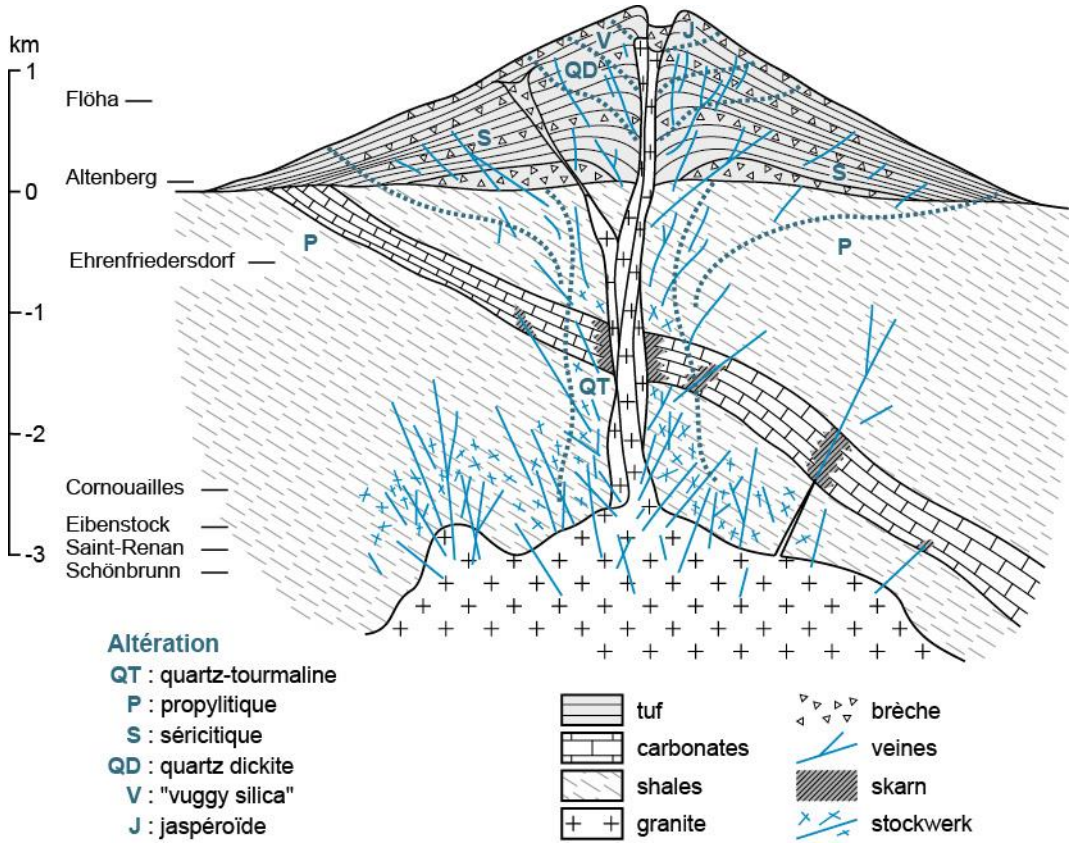


Figure 5 : Schéma conceptuel de différents types de minéralisations et morphologies associées à la mise en place d'intrusion granitiques à différents niveaux structuraux. D'après Jébrak et Marcoux (2008).

Lorsque les intrusions se mettent en place à moyenne profondeur, c'est-à-dire entre 7 et 1 km (Figure 6), dans un encaissant de type pélitique, elles se présentent sous la forme de filons de quartz ou de réseaux de veines de quartz - appelé stockwerk - au niveau du contact granite-encaissant. La cassitérite, en dehors des stockwerks, se trouve également en disséminations dans les greisens - granite altéré par les fluides hydrothermaux - aux épontes des veines et filons et/ou au contact granite-encaissant. Lorsque les intrusions se mettent en place dans des

niveaux carbonatés, les saumures magmatiques réagissent chimiquement avec l'encaissant pour former des skarns minéralisés. Les skarns à tungstène sont relativement fréquents, les skarns à cassitérite sont nettement plus rares.

Lorsque les intrusions se mettent en place à faible profondeur entre la surface et 1 km (Figure 6), les fluides exsolvés du magma intrusif, les phénomènes d'ébullitions liés à la décompression ou encore la rencontre avec des aquifères profonds peuvent conduire à une explosion du système intrusif. Cette explosion va former un pipe bréchique qui peut être minéralisé (exemple du gisement de Puy-les-Vignes, 87). Lorsque ces phénomènes ne sont pas prépondérants, il peut y avoir la formation de gisement porphyriques, comme par exemple le gisement Sn-Ag du Cerro Rico de Potosí (Bolivie).

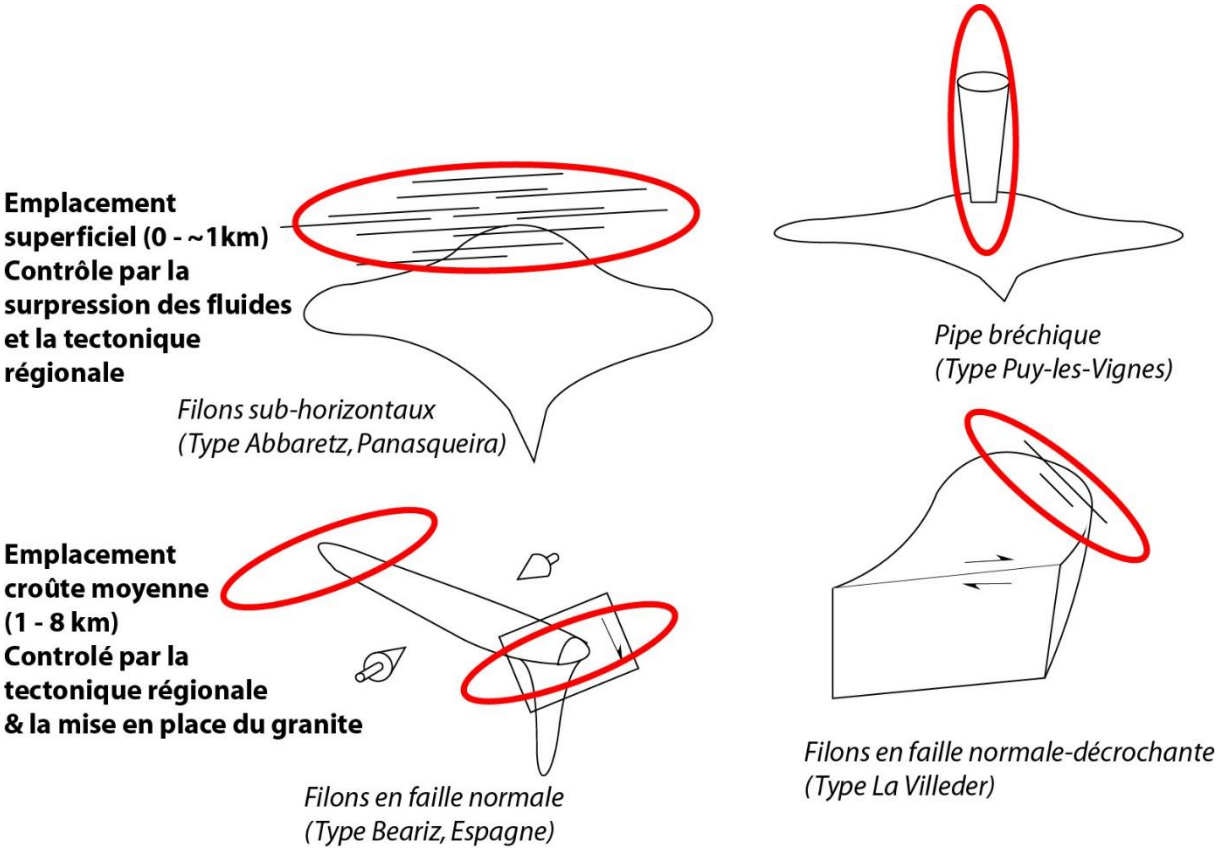


Figure 6 : Localisation (ellipse rouge) et géométrie de quelques exemples de minéralisations à étain en fonction de la profondeur de mise en place du granite et de la déformation régionale. D'après Gloaguen (inédit).

- **Amas sulfurés volcanogéniques à étain**

Certains amas sulfurés volcanogéniques (VMS) associés à un volcanisme acide contiennent des quantités importantes d'étain sous la forme de cassitérite. Ces amas sont formés par des fluides hydrothermaux chauds (350-450 °C) sous la mer, dans les arrières-arcs ou en position intra-arc dans le cas de la province pyriteuse sud-ibérique, la plus importante du monde pour les amas sulfurés de type VMS (Leistel *et al.,* 1997). L'amas sulfuré de Neves Corvo à Cu-Zn-Pb-Sn contient 220 millions de tonnes de sulfures dont 700 000 tonnes d'étain métal (produit + réserves). La formation de cassitérite serait liée à la circulation de fluides magmatiques associés au volcanisme acide, voire à la présence de granite en profondeur (Serranti *et al.,* 2002). Ces fluides magmatiques focalisés par une structure en effondrement (caldeira volcanique) et mélangés à l'eau de mer auraient conduit à la formation de ce très gros amas ayant la particularité de contenir de l'étain. D'autres exemples d'amas sulfurés à étain sont connus comme par exemple Geco et Kidd Creek au Canada.

- **Gisements à cassitérite magmatique**

Granites à métaux rares et stocksheiders

Les granites à métaux rares sont des intrusions de granite très particulières, extrêmement riches en éléments incompatibles (Li, Cs, F, B, Be, Sn, Ta, Nb, etc.) par comparaison avec les granites crustaux communs (revue dans Černý *et al.,* 2005). La composition chimique de ces granites se rapproche des compositions des pegmatites minéralisées de type LCT (Lithium-Césium-Tantale). Ces intrusions de leucogranite (Figure 3, photo 5) sont de très petite dimension de l'ordre de 300 m à 1 000 m (voir par exemple le granite de Beauvoir, Allier, Figure 7), soit d'un volume généralement inférieur au km^3. Ces intrusions de granites à métaux rares sont extrêmement rares par comparaison avec les granites dits 'communs'. Ainsi on en compte seulement une dizaine dans la chaîne varisque européenne. Le magma résiduel enrichi en fluides et éléments incompatibles peut parfois s'accumuler en sommet de l'intrusion, notamment quand l'encaissant est un granite, et former un niveau de stocksheider minéralisé soulignant le toit du granite. On peut citer l'exemple du stockscheider à cassitérite au toit du granite de Montebras (Soumans, Creuse, Figure 3, photo 6).

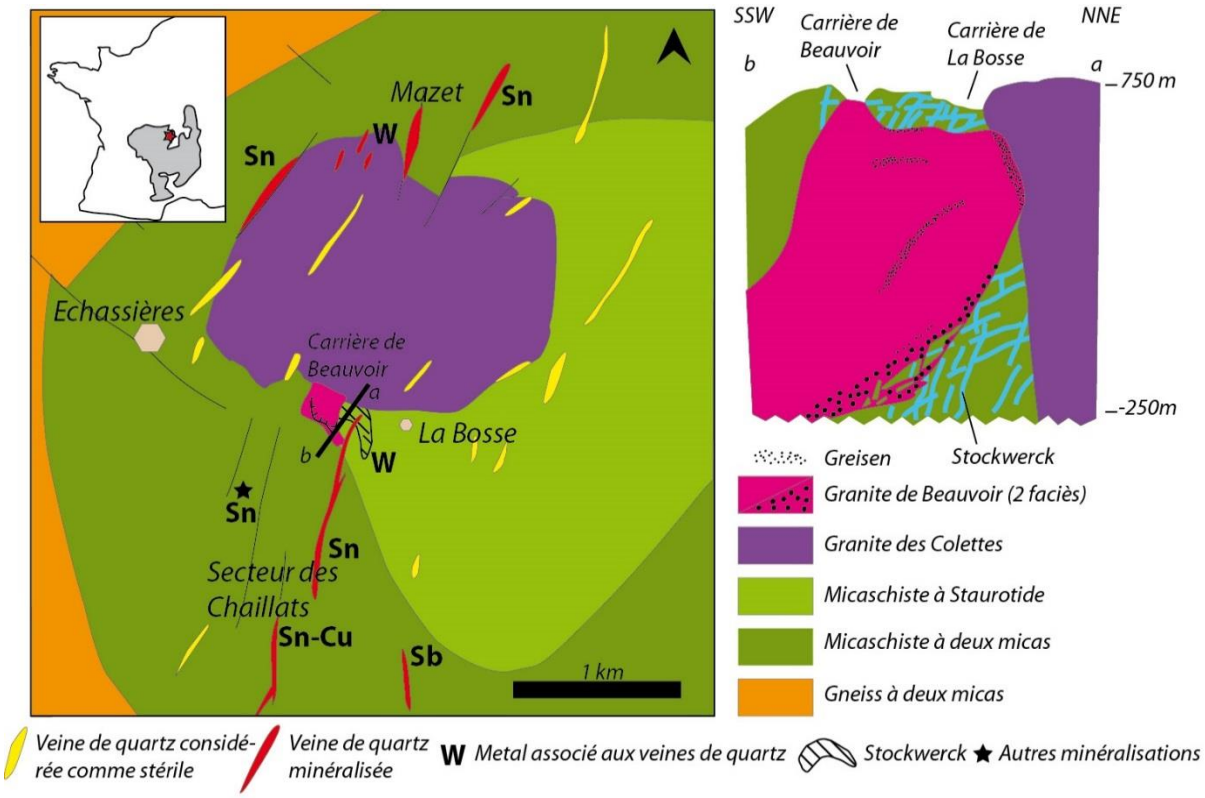


Figure 7 : Carte et coupe géologique du granite à métaux rares de Beauvoir, recoupant le stockwerk à tungstène d'Echassières, Allier. Modifié d'après Raimbault et al., *1995.*

Pegmatites

Les pegmatites sont issues de la cristallisation de magmas de composition particulière, plus riche en fluides et éléments incompatibles (Li, Cs, F, B, Be, Sn, Ta, Nb, etc.) que les magmas granitiques. Lors de la cristallisation du magma, des cristaux de taille pluri-centimétrique à métrique se forment et on observe fréquemment, dans les feldspaths potassiques, des intercroissances particulières de feldspath et quartz qui définissent la texture graphique, symptomatique des pegmatites. Les pegmatites cristallisent généralement sous la forme de corps ovoïdes, de dykes ou de sills. Ces corps ont une dimension de quelques centimètres à

plusieurs centaines de mètres[5] et ont la particularité de se distribuer en plusieurs individus voisins, formant des champs de pegmatites sur des surfaces de plusieurs centaines de m² à dizaines voire centaines de km². Au sein de ces champs de pegmatites, seuls quelques pourcents (< 10 %) sont des pegmatites minéralisées, principalement en étain, colombite-tantalite, lithium et béryl (Figure 3, photo 8). Ces pegmatites minéralisées appartiennent aux sous-classes « Muscovite-Rare element-Lithium » et « Rare element-Lithium » dans la classification des pegmatites LCT de Cerny & Ercit (2005). Elles contiennent entre autres des disséminations de cassitérite. Ces disséminations peuvent atteindre des teneurs économiques, mais il faut également que ces pegmatites soient suffisamment volumineuses et nombreuses pour constituer un gisement.

- **Gisements d'étain secondaires : les placers**

La cassitérite est un oxyde qui réagit seulement avec des acides ou des bases concentrées. Ce minéral n'est donc pas altéré dans la nature. Sa densité importante de 6,3 à 7,3, en fait un minéral lourd qui peut être concentré par des mouvements d'eaux (plage, pièges dans les cours d'eaux, etc.). Ainsi, l'altération chimique et mécanique de toutes les concentrations primaires de cassitérite peut conduire à la formation de placers économiques en mer ou en rivière (voir Figure 8).

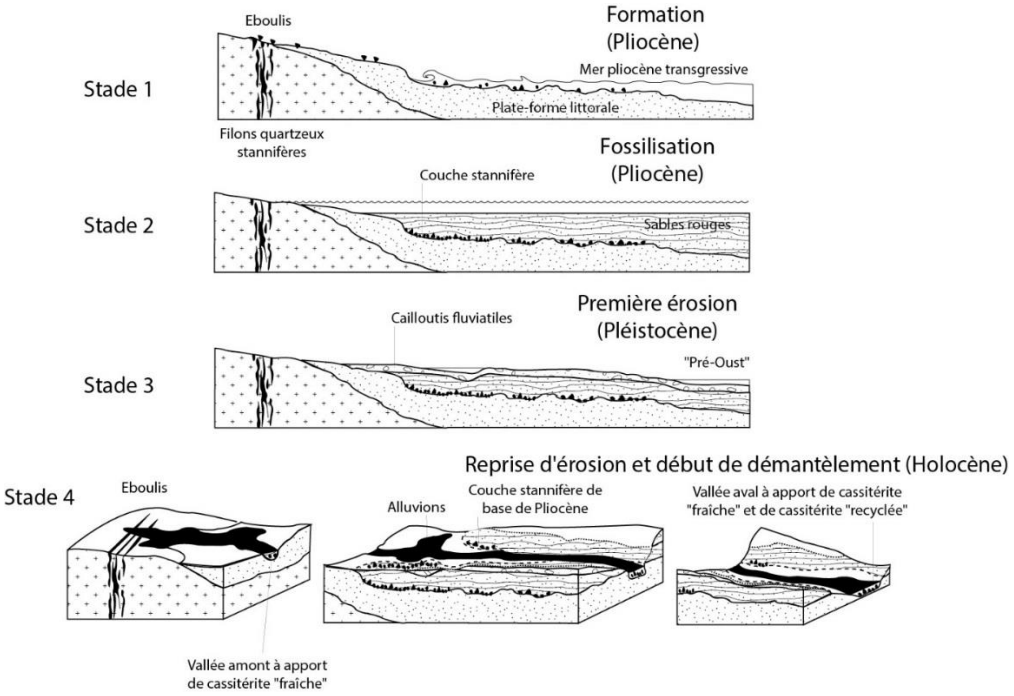


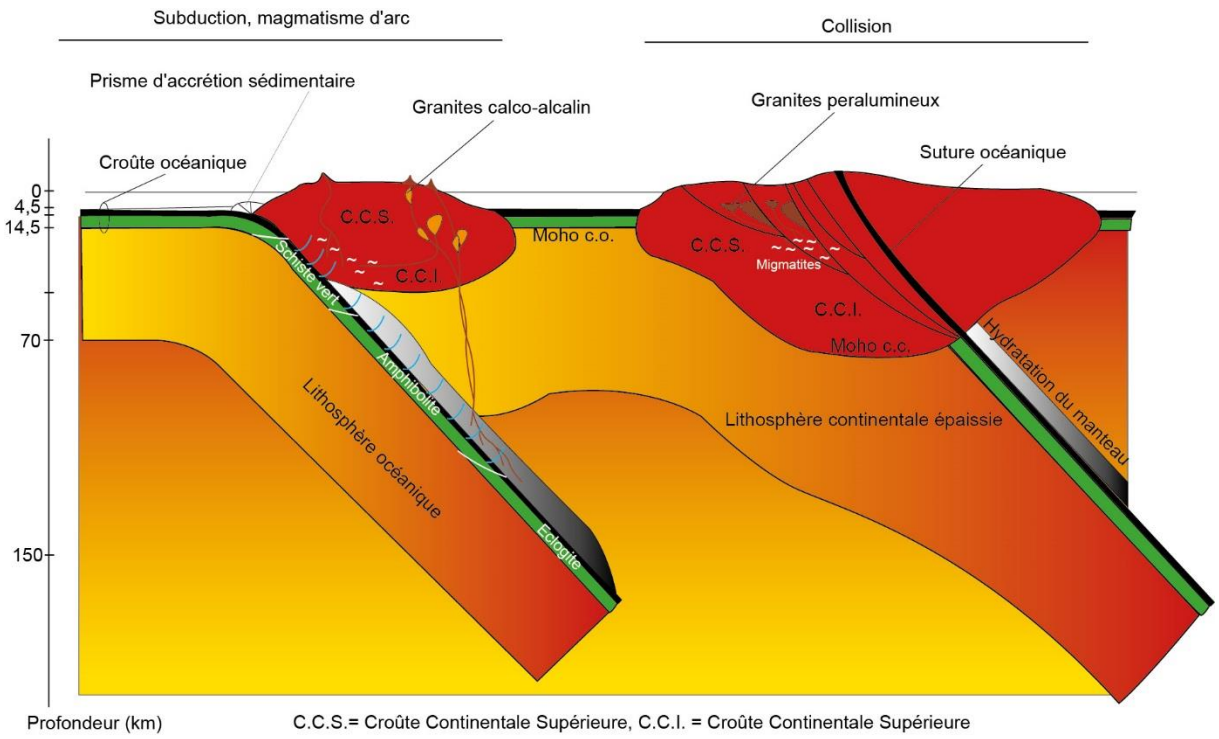
Figure 8 : Stades de formation du placer stannifère Pliocène de La Hye (Morbihan). Modifié d'après Chauris et Houlgatte (1988).

[5] Il existe des pegmatites géantes, de l'ordre du kilomètre, mais qui ne sont connues que dans les terrains archéens à paléoprotérozoïques.

1.3. CONTEXTE GÉODYNAMIQUE ET MÉTALLOTECTES

1.3.1. Contextes géodynamique des gisements d'étain

Il existe de plusieurs contextes géodynamiques dans lesquels des gisements d'étain sont observés. Le contexte emblématique est celui de la collision continentale, de type Varisque ou Himalayen (Figure 9). Ce type de collision induit d'importants phénomènes de fusion de la croûte continentale ce qui va produire la mise en place de nombreux granites crustaux et leurs minéralisations stannifères associées. Ainsi, dans ce contexte les minéralisations en étain sont extrêmement nombreuses et des divers types hydrothermaux ou magmatiques associés aux intrusions (cf. supra). En revanche, les gisements sont de relativement petit tonnage, rarement supérieurs à 10 000 t Sn métal. Dans les zones de subduction avec épaississement crustal (type Andin, Figure 9), les gisements d'étain sont plus rares mais ils peuvent être extrêmement importants (> 1 Mt métal) et sont portés par des porphyres à étain comme le Cerro Rico de Potosí (Bolivie). Toujours dans ce contexte de subduction, mais plus proche de la marge, les amas sulfurés volcanogéniques à étain associés au volcanisme acide en contexte d'arrière ou intra-arc sont rares mais contiennent un très gros tonnage d'étain (0,7 Mt Sn métal pour Neves Corvo). Des minéralisations en étain associées à des granites anorogéniques alcalins sont également connues dans des contextes de rifting continental (Figure 9). On peut citer l'exemple des Younger granites du Nigeria et leurs minéralisations (Robb, 2005).



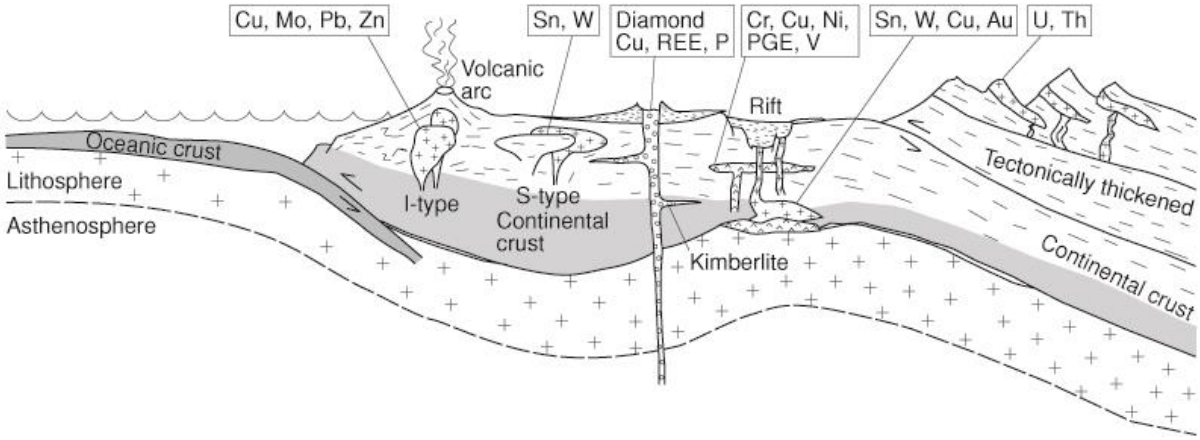


Figure 9 : Différents types de contextes géodynamiques dans lesquels des minéralisations à étain sont rencontrées. Page précédente d'après Gloaguen et Dain (2001) : contextes de subduction océan-continent avec croûte continentale épaissie et contexte de collision continentale ; ci-dessus : mêmes contextes que figure du haut avec en plus le contexte de rifting intra-continental avec magmatisme alcalin. D'après Robb (2005).

1.3.2. Métallotectes

De façon générale, les granites associés à des minéralisations à étain sont localisés à proximité (0 - 5 km) de zones de failles importantes qui ont probablement facilité leur ascension. Les granites localisés le long du cisaillement sud-armoricain sont en ce sens emblématiques. Les granites associés à ces minéralisations seraient donc à rechercher le long de ces structures faillées. L'importance du fractionnement subi par ces granites au cours de leur ascension, favorisant l'augmentation de la teneur en étain des magmas, tel que proposé par Tartèse et Boulvais (2010), pourrait également avoir un rôle important sur le nombre de gisements et leur importance. L'encaissant possède un rôle majeur pour piéger les fluides magmatiques. Il doit donc être peu perméable (par exemple : schistes de bas grade métamorphique ; granite antérieur) ou très réactif chimiquement vis-à-vis des fluides magmatiques acides (par exemple : carbonates, roches mafiques/ultramafiques, etc.). La déformation régionale lors de la mise en place du granite minéralisateur est également importante. Il semble qu'une faible déformation favorise plus la formation de structures perméables (filons, fentes) piégeant les fluides alors qu'une forte déformation pénétrative favoriserait plus la diffusion et l'évacuation des fluides minéralisés.

En résumé les principaux métallotectes proposés (Figure 10) sont :

- la proximité de zones de failles majeures et des failles mineures associées ;
- des roches encaissantes de bas grade métamorphique et à faible perméabilité (schistes, granites antérieurs non déformés) ou à forte réactivité chimique (carbonates), soit une mise en place relativement haute dans la croûte ;
- un contexte de faible taux de déformation lors de la mise en place de l'intrusif qui privilégie la formation de structures perméables (filons, fentes de tension) piégeant les fluides plutôt qu'une forte déformation (mylonitisation) qui conduit à la dispersion des fluides minéralisateurs.

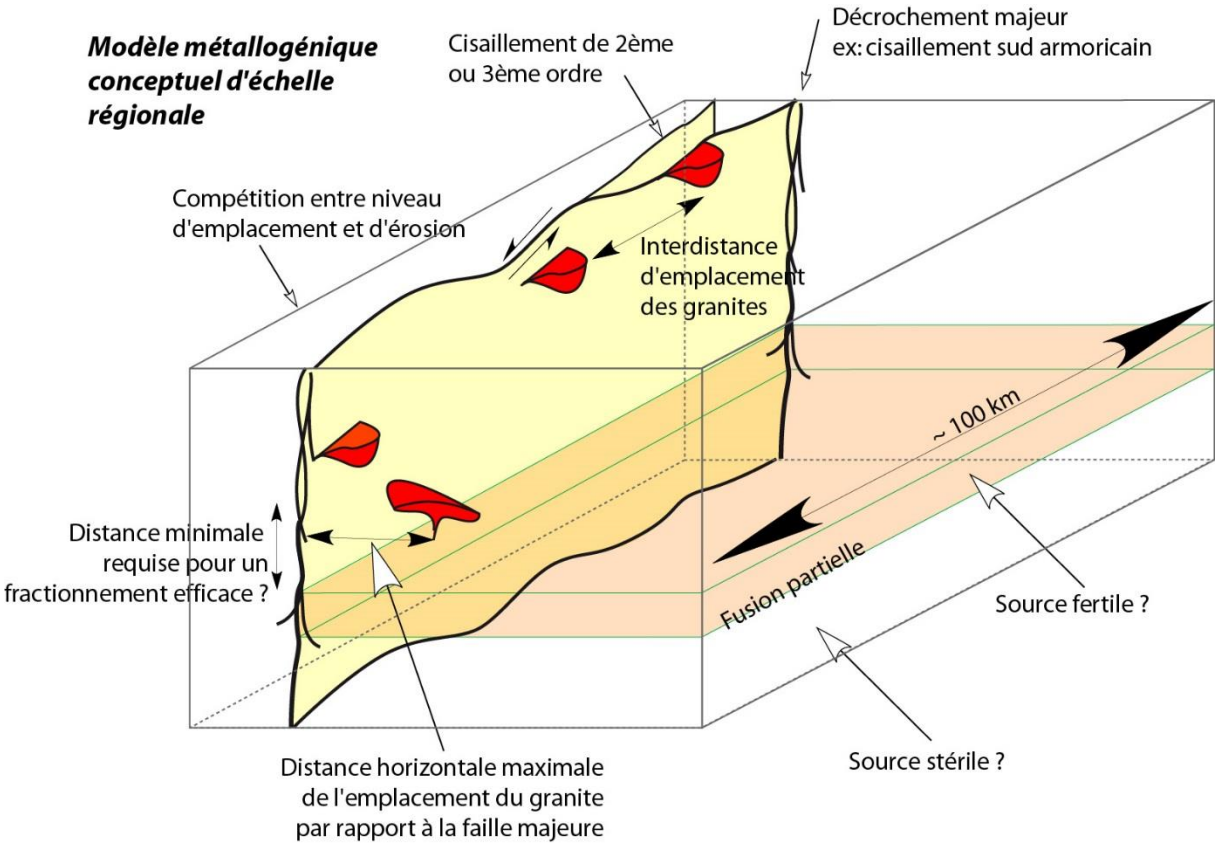


Figure 10 : Modèle métallogénique conceptuel d'échelle régionale pour les minéralisations à étain (tungstène). D'après Gloaguen (Inédit).

1.4. L'ÉTAIN DANS LE MASSIF ARMORICAIN

1.4.1. Distribution de l'étain

L'étain est largement distribué dans le Massif armoricain ainsi que le montre les résultats de la prospection alluvionnaire (Figure 11). On voit très nettement que les différentes unités qui constituent le Massif armoricain n'ont pas du tout le même contenu en étain, ce qui illustre les hétérogénéités crustales pour partie à l'origine de la distribution hétérogène des gisements à la surface de la terre. Ainsi, le domaine ou bloc du Léon au nord-ouest du massif apparaît le plus riche en étain alluvionnaire. À l'inverse le domaine nord-armoricain est très pauvre, à l'exception de sa bordure sud sur l'axe Fougères-Mayenne. Dans les autres domaines, l'étain montre une nette relation spatiale avec les intrusions granitiques affleurantes ou sub-affleurantes le long des grandes failles crustales.

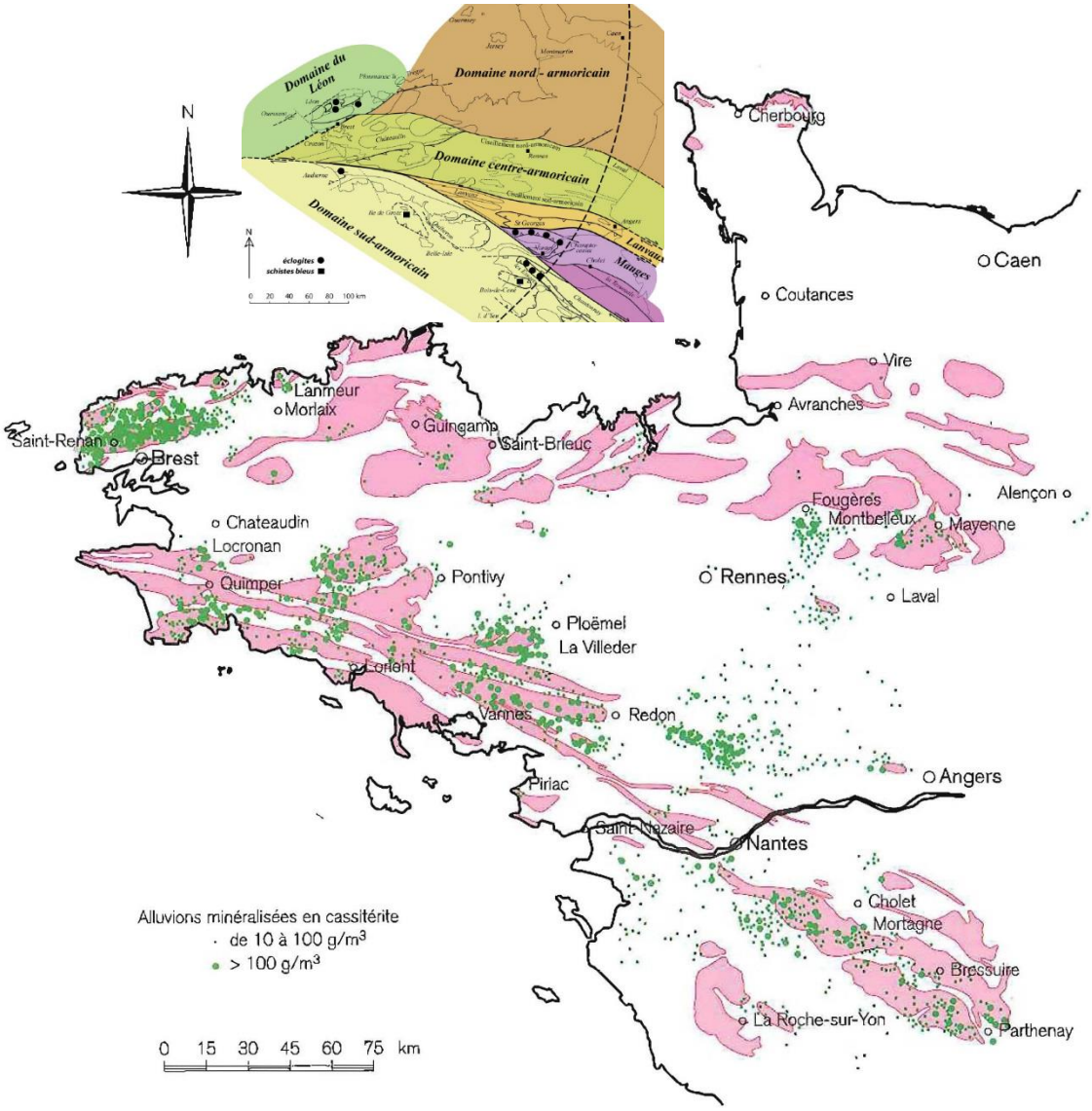


Figure 11 : Synthèse de la prospection alluvionnaire pour cassitérite dans le Massif armoricain (d'après Guigues et Devisme, 1969, modifié par Lulzac, 2012). Encart des différents domaines du Massif armoricain d'après Ballèvre et al., *2013.*

1.4.2. Âge des minéralisations à étain

À l'heure actuelle peu d'âges sont disponibles sur les minéralisations stannifères du Massif armoricain, les minéralisations n'ayant pas été datées directement, c'est en général le granite hôte qui a été daté :

- gisement de Piriac (veines qz-cst) associé au granite de Guérande : 309 ± 3 Ma U/Pb sur zircon et monazite (Ballouard *et al.,* 2015 ; 2017) ;
- gisement de La Villeder (veines qz-cst) associé au granite de Lizio : 316 ± 6 Ma U/Pb zircon et $^{40}Ar/^{39}Ar$ muscovite (Tartèse *et al.,* 2011a) ;
- indices de veines à cassitérite associées au granite de Questembert : 316 ± 3 Ma U/Pb zircon (Tartèse *et al.,* 2011b) ;
- granite à métaux rares de Tréguennec : 319 ± 6 Ma U/Pb sur colombo-tantalite (BRGM, inédit) ;

- gisement polymétallique de La Rousselière, associé au granite hypovolcanique de Mésanger : 319 ± 3 Ma U/Pb zircon (Ducassou *et al.,* 2011) ;
- porphyre de Beauvain : 299 ± 4 Ma U/Pb zircon (Callier, 1989).

Les minéralisations primaires sont donc principalement tardi-varisques, soit d'âge carbonifère supérieur (Pennsylvanien), c'est-à-dire calées entre 320 et 300 Ma à l'exception du Domaine nord-armoricain où elles sont d'âge cambrien (Montbelleux, Mathey, 2017).

1.4.3. Types de gisements d'étain dans le Massif armoricain

Dans le Massif armoricain, on connait actuellement 7 types de gisements d'étain (Chauris et Marcoux, 1994) :

1. Les filons, veines, stockwerks et greisens associés à des intrusions de granites, exemples : La Villeder, Montbelleux, Abbaretz.
2. Les granites à métaux rares, exemple : Tréguennec.
3. Les porphyres et intrusions subvolcaniques, exemples : La Rousselière, Lanmeur, (Beauvain), L'Echasserie.
4. Les pegmatites LCT, exemples : Saint-Sébastien, Baud, Le Guilvinec.
5. Les stockscheiders, exemples : Penfeuteun, Scaer.
6. Les pipes bréchiques, par exemple Kervenguy (essentiellement à tungstène).
7. Les placers, exemples : Saint-Renan, La Hye.

Les 3 premiers types de gisements primaires constituent les types économiques connus actuellement. Les skarns à cassitérite ne sont pas connus dans le Massif armoricain. Les placers sont très nombreux. Les plus importants sont localisés dans le Domaine du Léon (Saint-Renan), mais de nombreux placers de tonnages et teneurs variables existent dans les rivières et paleorivières du Massif armoricain (revue dans Lulzac, 2012).

1.4.4. Principaux districts, gisements et tonnages

Les principaux districts et gisements du Massif armoricain (Figure 12) sont les districts d'Abbaretz-Nozay (12 000 t), Montbelleux (4 825 t), Lanmeur (5 000 t) et Saint-Renan (5 000 t alluvionnaire exploitées) et le gisement de Tréguennec (5 400 t). Les autres districts possèdent soit des réserves marginales ou un potentiel encore à démontrer.

Figure 12 : Principaux districts et indices à étain du massif armoricain. Modifié d'après Gloaguen et Dain (2001).

Le budget métallogénique ou géologique total (« endowment » en anglais) étain métal (production passée cumulée + réserves mesurées + ressources indiquées) des principaux districts et gisements du Massif armoricain s'élève à 34 080 t Sn, soit plus de 55 % du tonnage métropolitain qui s'élève à 61 366 t Sn (Tableau 1).

Identifiant	Nom	Longitude	Latitude	Substance principale	Etain métal	Type gisement	Tonnage Sn métal	Classe
FRA-00003	Beauvoir	2.953114	46.181308	Ta	Sn	Granite à métaux rares	22000	C
FRA-00328	**Tréguennec**	**-4.34848**	**47.8752**	**Li**	**Sn**	**Granite à métaux rares**	**5400**	**C**
FRA-00060	Montebras	2.29888	46.3222	Feld	Sn	Granite à métaux rares	1300	C
FRA-00078	**Abbaretz - Nozay district**	**-1.5436**	**47.5564**	**Sn**	**Sn**	**Veines, greisens, stockwerks de coupoles**	**11900**	**C**
FRA-00273	**Lanmeur**	**-3.76802**	**48.6617**	**Sn**	**Sn**	**Veines, greisens, stockwerks de coupoles**	**5000**	**C**
FRA-00034	**Montbelleux - Luitré (district)**	**-1.17083**	**48.2899**	**W**	**Sn**	**Veines, greisens, stockwerks de coupoles**	**4825**	**C**
FRA-01349	La Bosse (Echassières)	2.96527778	46.1797222	W	Sn	Veines, greisens, stockwerks de coupoles	2000	C
FRA-00259	La Capoulade	3.05301	43.5923	Sn	Sn	Veines, greisens, stockwerks de coupoles	1000	C
FRA-00180	**La Villeder**	**-2.477**	**47.871**	**Sn**	**Sn**	**Veines, greisens, stockwerks de coupoles**	**860**	**D**
FRA-00867	Périssac	0.686711	46.0384	W	Sn	Veines, greisens, stockwerks de coupoles	280.5	D
FRA-00363	**Le Bé**	**-1.57522**	**47.5526**	**Sn**	**Sn**	**Veines, greisens, stockwerks de coupoles**	**100**	**D**
FRA-00869	Jouhé (Vaulry)	1.06264	46.0415	Sn	Sn	Veines, greisens, stockwerks de coupoles	62	E
FRA-00853	Vaulry - Cieux	1.0863	46.0238	Sn	Sn	Veines, greisens, stockwerks de coupoles	50	E
FRA-00354	**Piriac 1**	**-2.55259**	**47.3713**	**Sn**	**Sn**	**Veines, greisens, stockwerks de coupoles**	**5**	**E**
FRA-00868	Monsac	1.03634	46.0061	Sn	Sn	Veines, greisens, stockwerks de coupoles	0.4	E
FRA-00033	**Saint Renan (district)**	**-4.6253**	**48.4389**	**Sn**	**Sn**	**Placer**	**5000**	**C**
FRA-00014	Charrier	3.76541	45.9884	Cu	Sn	Placer	593	D
FRA-00420	**Bourg Blanc**	**-4.5081**	**48.4949**	**Sn**	**Sn**	**Placer**	**500**	**D**
FRA-00426	**Lanmeur-Plougasnou**	**-3.77387**	**48.665**	**Sn**	**Sn**	**Placer**	**460**	**D**
FRA-00355	**Piriac 2**	**-2.49068**	**47.4055**	**Sn**	**Sn**	**Placer**	**15**	**E**
FRA-00356	**Piriac 3**	**-2.52526**	**47.3626**	**Sn**	**Sn**	**Placer**	**15**	**E**
						Total	**61365.9**	

Tableau 1 : Production totale + réserves mesurées + ressources indiquées en étain métal des gisements de France métropolitaine (Source : BD ProMine 12/2017). Les gisements du Massif armoricain sont en gras.

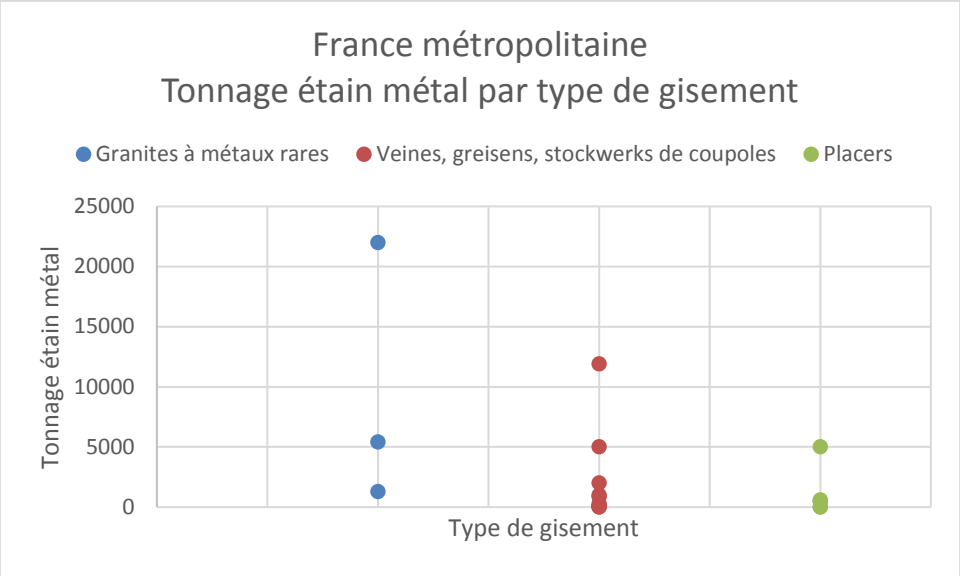


Figure 13 : Répartition du tonnage d'étain par type de gisement en France métropolitaine.

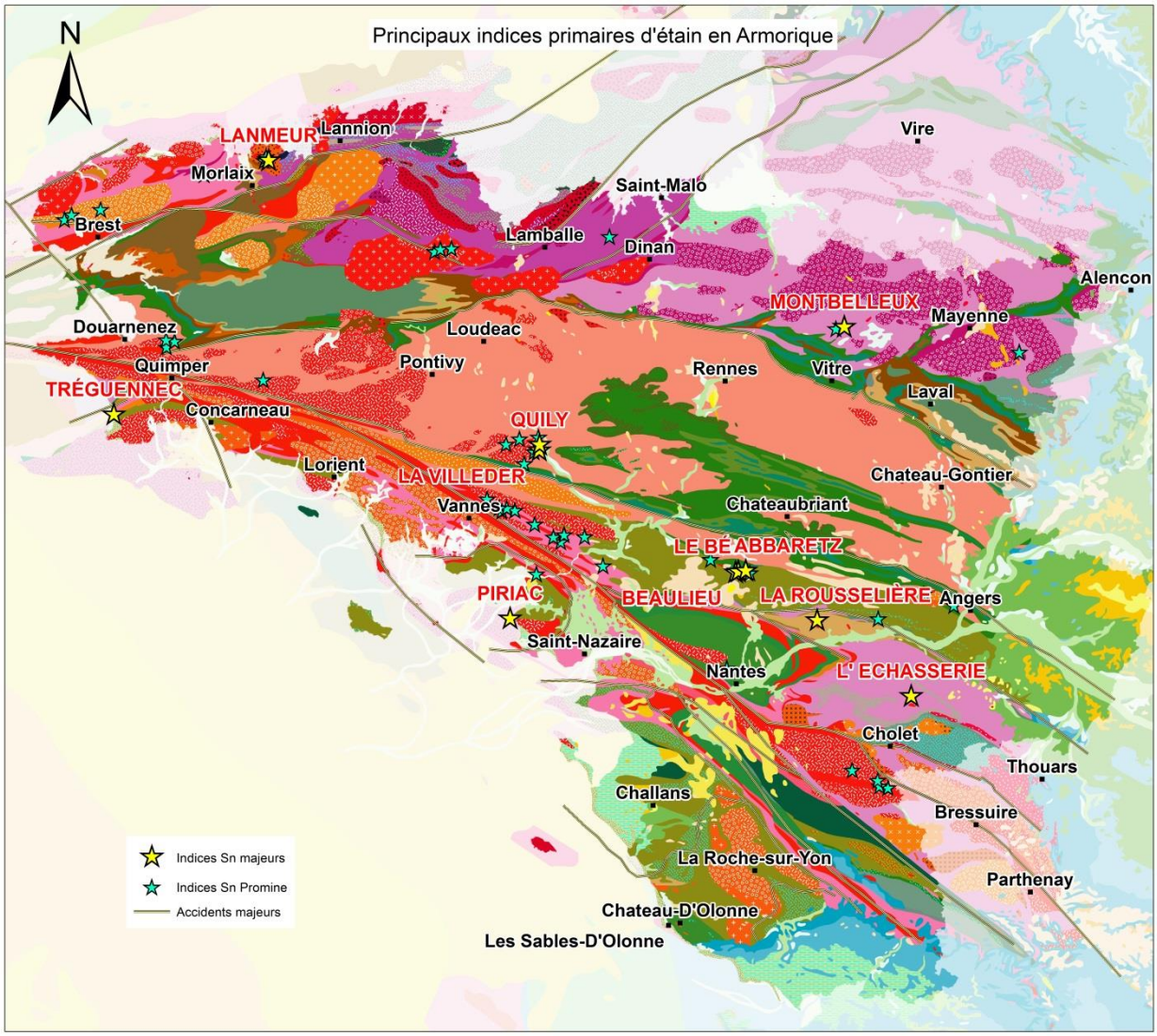


Figure 14 : Principaux types de gisements étudiés pour la prédictivité étain (source des données : base ProMine, Cassard et al*., 2015), géologie issue de la carte géolgique de la France au 1/1 000 000.*

1.4.5. Les districts à ressources identifiées

- **Montbelleux, Sn-W**

Les premières mentions de minéralisation à Montbelleux datent de 1846. En 1903, l'indice était redécouvert ainsi que d'autres dans des localités voisines et une concession était accordée en mai 1905. En 1905 commencent ainsi les premiers travaux avec les aménagements des étages -27, -62 et -97 m, et ce jusqu' en 1918. De 1942 à 1944, la mine est exploitée par les allemands. En 1954 reprend l'exploitation du gisement dans les schistes, jusque 1958. Le BRGM mène plusieurs campagnes d'exploration et de travaux de 1957 à 1987. Enfin, de 1978 à 1983, des essais d'exploitation dans le granite et les schistes ont lieu. La mine ferme en 1983 suite à l'effondrement des prix du tungstène.

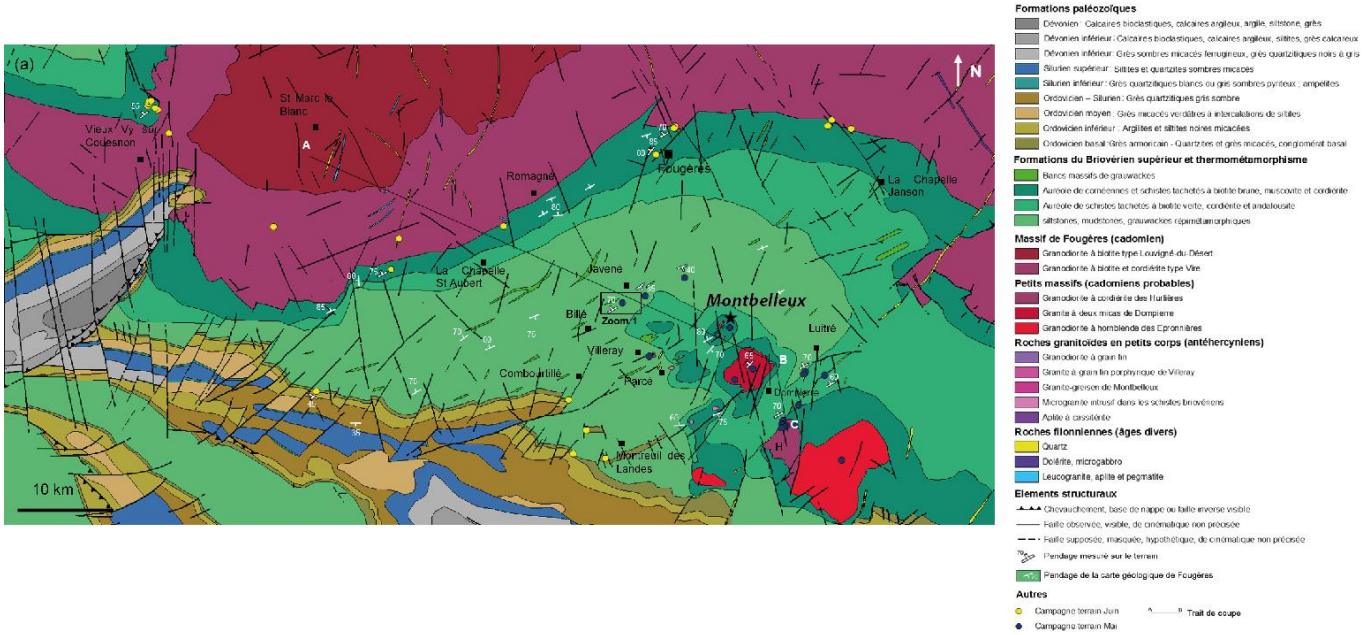


Figure 15 : Cadre géologique du district de Montbelleux. Modifié d'après Mathey (2017).

Le gisement de Montbelleux, localisé au sud du pluton cadomien de Fougères (Figure 15) est associé à une lame de granite NE-SW de puissance décamétrique intrudant les schistes du néoprotérozoïque (Briovérien) affectés par un métamorphisme de contact (schistes tachetés). On observe une greisenisation dans la partie supérieure. Le contact avec les schistes est marqué par un petit stocksheider et une intense silicification (Chauris *et al.,* 1989). La minéralisation se présente sous deux morphologies : i) un faisceau de filons encaissé dans les schistes, à quartz, topaze, fluorine, muscovite et sulfures ; ii) un greisen à quartz, topaze, cassitérite, wolframite, molybdenite, pyrite, blende et chalcopyrite.

L'exploitation a successivement suivi ces deux morphologies (Figure 16) : i) l'ancienne exploitation a reconnu sur 120 m de largeur, un faisceau de filons de quartz réguliers et subparallèles à l'encaissant. Cinq filons, de puissances variables et atteignant 0,70 m, ont été exploités sur un allongement maximal de 470 m et jusqu'à 130 m de profondeur. La cassitérite y est très rare et on y trouve principalement wolframite, topaze, apatite aux épontes, et des sulfures (arsénopyrite, pyrite, sphalérite, chalcopyrite, molybdénite et fluorine) ; ii) la nouvelle exploitation a reconnu une minéralisation intragranitique (disséminée, stockwerk, petits filonnets) dans une lame intrusive par travaux souterrains (- 130 m) et sondages (- 350 m). Cette intrusion affleure sur 20 x 200 m en surface mais s'épaissit jusqu'à 40 m et s'étend beaucoup en profondeur. L'intrusion albitique contient des veines et des greisens à cassitérite, wolframite, topaze, molybdénite, sphalérite, chalcopyrite et fluorite.

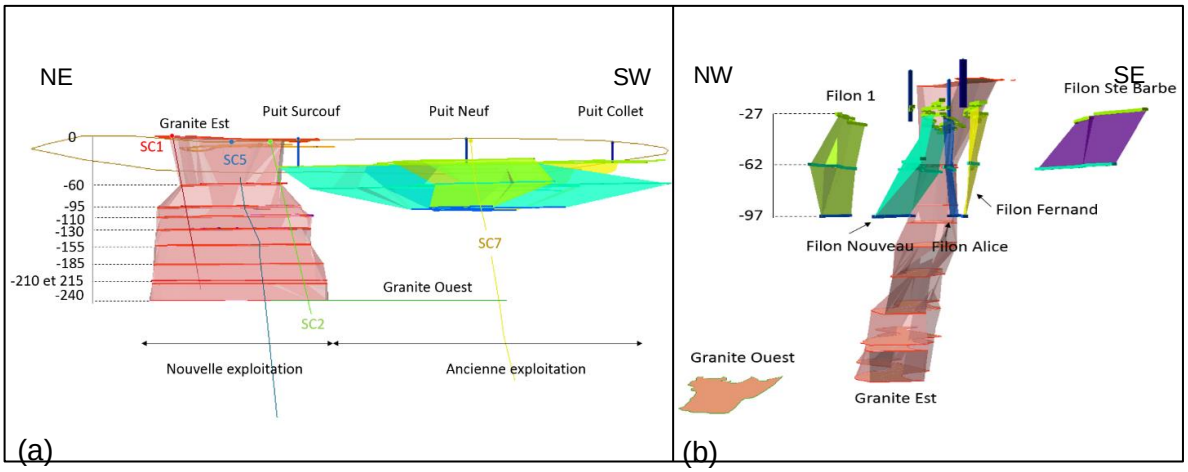


Figure 16 : (a) Coupe 3D NE/SW et (b) NW/SE du gisement de Montbelleux (Gassot, 2017). SC : sondage carotté.

L'intrusion de granite de Montbelleux a été datée à 538 ± 6 Ma en U/Pb sur zircon et la minéralisation à 524 ± 13 Ma en U/Pb sur apatite hydrothermale (Mathey, 2017).

La production effective du gîte de Montbelleux est assez faible. D'après Chauris *et al.* (1989), on compte environ 300 tonnes de concentrés marchands de wolframite extraits entre 1907 et 1957 à 65 % WO_3, et 60 tonnes d'étain et wolframite extraits de 1907 à 1983.

Le potentiel de la mine reste cependant intéressant, s'élevant à environ 2.8 Mt de minerai à plus de 0,4 % Sn + WO_3 (rapport Sn/WO_3 d'environ 0,75), soit un potentiel de 12 000 t de métal.

- **Lanmeur, Sn-Cu**

Les minéralisations à étain-cuivre de Lanmeur sont associées à un champ de filons quartzeux NE-SW d'environ 1 x 2 km, encaissé dans le massif granitique varisque de Lanmeur (Figure 17). 27 filons ont été localisés, de longueur le plus souvent plurihectométrique et de puissance en moyenne de l'ordre du mètre.

Leur découverte a eu pour origine la prospection alluvionnaire et éluvionnaire entreprise par le BRGM en 1965, ayant abouti dès 1967 à l'identification d'un flat à cassitérite et des premiers indices filoniens. De 1965 à 1975, les réserves alluvionnaires furent évaluées, aboutissant à une exploitation partielle en 1973 (production de 200 t de cassitérite par la Compagnie Minière de Saint-Renan, COMIREN) et à une première estimation du potentiel de trois filons principaux : Guersaliou, Kerprigent et Pont Guen (1 600 t Sn et 1 800 t Cu à 0,5 % Sn et 0,54 % Cu).

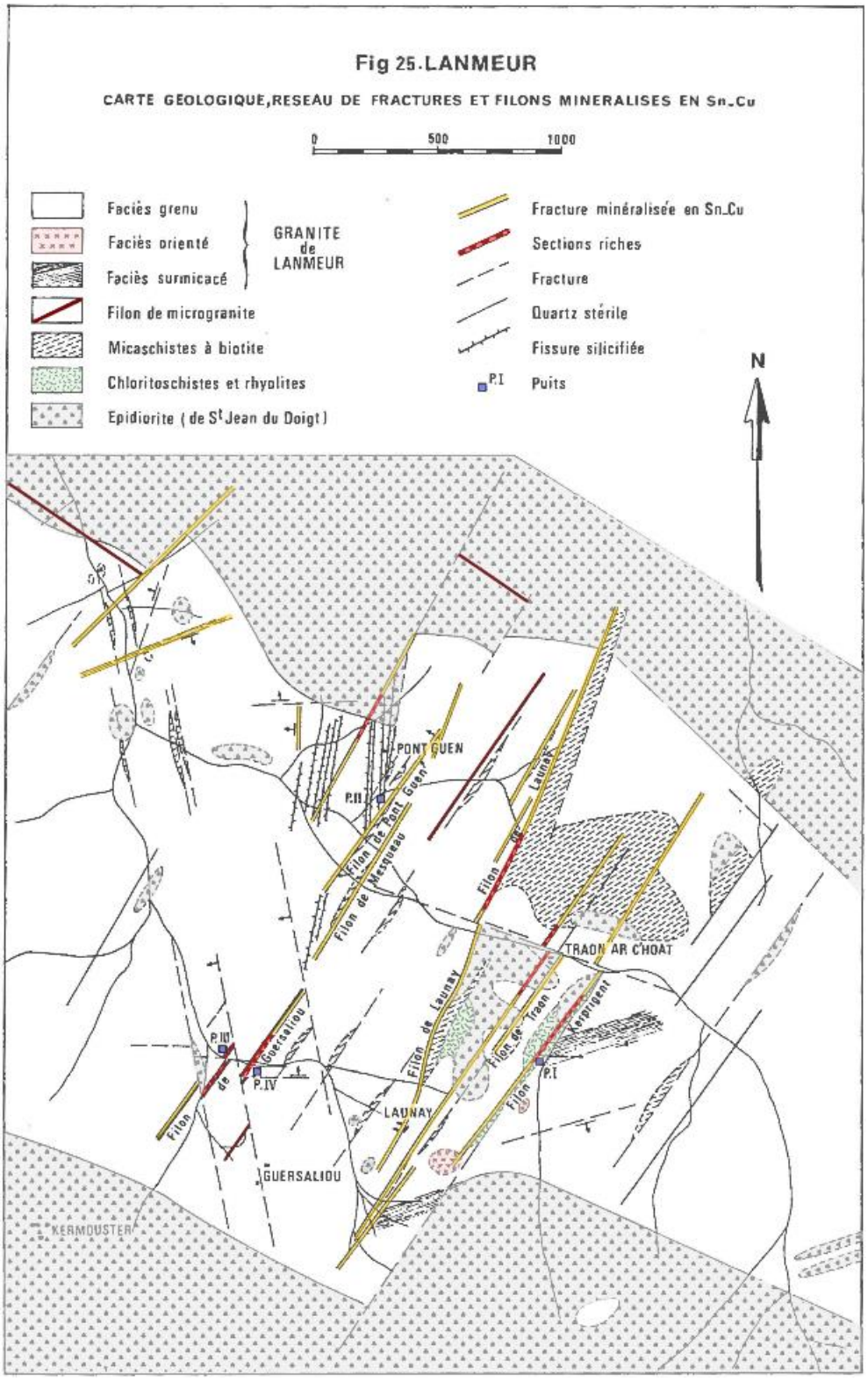


Figure 17 : Carte géologique, réseau de fractures et filons minéralisés en Sn-Cu sur le secteur de Lanmeur (modifié d'après BRGM,1982).

L'étude de ce sujet fut reprise dans le cadre de l'Inventaire, de 1979 à 1985, avec comme objectif une nouvelle estimation du tonnage possible des filons, après géochimie, géophysique et sondages percutants. Ces travaux permirent de délimiter une quinzaine de structures filoniennes nouvelles. La paragenèse comportant cassitérite et sulfures (arsénopyrite, chalcopyrite, stannite, pyrite, sphalérite) dans une gangue de quartz et tourmaline est tout à fait comparable à celle des filons cupro-stannifères de Cornouaille anglaise.

Une première approche des réserves contenues s'est appuyée sur les résultats des travaux miniers (trois filons reconnus), des sondages carottés, tranchées et sondages percutants (quatre filons sondés), extrapolés à une vingtaine de filons ayant donné des réponses comparables : on en a déduit que le champ filonien de Lanmeur correspondait à un potentiel métal de 5 à 6 000 t Sn et 8 à 9 000 t Cu dans la tranche des 100 premiers mètres, ouvert et encore inexploré plus en profondeur (Lulzac, 1986).

- **Nozay-Abbaretz, Sn**

Le district de Nozay-Abbaretz (Loire-Atlantique) s'inscrit dans la continuité orientale du district stannifère de Questembert. Les nombreux indices à étain de ce district (Questembert, Limerzel, Bobertho, Saint-Dolay, Nozay et Abbaretz) sont en lien avec le leucogranite à caractère alcalin dominant de Questembert et ses apophyses (Saint-Olay, Nozay), daté du Carbonifère inférieur à 316 ± 10 Ma. Il est synchrone de la mise en place des autres leucogranites hercyniens et du Cisaillement Sud-Armoricain (Vidal, 1980).

Il s'agit d'un étroit faisceau filonien d'environ 1 km de large s'étendant sur plus de 20 km d'allongement sur une direction ESE-ONO, de part et d'autre des pointements granitiques de Nozay. Ces filons de quartz à muscovite et cassitérite, parallèles aux directions des grands accidents armoricains, sont encaissés dans les Schistes d'Abbaretz (Ordovicien supérieur), tourmalinisés et altérés aux épontes des filons, et également parfois dans les grès d'Abbaretz (Ordovicien supérieur). Les filons sont de puissance variable, du mètre à la dizaine de mètres, avec un pendage de 35-45° vers le sud. Ils sont de formes irrégulières, lenticulaires et boudinées. La principale zone minéralisée est située à l'est du granite, entre Nozay et Abbaretz (BRGM, 1982 ; Figure 18).

Le district de Nozay-Abbaretz regroupe plusieurs gîtes et prospects : le Bois-Vert, la Chênaie, le Bé, Beaulieu et la Villefoucré, sur lesquels de nombreux travaux de recherches et d'exploitations se sont succédés dès l'époque antique, puis plus récemment de 1882 à 1973 (BRGM, 1982 ; Lulzac, 2012) :

- travaux antiques (Âge du Bronze, époque gallo-romaine) ;
- 1911 à 1957 : Travaux de la SNMO (Société Nantaise des Minerais de l'Ouest) : exploitation à ciel ouvert du gisement du Bois-Vert ;
- 1966 à 1975 : Travaux du « Syndicat Abbaretz » BRGM/COMIREN (Compagnie Minière de Saint-Renan) ;
- depuis le 2 juin 2015, la société Variscan Mines est détentrice d'un permis d'exploration et de recherches de mines dit « Permis de Beaulieu » sur le secteur de Nozay-Abbaretz.

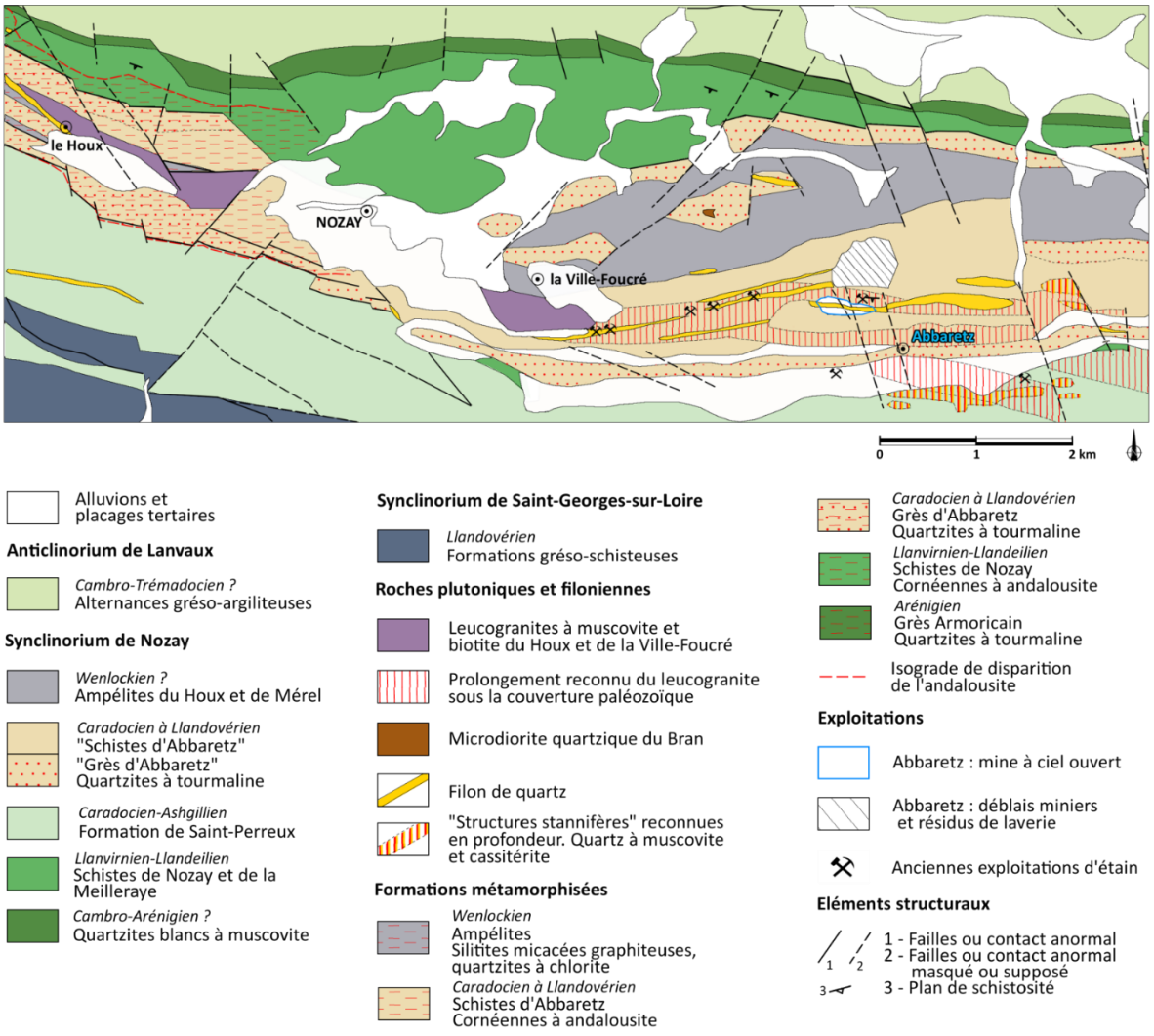


Figure 18 : Carte géologique du secteur de Nozay-Abbaretz au 1/50 000 (Gatinel, 2011, modifié d'après Trautmann et al., *1987).*

Le gîte du **Bois Vert**, sur la commune de Nozay, est composé de plusieurs filons à quartz blanc laiteux fétides, tourmaline et cassitérite contenus dans une enveloppe d'environ 800 m de long et 100 m de large, plongeant vers le sud. La présence en profondeur du granite de Nozay a été mise en évidence par les levés géophysiques. Après une exploitation gallo-romaine superficielle, les premiers travaux d'exploration modernes ont débuté en 1912. Entre 1952 et 1957, la SNMO a extrait dans une mine à ciel ouvert 4 000 t de SnO_2 à 65-70 % Sn, soit 2 700 t d'étain métal. Les travaux d'exploration du Bois Vert, entrepris par le « Syndicat Abbaretz » BRGM/COMIREN entre 1966 et 1975, ont mis en évidence environ 973 t SnO_2 de ressources contenues dans la tranche entre 0 et 40 m (BRGM, 1982).

Le gîte du **Bé**, situé à l'ouest du Bois-Vert sur la commune de Nozay, est formé d'un faisceau de 5 filons grossièrement parallèles, encaissé dans les schistes d'Abbaretz dans une structure anticlinale. Les filons à quartz, cassitérite, tourmaline et rare molybdénite sont très probablement associés à une intrusion granitique en lame, comme l'attestent les filons leucogranitiques kaolinisés recoupés en galerie. Le gisement a été exploité à l'époque gallo-romaine, puis par la SNMO en souterrain entre 1914 et 1921 qui a produit 120 t de SnO_2. Les réserves n'ont pas été estimées (BRGM, 1982).

Les travaux d'exploration menés par la SNMO puis par le syndicat BRGM/COMIREN ont mis en évidences d'autres gîtes, dont les plus importants sont Beaulieu, la Chênaie, la Villefoucré et la Ribaudais. Les ressources en étain du disctrict de Nozay-Abbaretz s'établissent entre 6 100 et 15 100 t SnO_2.

- **Tréguennec, Sn-Ta-Li**

La carrière de Prat-ar-Hastel était utilisée pour des matériaux de construction. Les travaux menés par le BRGM de 1983 à 1985 ont consisté en la recherche de zones alluviales et éluviales enrichies en cassitérite détritique, la localisation des gîtes primaires par sondages tarière, résistivité VLF et prospection marteau puis en tranchées et sondages carottés sur les formations les plus favorables. Les prospections ont amené à la découverte rapide du dyke de Tréguennec et d'autres dykes le long du flanc nord du granite de Plonéour-Lanvern mais cependant moins minéralisés (Figure 19).

Le granite à métaux rares mylonitisé de Tréguennec (Finistère), d'environ 50 m de puissance, est intrusif dans des micaschistes. D'autres intrusions similaires mais cependant moins minéralisées sont connues dans une vaste zone de cisaillement sénestre le long du flanc nord du granite de Plonéour-Lanvern. Au sein de la carrière de Prat-ar-Hastel, le dyke de Tréguennec plonge vers le NNW avec un pendage moyen de 50° (Figure 20). Ce granite a été daté à 319 ± 6 Ma en U/Pb sur colombo-tantalite (BRGM, non publié).

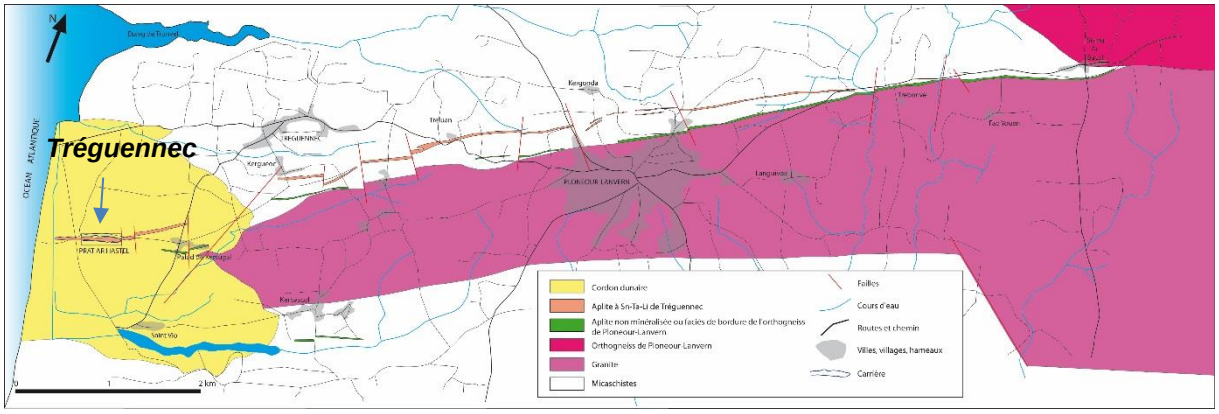


Figure 19 : Carte géologique de la région de Plonéour-Lanvern avec localisation du dyke de granite de Tréguennec et des autres dykes similaires. Modifié d'après Lulzac et Apolinarski, 1986.

Le dyke de Tréguennec (Prat-ar-Hastel) contient une riche minéralisation diffuse en cassitérite, colombo-tantalite, lépidolite et amblygonite ; c'est sur cette intrusion qu'ont porté les évaluations préliminaires des ressources. Le potentiel économique d'un panneau kilométrique est de l'ordre de 5 400 t Sn à 639 g/t ; 1 600 t Ta à 190 g/t ; 1 300 t Nb à 155 g/t ; 66 000 t Li_2O à 0,78% et 2 400 t Be à 284 g/t contenus dans 8,5 Mt de minerai (Lulzac et Apolinarski, 1986). Les minéralisations de Tréguennec présentent de grandes similitudes avec celles d'Echassières (03). **Ces deux gîtes de gros volume à basse teneur constituent actuellement la quasi-totalité des ressources françaises en étain, lithium, tantale et béryllium.**

Le panneau contient par ailleurs 8 Mt de feldspaths valorisables. La mise en exploitation d'un tel gisement est subordonnée à la valorisation et à l'utilisation du feldspath contenu, dont les qualités sont conformes aux standards utilisés dans l'industrie de la céramique.

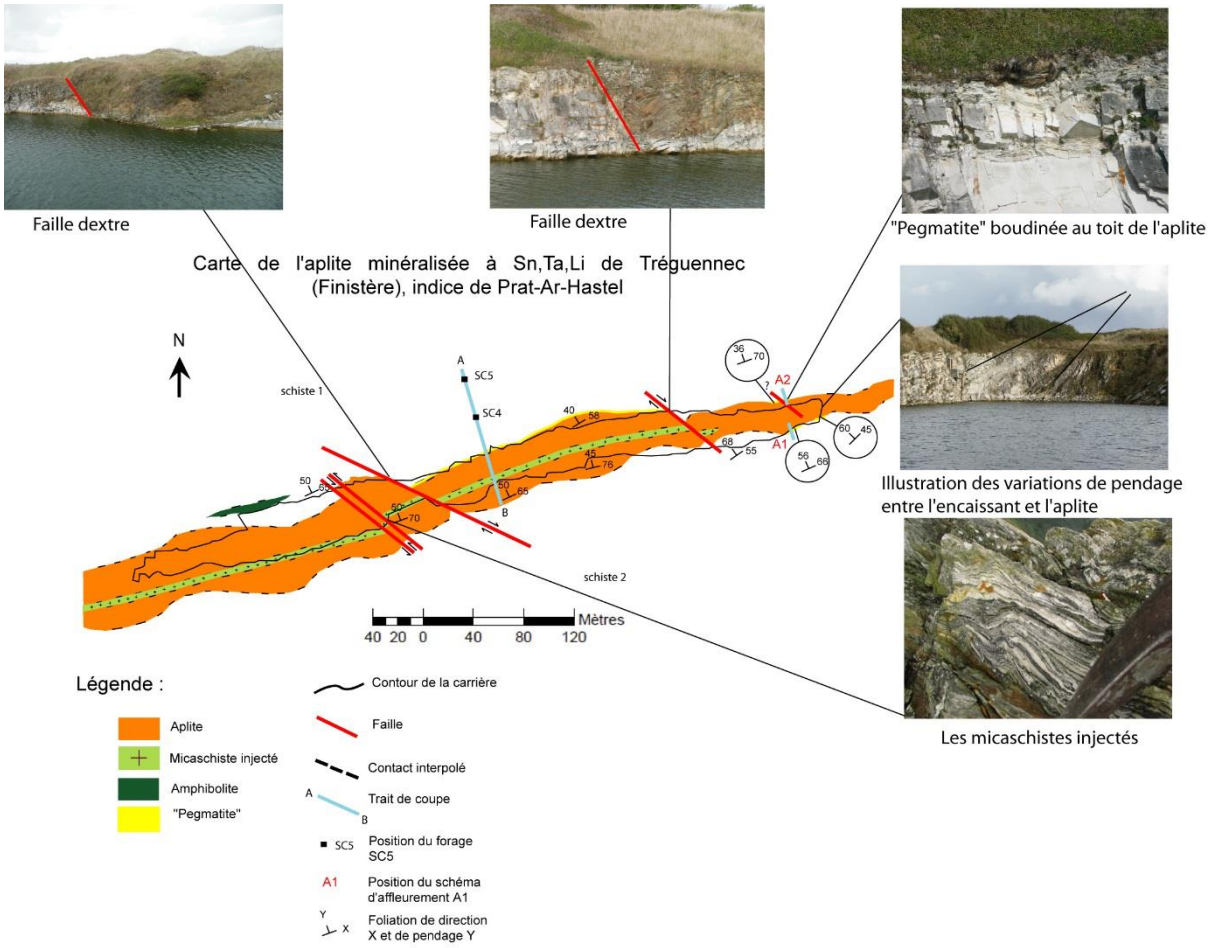


Figure 20 : Carte géologique du dyke de granite à métaux rares de Tréguennec (Picault, 2010).

1.4.6. Autres districts et indices

- **L'Échasserie - Gîte filonien polymétallique à W, Sn, Sb, Mo, Bi**

La découverte de ces minéralisations fut l'aboutissement d'un programme de recherche réalisé dans le cadre de l'Inventaire. La prospection géochimique stratégique mit d'abord en évidence des anomalies As en contexte granitique (1977-1978) ; s'ensuivirent un programme de géochimie tactique sous recouvrement identifiant plusieurs anomalies Sn-W et polymétalliques (W, Mo, Sn, Bi, Cu, Li), puis des forages percutants (147 sondages) et carottés (3 sondages) axés vers la reconnaissance des anomalies à Sn-W.

Les minéralisations, à tungstène dominant, sont associés à la coupole leucogranitique différenciée et hydrothermalisée (couronne de greisens à tourmaline) varisque de l'Echasserie, intrusive dans les métasédiments briovériens des Mauges. Elles sont contrôlées par des faisceaux filoniens de quartz subverticaux intragranitiques, orientés NW-SE, de puissance centimétrique à métrique. Les minerais d'intérêt économique (scheelite et wolframite) sont disséminés ou regroupés en nids associés à des sulfures dans le quartz. Les concentrations de scheelite sont fréquentes dans les épontes granitiques greisenisées.

Les minéralisations à caractère plus polymétallique comportent également en petites quantités cassitérite, arsénopyrite, pyrite, stibine, galène, sphalérite, molybdénite, löllingite, stannite, bournonite, bismuth natif ; des traces de fluorine, autunite et cinabre ont été reconnues localement. D'autres anomalies et indices, soit à Sn-W, soit polymétalliques dont l'étude ne fut qu'abordée laissaient espérer sur ce secteur l'existence de nouvelles structures minéralisées,

en liaison avec des coupoles cachées ou subaffleurantes. Compte tenu des dimensions des objectifs (allongement kilométrique, aval pendage reconnu sur une centaine de mètres) et des teneurs encourageantes (plusieurs passes métriques avec WO3 > 0,4 %), le prospect fut présenté à la profession minière en 1983, et un PER attribué au BRGM (Allon et Brosset, 1983)

- **La Rousselière - Gîte polymétallique d'affinité porphyrique**

Ce prospect est situé à mi-chemin entre Nantes et Angers. Les minéralisations polymétalliques (Allon et Le Fur, 1979) sont associées au complexe granitique et microgranitique de Mésanger, daté à 319 ± 3 Ma (Ducassou *et al.,* 2011) intrusif dans le Culm frasno-dinantien essentiellement détritique à grauwackes, pélites, grès et conglomérats du bassin d'Ancenis. La découverte de ce prospect eut pour point de départ la prospection géochimique stratégique multiéléments, réalisée par le BRGM en 1976, dans le cadre des travaux de l'Inventaire : une anomalie Pb de faible teneur, associée à de fortes valeurs en As, ceinturait le massif granitique de Mésanger. Les travaux réalisés sur cette anomalie ont comporté successivement : géochimie tactique, prospection marteau, géophysique PS, sondages percutants et un seul sondage carotté de reconnaissance. La géochime stratégique a mis en évidence des anomalies As, Pb, Cu, Bi, W, Mo et Sn. La prospection marteau a amené la découverte dans des volantes de quartz ou de granite de nombreux indices de molybdénite, scheelite associés à de la pyrite, arsénopyrite et bismuthinite. Les 7 profils wagon-drill, implantés sur les principales anomalies, recoupèrent des granites et microgranites minéralisés (bismuthinite, cassitérite, cuivre gris, chalcopyrite, galène, sphalérite) et de nombreuses cibles riches en Mo, W, Pb, Zn, Ag. Le sondage carotté, implanté au centre du prospect fut arrêté à 200 m après avoir traversé sur toute sa hauteur des minéralisations polymétallliques à Mo, W, Bi, Pb, Zn, Cu, Ag et Sn, présentes sous forme disséminée, de stockwerks quartzeux ou de filons liés aux plans de cisaillement. Les passages à valeur sub-économique étaient espacés et de faible puissance : 4 m à 510 g/t Mo, 4 m à 415 g/t Mo et 4 m à 370 g/t Mo. Compte tenu des dimensions du prospect et du bon niveau des résultats en Mo et W, la recherche de cibles riches affleurantes ou cachées méritait d'être poursuivie sur l'ensemble du secteur. Le BRGM obtint l'attribution d'un PER, après présentation du prospect aux opérateurs miniers en 1979.

1.5. PRINCIPAUX ÉLÉMENTS EN VUE DE L'ÉTUDE DE FAVORABILITÉ

À partir de la synthèse exposée aux points précédents, il apparaît clairement que le type de gisement d'étain le plus représenté dans le Massif armoricain est le type veines et/ou filons localisés en bordure d'une intrusion granitique au sein de schistes non ou faiblement métamorphiques. En effet, ce type de gisement correspond au gîtes de Quily, la Villeder, Abbaretz, Piriac et l'Échasserie pour les gisements d'âge Varisque et Montbelleux pour les gisements d'âge Cambrien.

Si on met en parallèle ce type de gisement avec la géologie du Massif armoricain, il est clair qu'il existe de très très grandes surfaces de sédiments peu ou non métamorphiques dans l'environnement de failles majeures, par exemple le long de la branche nord du Cisaillement Sud Armoricain (Quimper à Angers). Les méthodes de prédictivité peuvent ainsi permettre de cibler ce type de gisement au sein de la très grande surface d'encaissants sédimentaires d'âge Néoprotérozoïque à Paléozoïque de différents grades métamorphiques présente dans le Massif armoricain.

Les gisements similaires mais de sub-surface, c'est-à-dire subvolcaniques sont également à rechercher. On recherche ici des gisements de type La Rousselière où des intrusions de granite se mettent en place à proximité immédiate de la surface. Le type Lanmeur correspond également à cette configuration avec une mise en place en partie dans des roches mafiques, ce qui est probablement[6] à l'origine de la présence importante du cuivre associé à l'étain. Il faut néanmoins noter que ces deux gîtes sont liés à deux volcanismes distincts spatialement et temporellement, dans deux domaines géodynamiques différents (nord vs sud, <300 Ma pour le premier, daté à 319 Ma pour le second).

On a vu précédemment que les granites à métaux rares étaient peu nombreux, mais ils présentent l'intérêt de former des gisements à basse teneur - fort tonnage, soit un tonnage métal important (voir Figure 13). L'unique représentant connu est le gîte de Tréguennec mais le Massif armoricain est suffisamment grand pour en héberger d'autres à l'instar de l'alignement d'intrusion à métaux rares du nord du Massif central (Richemont - Chèdeville - Montebras – Beauvoir). En l'absence de réels guides métallogéniques à ce jour pour trouver ces intrusions très particulières, les techniques de favorabilités apparaissent comme les méthodes les plus pertinentes.

[6] Le cuivre pourrait être remobilisé à partir des roches mafiques encaissantes par les fluides hydrothermaux associés à la mise en place de l'intrusion.

2. Études de favorabilité à partir des formations géologiques

2.1. CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

Dans sa structure actuelle, le Massif armoricain est le résultat d'un minimum de deux épisodes de collision continentale : les orogenèses cadomienne au Néoprotérozoïque et varisque au Paléozoïque. À la fin du Paléozoïque, l'extension de la croûte continentale épaissie conjuguée à l'érosion conduisent à la disparition des reliefs de cette ancienne chaîne de montagne. Durant tout le Mésozoïque, le Massif armoricain est probablement ennoyé sous les eaux qui conduisent au remplissage des Bassins parisien et aquitain. La mince couverture sédimentaire mésozoïque sera érodée à partir du début du Cénozoïque (effet de la compression alpine) et ont lieu alors d'importantes altérations supergènes du socle, suivies d'épisodes d'érosion. Cette histoire conduit à la structure actuelle du massif.

Les grandes zones de failles coulissantes d'échelle crustale (décrochements) et les différences d'âge des roches ont conduit les géologues à diviser le Massif armoricain en six domaines principaux (Figure 21), du nord au sud : nord-armoricain, du Léon, centre-armoricain, de Lanvaux, des Mauges et sud-armoricain.

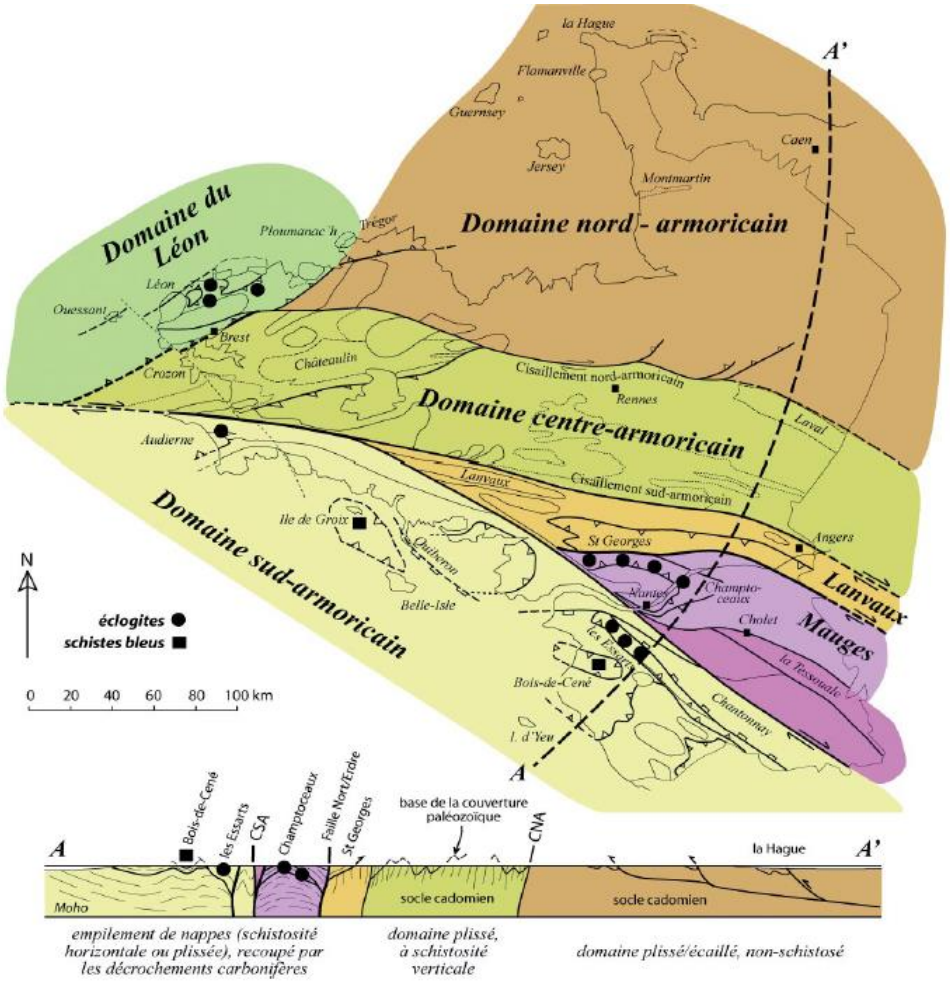


Figure 21 : Carte et coupe des principaux domaines géologique du Massif armoricain (Ballèvre et al., *2013).*

2.2. CARTE GÉOLOGIQUE SYNTHÉTISÉE

Sur le Massif armoricain, il existe une carte géologique de synthèse au 1/250 000 élaborée dans les années 1990 par le BRGM. Toutefois, dans cette carte, de nombreux objets de petite taille (comme les filons par exemple) ont été enlevés et les contours ont été partiellement simplifiés. Comme les gîtes à antimoine que l'on recherche sont des objets assez petits (quelques hectares) il est apparu qu'il fallait élaborer une carte adaptée au besoin de l'étude à partir des cartes au 1/50 000 (Figure 22). Cela permet d'avoir une bonne précision des contours et de conserver les petits objets. En revanche, pour avoir une bonne lisibilité de la carte à l'échelle du massif et permettre des comparaisons à l'échelle de la province, il a été procédé à un recodage litho-stratigraphique basé sur l'information contenue dans les cartes au 1/50 000.

La clé de ce codage consiste à accoler un code stratigraphique sous forme numérique (Tableau 2) à un code lithologique (Tableau 3) sous forme d'une chaîne de caractères (facilement interprétable). Dans la mesure du possible, le codage lithologique a été simplifié (un seul code GRAN pour les granites par exemple) afin de faciliter les regroupements et limiter le nombre de codes.

Clé de lecture des codes stratigraphiques :

Âge stratigraphique	Intervalle de datation	Code
Carbonifère	359-299 Ma	7
Devonien	416-359 Ma	6
Silurien	443-416 Ma	5
Ordovicien	488-443 Ma	4
Cambrien	542-488 Ma	3
Néoprotérozoïque	100-542 Ma	2
Paléoprotérozoïque	2 500-1 600 Ma	1

Tableau 2 : Liste des codes stratigraphiques.

Clé de lecture des codes lithologiques :

Roches magmatiques	Filons	Roches métamorphiques
ALBT: Albitites DIOR : Diorites DOLE : Dolérites GABB : Gabbros GDIO : Granodiorites GRAN : Granite MCGR : Microgranites MZGR: Monzogranites UBAS: Ultra basites	FAPLI : Filon d'aplites FBAR: Filon de Barytine FDACI : Filon de dacite FDOLE : Filon de dolérite FMCGR : Filon de microgranite FMDIO : Filon de microdiorite FMSYE : Filon de microsyénite FQTZ : Filon de quartz	AMPH : Amphibolites GNEI: Gneiss KORN : Cornéennes LEPT: Leptynites MCSH : Micaschistes MIGM: Migmatites ORTG: Orthogneiss SCSH: Schistes
Formations diverses du socle	Formations sédimentaires et quaternaires	

ANDE : Andésites ANOR : Anorthosites CFER : CALC : Calcaires GRES : Grès GRWK : Greywackes VACI: Volcanites acides VBAS: Volcanites basiques VDET: Volcano-détritique VOLC: Volcanites	ALLU : Alluvions COLL : Colluvions CRET : Formations crétacées EOC : Formations éocènes JUR : Formations jurassiques MIOC: formations miocènes OLIG: Formations oligocènes QUAT : Formations quaternaires X : Formations anthropiques HYDRO : Lacs, rivières	

Tableau 3 : Liste des codes lithologiques.

GRAN4 se traduit ainsi en granite d'âge ordovicien, CALC6 en calcaires du Dévonien, etc. Pour les formations post-hercyniennes non pertinentes pour la recherche d'antimoine, le codage devient purement stratigraphique; OLIG pour les formations oligocènes, quelles que soient leurs lithologies.

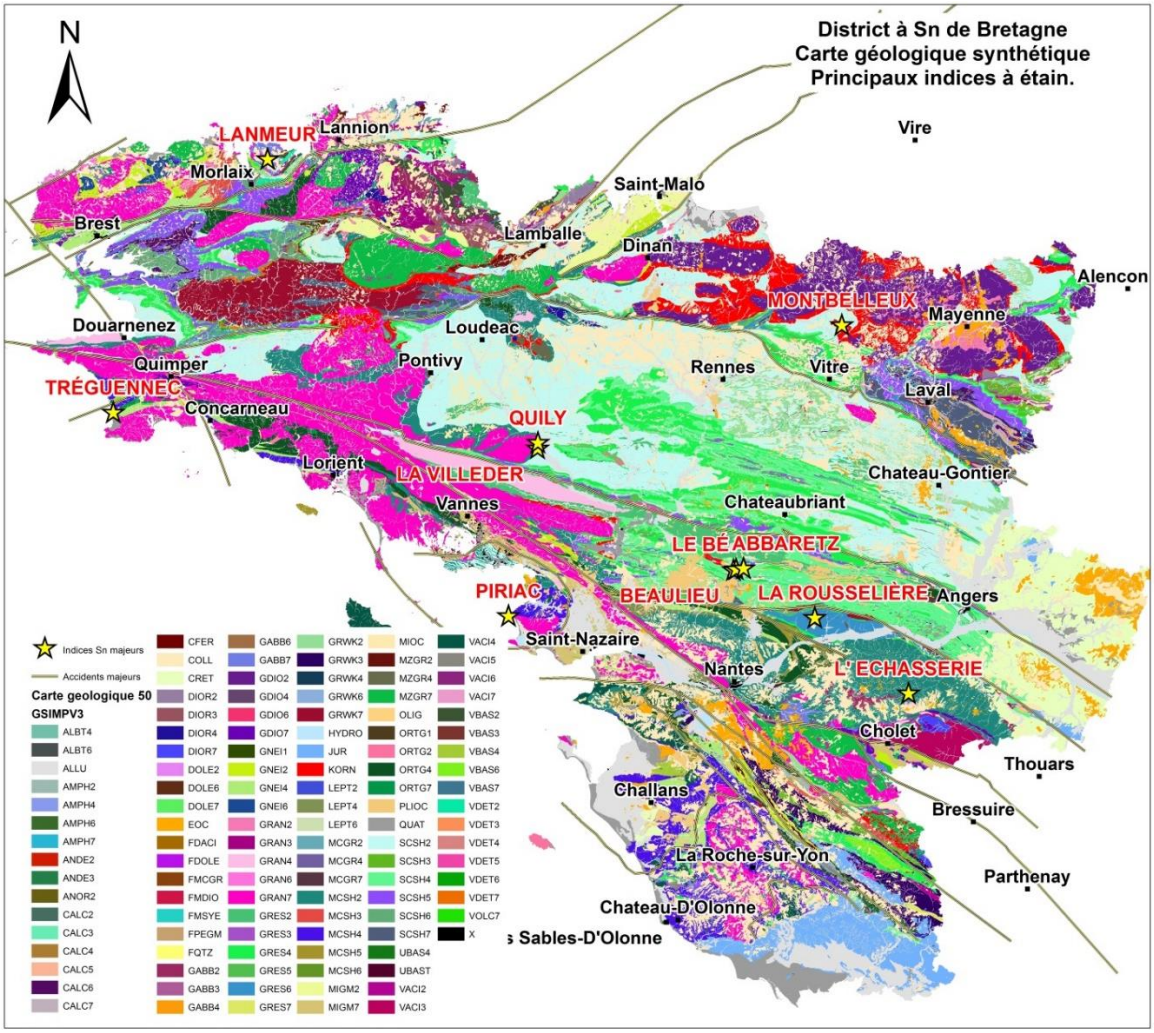


Figure 22 : Carte géologique synthétisée de Bretagne à partir des cartes harmonisées au 1/50 000 et localisation des principaux indices et gisements à étain.

La dernière étape consite à utiliser la fonction « Dissolve » d'ArcGis pour unir les polygones jointifs présentant le même code litho-stratigraphique. On passe ainsi de 101 545 polygones unitaires à 78 275 pour l'ensemble de la zone d'étude.

2.3. WOE (WEIGHT OF EVIDENCE)

2.3.1. Principe

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 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 qui peut s'écrire de la manière suivante :

WoE = % indices / % surface formation X

Lorsque ce calcul est étendu 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, 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 la 'clustérisation' des indices : 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.

Comme cette méthode suppose d'avoir le nombre d'échantillons le plus important possible, les 108 gîtes et indices répertoriés dans la province de Bretagne ont été utilisés pour faire les calculs.

2.3.2. Résultats

Le Tableau 4 montre les résultats obtenus par la méthode WoE appliquée aux indices d'étain sur la Bretagne.

GSIMPV3	Nb_Indices	PC_Indices	Pc-Surfaces	Ratio	Score
FPEGM	3	1.91	0.02	121.12	4
VACI7	1	0.64	0.05	11.84	4
ORTG7	1	0.64	0.09	6.82	4
UBAST	1	0.64	0.11	6.03	1
GRAN7	84	53.50	9.83	5.44	3
FQTZ	1	0.64	0.13	5.05	3
GNEI2	3	1.91	0.75	2.54	2
MCSH3	1	0.64	0.28	2.31	2
MCSH2	16	10.19	4.57	2.23	2
SCSH3	1	0.64	0.34	1.87	1
HYDRO	1	0.64	0.34	1.86	0
MCSH4	5	3.18	1.83	1.74	1
KORN	6	3.82	2.32	1.65	1
ORTG4	4	2.55	1.57	1.63	1
SCSH4	8	5.10	4.46	1.14	1
MZGR7	3	1.91	2.15	0.89	-1
GRES4	5	3.18	3.80	0.84	-1
GRES6	1	0.64	0.82	0.78	-1
GDIO2	3	1.91	3.15	0.61	-1
GRES2	1	0.64	1.32	0.48	-1
PLIOC	1	0.64	1.54	0.41	0
QUAT	1	0.64	1.75	0.36	0
SCSH5	1	0.64	1.92	0.33	-1
EOC	1	0.64	1.93	0.33	0
SCSH2	3	1.91	10.25	0.19	-1
COLL	1	0.64	13.24	0.05	0

Tableau 4 : Résultats obtenus par la méthode WoE appliquée aux indices d'étain du Massif armoricain - en rouge, les formations les plus pertinentes.

Les formations qui ressortent le mieux sont les granites carbonifères (associés à 84 indices d'étain) et d'autres formations d'origine granitiques (volcanites acides, orthogneiss et filons de microgranite) elles aussi carbonifères. Les autres formations associées correspondent à des roches encaissantes ou à des artéfacts possibles (mauvais positionnement d'un indice) comme c'est le cas pour l'indice localisé dans les roches ultrabasiques (code UBAST) dont le score est fixé à 1 malgré un ratio élevé ou ceux superposés à des formations tertiaires ou quaternaires (PLIOC, EOC, QUAT, COLL - qui ont été affectés d'un score de 0).

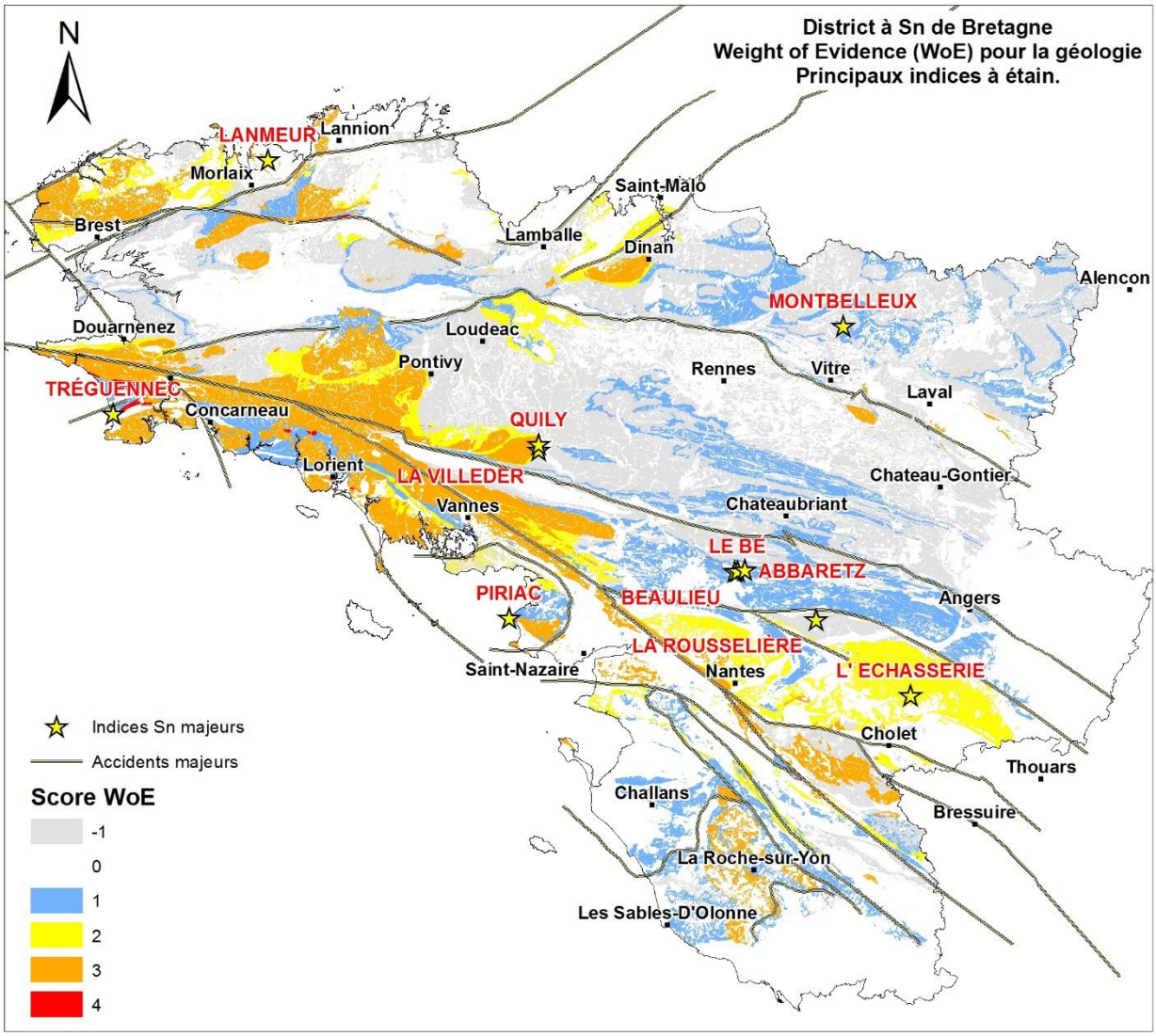


Figure 23 : Résultats du WoE pour Sn dans le massif armoricain.

Le report cartographique (Figure 23) montre bien la prépondérance surfacique des granites carbonifères localisés à proximité des grands accidents cisaillants qui découpent le Massif armoricain, le cisaillement nord-armoricain dans sa partie ouest entre Brest et Dinan et le cisaillement sud-armoricain sur toute sa longueur, de Quimper jusqu'à Nantes avec quelques occurrences en Vendée. La partie centrale et nord-est de la Bretagne apparaît comme peu favorable malgré la présence de gîtes reconnus (Montbelleux et Abbaretz).

2.4. CBA (CELL-BASED ASSOCIATION)

La CBA est une méthode de favorabilité qui a été développée au BRGM (Tourlière *et al*., 2015) pour pallier certains défauts du WoE comme sa non prise en compte des environnements complexes, sa sensibilité au positionnement des points et à la qualité des contours.

2.4.1. CBA par CAH

- **Principes**

La méthode CBA consiste à découper la zone d'étude par une grille régulière de cellules dans lesquelles on va coder par 1 ou 0 la présence ou l'absence de chaque formation de la zone d'étude. La taille des cellules doit être déterminée de telle façon que la majorité des cellules contienne au moins 2 formations différentes. Le fait d'avoir plusieurs formations par cellule constitue une association. Pour la méthode, seules sont prises en compte la présence et l'absence ; la surface n'intervient pas car cette variable est soumise à des « artéfacts » cartographiques (formation partiellement recouverte par des colluvions par exemple) et elle n'est au mieux représentative que de l'intersection entre un objet géologique 3D et la surface topographique actuelle. Pour cette étude, la taille des cellules a été fixée à 2 500 m de côté.

À partir de cette grille de cellules, des familles d'associations vont être générées qui pourront être cartographiées et on sélectionnera comme favorables les cellules de la même famille que celles contenant un gisement de référence. Dans le cadre de cette étude, 250 familles d'association ont été calculées par CAH (Classification Ascendante Hiérarchique). Pour obtenir la signature la plus pertinente, ne seront utilisés comme étalon que les gisements les plus représentatifs (16 gîtes) et les formations non fertiles comme les alluvions, les colluvions ou les formations tertiaires ou mésozoïques seront éliminées du traitement.

- **Résultat et interprétation**

835 cellules appartiennent à un groupe superposé à un gîte de référence - figure 24.

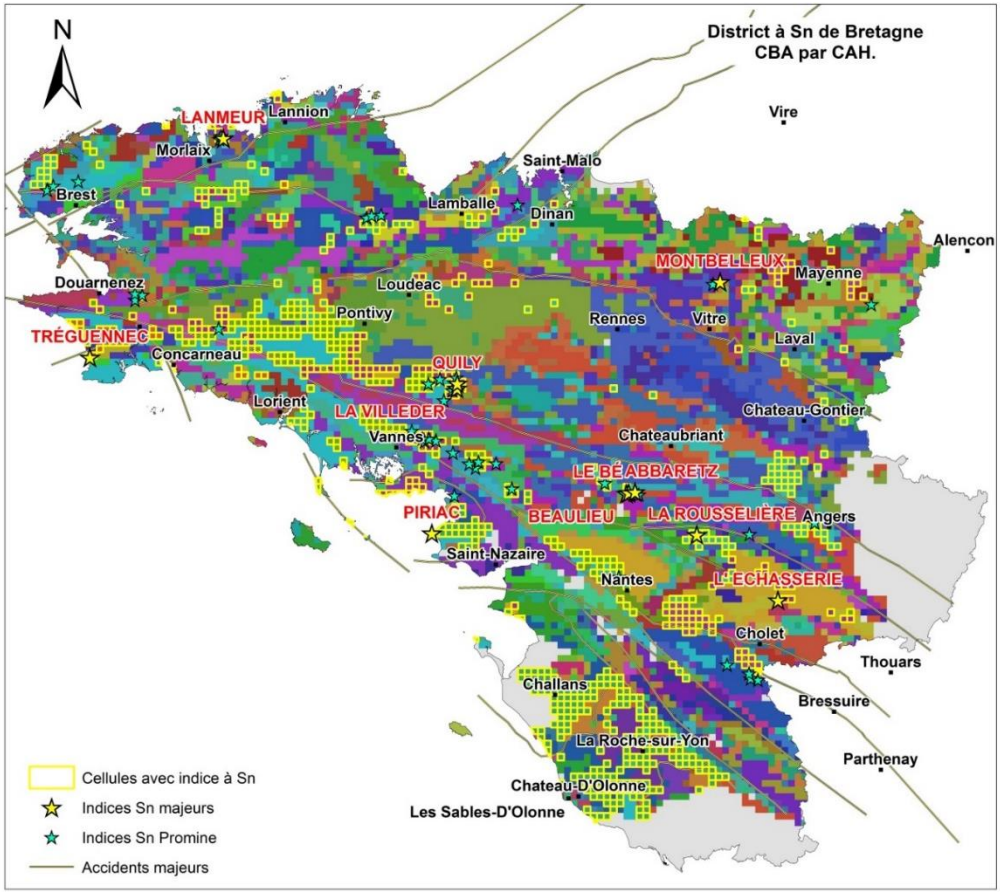


Figure 24 : Cellules appartenant à un groupe de CAH correspondant à un gîte à Sn.

CAH250	Nb. de cellules	Gîte de référence	Association de code	Interprétation
4	58	Lanmeur	GABB7, **GRAN7, MZGR7**	Intrusifs carbonifères dans un environnement de roches mafiques
20	93	La Rousselière	FMCGR, (SCSH2, GRES4, **GRAN7**)	Microgranites associés à intrusif carbonifère.
59	184	Quily	MCSH2, **GRAN7**	Intrusifs carbonifères dans des sédiments métamorphiques néoprotérozoïque.
61	126	La Villeder	SCSH2, MCSH2, **GRAN7**, (FQTZ)	Intrusifs carbonifères dans des sédiments néoprotérozoïque non à peu métamorphiques.
73	242	Piriac	MCSH4, (**GRAN7,** GRES4)	Intrusifs carbonifères dans des sédiments métamorphiques ordovicien
98	87	Abbaretz	FPEGM, **GRAN7**, (FQTZ)	Pegmatites et Intrusifs carbonifères
100	15	Montbelleux	FPEGM, **GRAN2, GDIO2**, KORN, FQTZ, (FDOLE)	Intrusifs et pegmatites néoprotérozoïques dans des sédiments métamorphisés (métamorphisme de contact)
162	28	Treguennec	ORTG7, **GRAN7**, MCSH4	Granites carbonifères, dans des micaschistes ordovicien
200	2	L'Échasserie	**GRAN4**, **MCGR4**, MCSH2	Intrusifs ordoviciens dans des micaschistes

Tableau 5 : associations majoritaires présentes dans les groupes de CAH associés à un gîte de référence à Sn.

Il ressort de l'analyse du Tableau 5 qu'en dehors des cellules associées à Montbelleux et l'Échasserie qui sont dans des contextes de granites cambro-ordoviciens, toutes les autres cellules sont associées à des granites carbonifères intrusifs dans des encaissants lithologiques différents. Les cellules de type Montbelleux et Abbaretz ont en commun la présence de filons de pegmatite ou d'aplite.

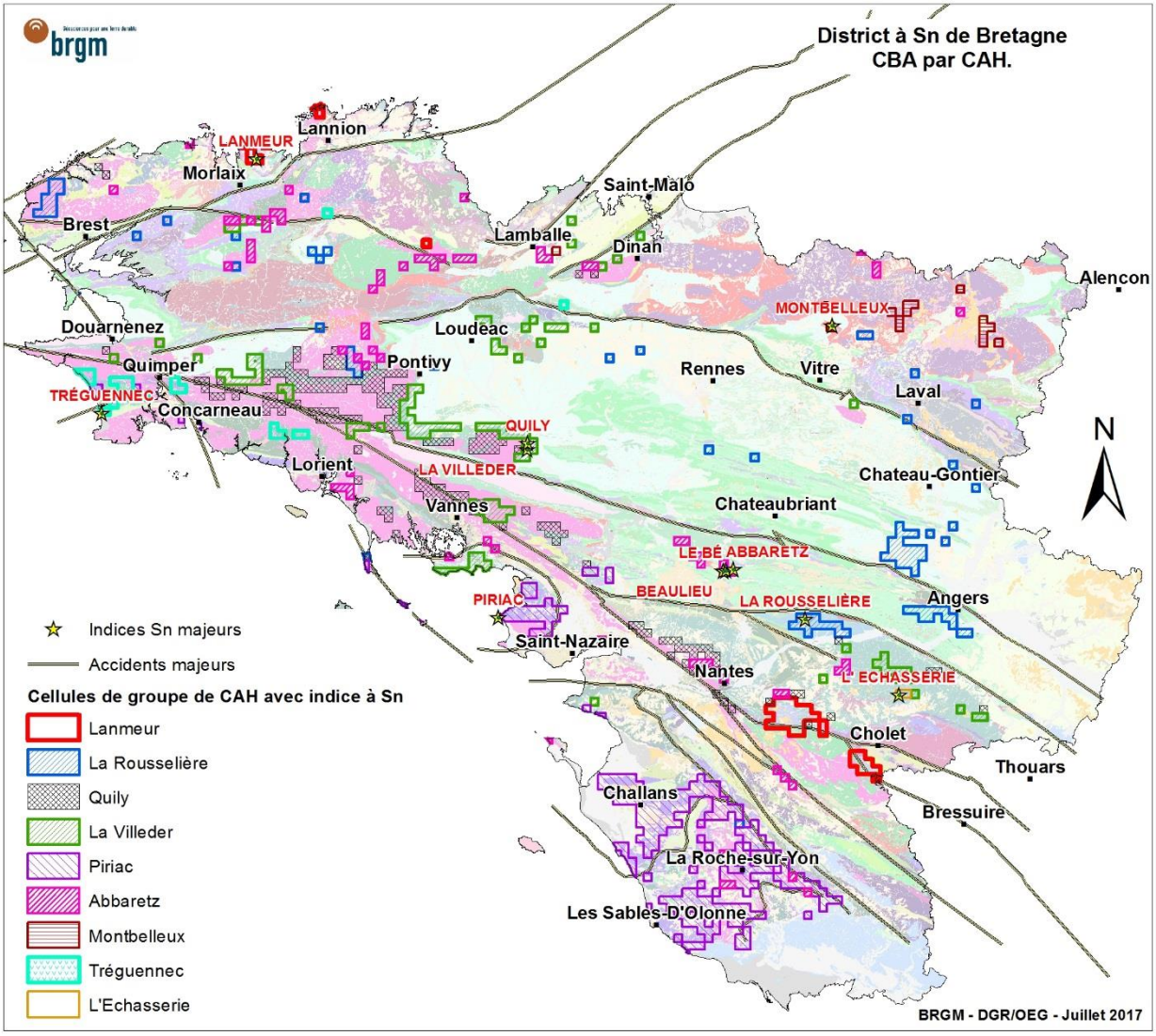


Figure 25 : Cellules classées par CAH associées aux gîtes de référence.

Le report cartographique (figure 25) des cellules de groupes favorables montre les éléments suivants :

i) **Veines et filons associés à des intrusions d'âge Cambrien dans des schistes** : on observe une faible extension des cellules associées aux gites de type Montbelleux (dans la partie nord-est de la zone d'étude).

ii) **Veines et filons associés à des intrusions d'âge Varisque dans des schistes** : les cellules de type « Piriac » sont bien regroupées de part et d'autre de l'estuaire de la Loire, au nord de Saint-Nazaire et en Vendée. Les cellules de type « la Villeder et Quily », qui ne diffèrent que par le grade métamorphique, forment des clusters dispersés sur tout le domaine Centre-Bretagne. Les cellules de type « Abbaretz » (coupoles sub à non-affleurantes) sont plutôt dispersées à l'ouest, de part et d'autre du bassin de Châteaulin. Les cellules du type de l'Échasserie montrent une faible extension autour du gîte connu.

iii) **Veines et filons associés à des intrusions subvolcaniques** : les cellules de type « la Rousselière » sont cantonnées dans la partie orientale, à hauteur d'Angers alors que les cellules de type « Lanmeur » définissent un petit cluster autour du gisement connu et deux autres clusters en Vendée, à proximité de Cholet. Cette zone n'est évidemment pas liée au

même volcanisme (< 300 Ma) de type Cornouaille anglaise, mais pourrait être liée à un volcanisme à 320 Ma et donc donner lieu à des minéralisations à Sn-Cu ou polymétalliques.

iv) **Granite à métaux rares de type « Tréguennec »** : les cellules sont localisées dans la partie ouest du domaine sud-armoricain, autour de Quimper et entre Quimper et Lorient.

2.4.2. CBA par signature exacte

- **Principe**

La CAH produit des classes qui regroupent des cellules autour d'un « noyau » de base (association lithologique principale dans le Tableau 5) mais qui agrègent aussi d'autres lithologies moins représentées dans la classe. Ceci génère un effet de « flou » sur la composition lithologique de chaque famille de cellules, effet de flou qui peut être intéressant car il peut augmenter le nombre de cellules favorables.

Pour limiter néanmoins l'augmentation du nombre de cellules, on peut choisir de rechercher sur toute la zone d'étude la composition lithologique exacte d'une surface centrée sur chaque gisement-étalon et définie par un buffer de taille compatible avec celle des cellules, soit un rayon de 1 500 m dans cette étude.

Cette opération est aussi plus restrictive et conduit à la sélection de 561 cellules au lieu de 877 par la méthode CAH.

- **Résultat et interprétation**

Index	Nb de Cellules	Gite de référence	Association lithologique contenue dans le buffer de 1 500 m défini autour d'un gisement étalon
FRA-00034	1	Montbelleux	FPEGM, **GRAN2,** **GRAN4**, GRWK2, SCSH2, (KORN)
FRA-00078	6	Abbaretz	FPEGM, GRES4, SCSH4, SCSH5
FRA-00363, FRA-03794	2	Le Bé, Beaulieu	FPEGM, **GRAN7**, GRES4, SCSH4, SCSH5
FRA-00180, FRA-03766	116	La Villeder , Quily	**GRAN7**, MCSH2, SCSH2
FRA-00255	2	L'Échasserie	**GRAN4**, **MCGR4**, MCSH2
FRA-00267	9	La Rousselière	FMGR, **GRAN7,** GRES6
FRA-00273	70	Lanmeur	GABB7, **GRAN7**
FRA-00328	3	Treguennec	GNEI4, MCSH4, ORTG7
FRA-00354	99	Piriac	**GRAN7**, GRES4, MCSH4

Tableau 6 : Associations exactes présentes dans les cellules contenant un gîte de référence à Sn - en fuschia, le granites protérozoïques, en beige les granites ordoviciens et en rouge les granite hercyniens.

Les gites d'Abbaretz, de le Bé et de Beaulieu comme ceux de la Villeder et de Quily présentent les mêmes associations lithologiques car ils sont spatialement très proches.

Comme cela a été vu avec les cellules classées par CAH, la majorité des gîtes à Sn sont associés spatialement à des granites carbonifères (GRAN7) à l'exception notable des gîtes de Montbelleux et de l'Échasserie qui sont localisés à proximité de granites ordoviciens (GRAN4). Il y aurait alors 2 épisodes stannifères, l'un en fin de cycle cadomien et l'autre en fin de cycle varisque.

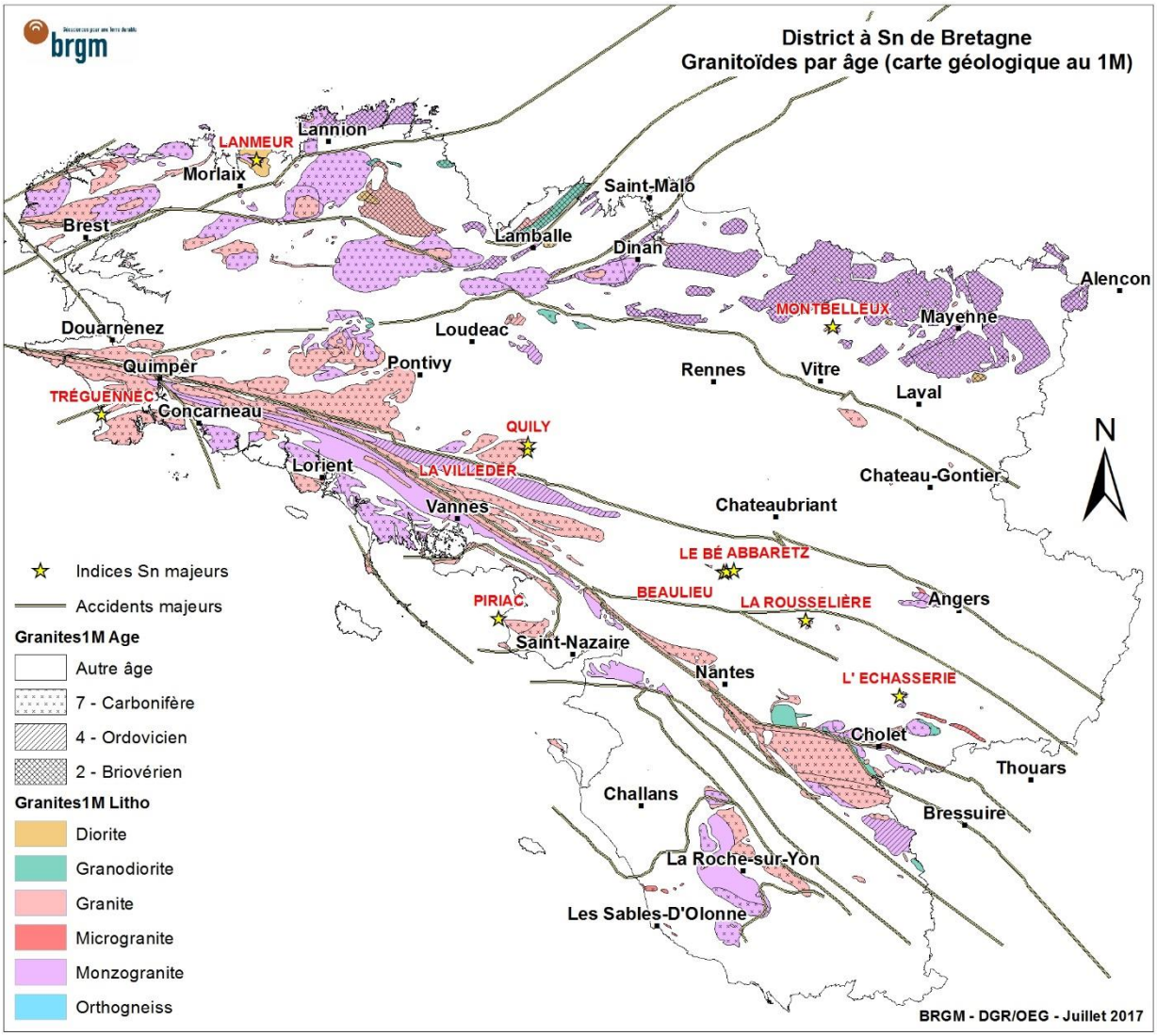


Figure 26 : Granites et indices à Sn de référence.

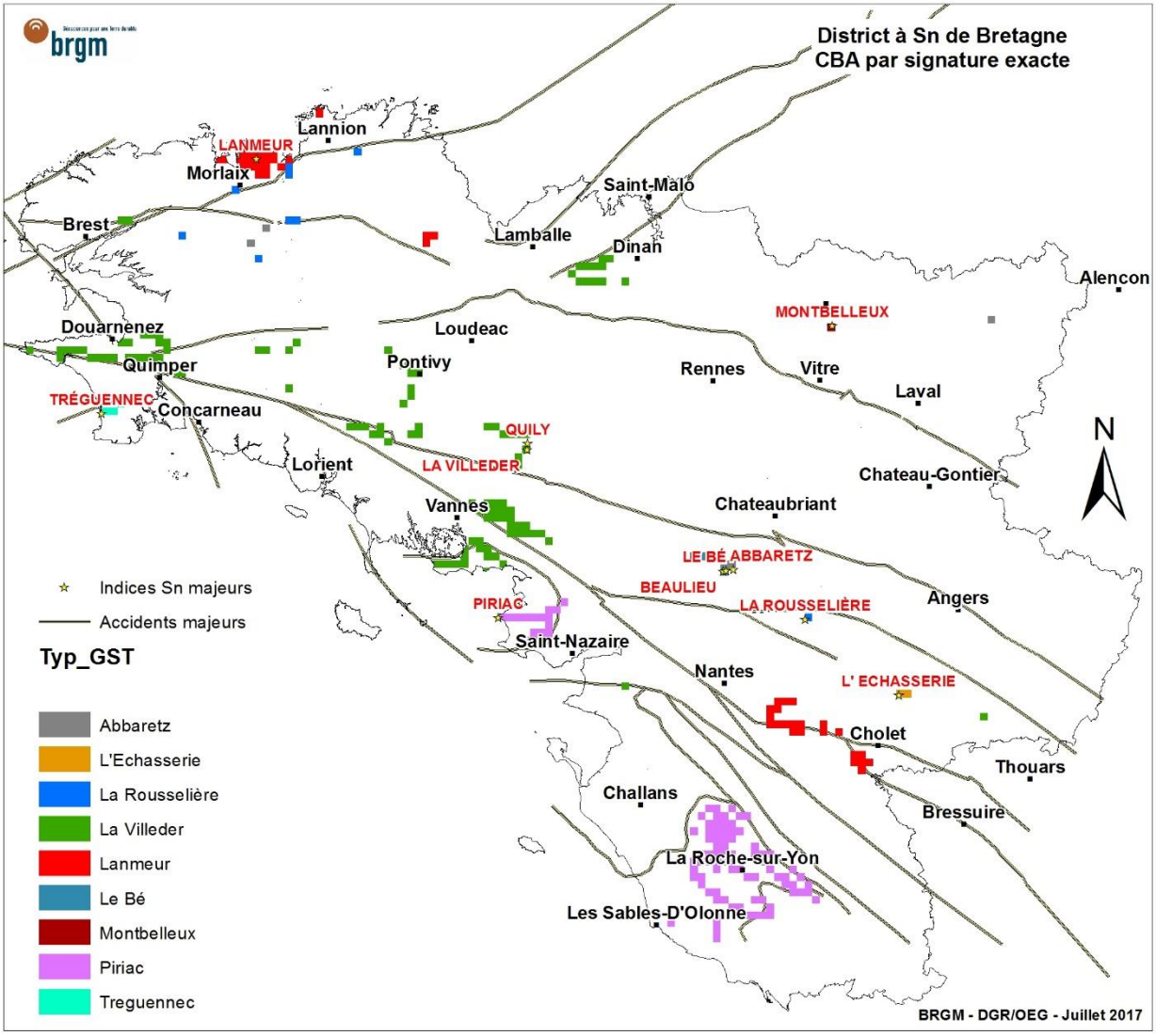


Figure 27 : Cellules ayant exactement la même association lithologique qu'une cellule avec un gîte de référence à Sn.

Le report cartographique des cellules ayant la même signature (Figure 27) que les buffers correspondant aux gisements de référence montre la faible empreinte spatiale des signatures de type Cambrien comme Montbelleux (1 cellule) et de type l'Échasserie (2 cellules). Il en est de même pour les signatures de type « Tréguennec » (granite à métaux rares) et « la Rousselière » (étain associé à un système subvolcanique) pour les minéralisations carbonifères qui restent localisées autour des indices connus. En revanche, les signatures de type veines et filons associés à des intrusions dans des schistes (« Piriac », « la Villeder ») sont plus largement représentées à l'échelle de la Bretagne, notamment le long des grandes zones de failles et en Vendée (La Roche-sur-Yon), ce qui ouvre des perspectives sur de nouvelles zones à prospecter.

La favorabilité des cellules de signature de type « Lanmeur » en Vendée (ouest et sud de Cholet) suggère d'y prospecter de systèmes subvolcaniques d'âge 320 Ma environ (type la Rousselière) intrusifs dans des encaissants mafiques.

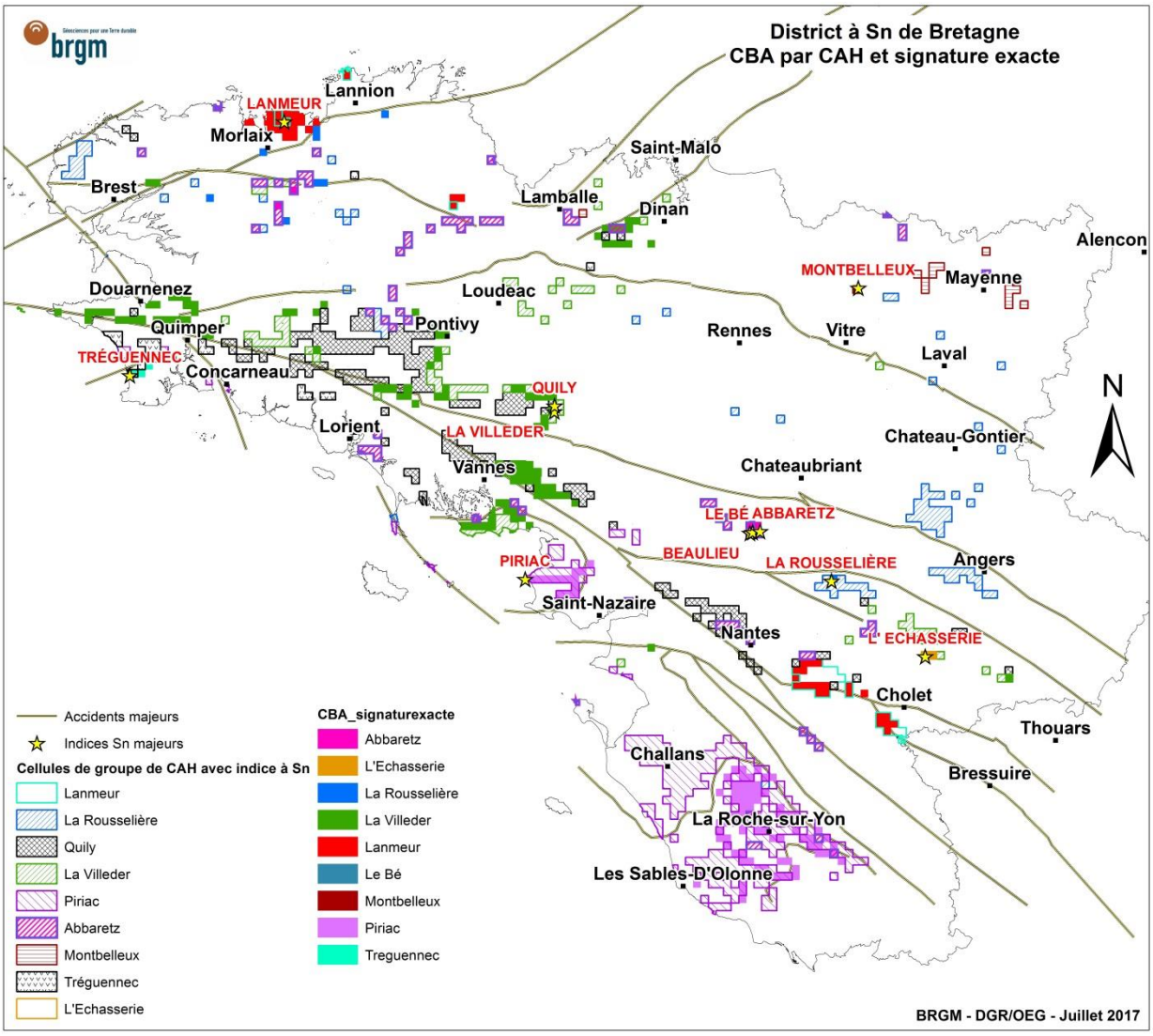


Figure 28 : Superposition des résultats des cellules sélectionnée par CAH et par signature exacte.

La superposition des résultats obtenus par les 2 méthodes (Figure 28) montre que les cellules sélectionnées par signature exacte sont un sous-ensemble des cellules sélectionnées par CAH.

2.4.3. Classement sur CBA

- **Principe**

Pour améliorer les résultats obtenus par les deux méthodes précédentes, une méthode a été élaborée qui permet un « classement » des cellules à partir des associations présentes dans les cellules étalons.

Cette procédure nécessite de définir des cellules étalons, typiquement des cellules contenant le phénomène recherché, comme ici les 13 indices à Sn de référence qui déterminent 13 cellules étalons.

Afin de pouvoir donner une note aux cellules, le rapport de fréquences entre les attributs contenus dans les cellules étalons (Frequency in Standard Cells - FSC) et les mêmes attributs contenus dans l'ensemble des cellules de la zone d'étude (Frequency in Study Area - FSA) a été appliqué au spectre lithologique contenu par chaque cellule.

Le mode de calcul de ce rapport de fréquences consiste à i) extraire les cellules contenant au moins une occurrence minéralisée, ii) faire le rapport entre le nombre de fois où une formation est présente dans les cellules minéralisées sur le nombre total de cellules minéralisées (FSC), iii) à faire le même calcul sur l'ensemble des cellules de la zone d'étude (FSA) puis, iiii) de faire le rapport entre les 2 valeurs par formation (FRatio = FSC / FSA) (Tableau 7).

Code lithologique	AMPH2	FMCGR	FPEGM	FQTZ	GABB7	GDIO2	GDIO4	GNEI2	GRAN2	GRAN4	GRAN7	GRES2	GRES4	GRES6	GRWK2	GRWK7	KORN
Fréquence dans les cellules étalon	0.02	0.04	0.1	0.4	0.04	0.02	0.04	0.14	0.02	0.1	0.74	0.1	0.2	0.02	0.04	0.02	0.08
Fréquence dans la population totale	0.028	0.056	0.022	0.177	0.009	0.070	0.002	0.045	0.037	0.027	0.251	0.083	0.202	0.058	0.059	0.031	0.090
Rapport de fréquence	0.72	0.72	**4.61**	**2.26**	**4.22**	0.29	**19.64**	**3.12**	0.54	**3.73**	**2.95**	**1.21**	0.99	0.35	0.68	0.64	0.89
Code lithologique	LEPT2	MCGR4	MCGR7	MCSH2	MCSH4	MIGM2	MIGM7	MZGR7	ORTG2	ORTG4	ORTG7	SCSH2	SCSH4	SCSH5	UBAST	VACI4	VBAS4
Fréquence dans les cellules étalon	0.02	0.02	0.02	0.42	0.04	0.04	0.02	0.1	0.02	0.06	0.02	0.26	0.18	0.1	0.02	0.02	0.02
Fréquence dans la population totale	0.002	0.000	0.005	0.145	0.067	0.021	0.046	0.055	0.006	0.072	0.005	0.251	0.157	0.101	0.030	0.035	0.015
Rapport de fréquence	**10.34**	**49.11**	**3.93**	**2.89**	0.60	**1.91**	0.44	**1.83**	**3.39**	0.83	**4.09**	**1.03**	**1.15**	0.99	0.67	0.57	**1.34**

Code Lithologique	AMPH2	FMCGR	FPEGM	FQTZ	GABB7	GDIO2	GDIO4	GNEI2	GRAN2	GRAN4	GRAN7	GRES2
Fréquence dans les cellules avec Sn	0.018	0.036	0.109	0.436	0.055	0.018	0.036	0.127	0.018	0.091	0.764	0.091
Fréquence dans l'ensemble des cellules	0.028	0.056	0.022	0.177	0.009	0.070	0.002	0.045	0.037	0.027	0.251	0.083
Rapport de fréquence	0.65	0.65	**5.03**	2.47	**5.76**	0.26	**17.86**	2.83	0.49	**3.40**	**3.05**	1.10
Code Lithologique	GRES4	GRES5	GRES6	GRWK2	GRWK7	KORN	LEPT2	MCGR4	MCGR7	MCSH2	MCSH4	MIGM2
Fréquence dans les cellules avec Sn	0.200	0.000	0.018	0.036	0.018	0.073	0.018	0.018	0.018	0.418	0.036	0.036
Fréquence dans l'ensemble des cellules	0.202	0.042	0.058	0.059	0.031	0.090	0.002	0.000	0.005	0.145	0.067	0.021
Rapport de fréquence	0.99	0.00	0.31	0.61	0.59	0.81	**9.40**	**44.65**	**3.57**	2.87	0.54	1.73
Code Lithologique	MIGM7	MZGR7	ORTG2	ORTG4	ORTG7	SCSH2	SCSH4	SCSH5	UBAST	VACI4	VBAS4	
Fréquence dans les cellules avec Sn	0.018	0.109	0.018	0.055	0.018	0.273	0.182	0.109	0.018	0.018	0.018	
Fréquence dans l'ensemble des cellules	0.046	0.055	0.006	0.072	0.005	0.251	0.157	0.101	0.030	0.035	0.015	
Rapport de fréquence	0.40	1.99	**3.08**	0.76	**3.72**	1.08	1.16	1.08	0.61	0.52	1.21	

Tableau 7 : Tableau des rapports de fréquence (FRatio) des formations associées aux gîtes à Sn de référence.

Un FRatio significativement supérieur à 1 est interprété comme mettant en évidence une formation plus fréquente dans les cellules minéralisées que dans les cellules de la zone d'étude et que cette formation peut donc avoir un lien avec la minéralisation. Afin de ne pas donner trop d'importance à des formations à score très élevés (GDIO4 et MCGR4) car peu représentées dans la zone d'étude, la valeur maximale a été limitée à 10.

Les formations post-paléozoïques ne sont pas prises en compte car elles n'ont pas de rôle dans la mise en place des minéralisations et constitueraient des FRatio non pertinents pour ce qui est recherché.

L'étape suivante consiste à reporter le FRatio de chaque formation impliquée dans les cellules étalons, sur toutes les cellules de la zone d'étude, puis de les combiner par la somme des FRatio par exemple :

$$\textbf{Score} = \sum \textbf{FRatio}$$

Ou par leur produit :

Score = X FRatio (avec Fratio > 0)

On suppose que plus cette valeur est élevée, plus on aura de formations favorables présentes dans une cellule. Par principe, le classement ne prend en compte que les formations pertinentes présentes dans les cellules étalon, les autres formations comme les formations du Tertiaire par exemple, sont ignorées.

Un des biais induit par cette méthode est de favoriser les cellules présentant de nombreuses formations favorables, c'est-à-dire définissant un environnement géologique complexe.

- **Résultat et interprétation**

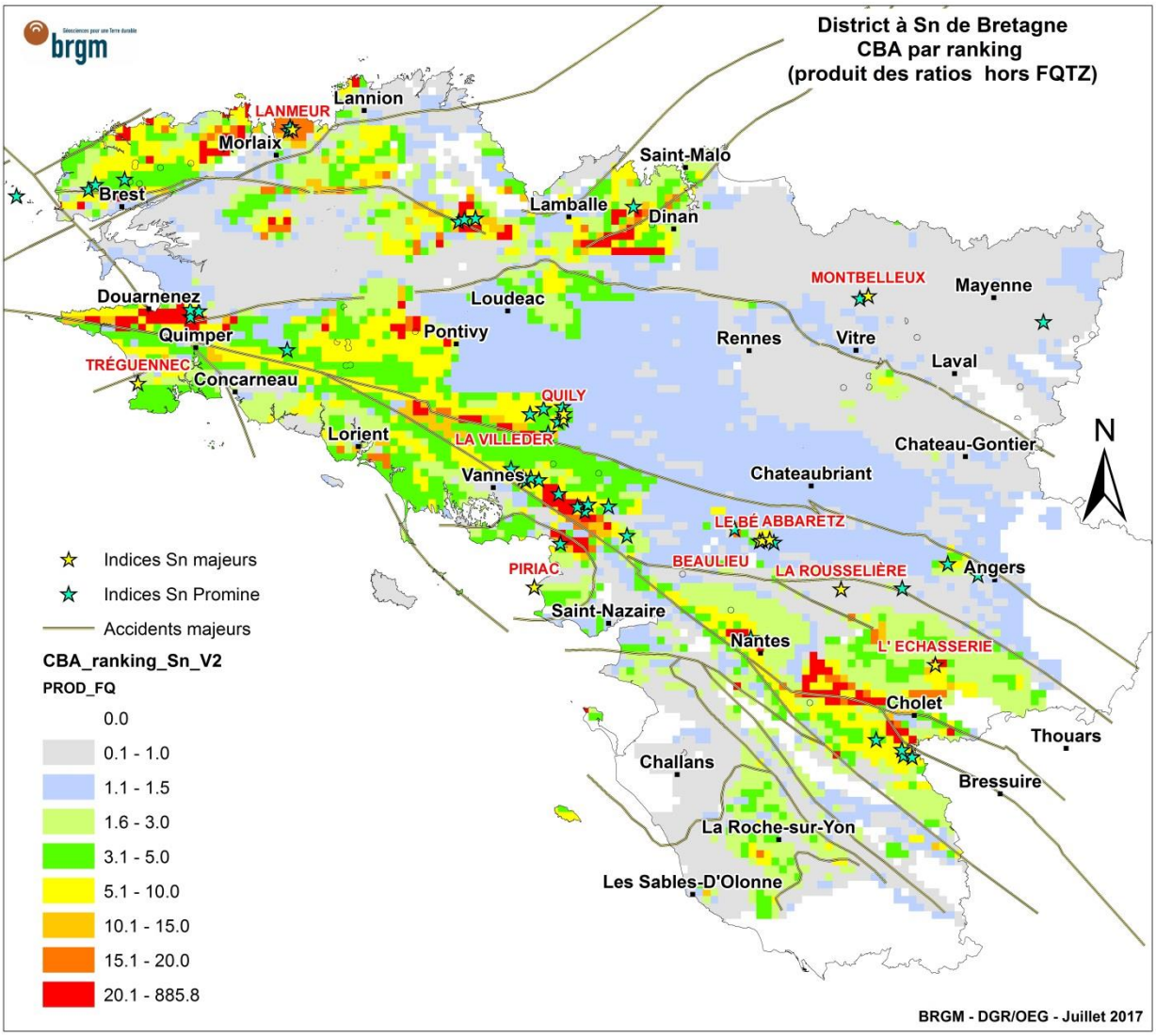


Figure 29 : Classement sur CBA à partir des rapports de fréquence sur les formations.

Le report cartographique des cellules avec le ranking par produit (Figure 29) montre en orangé-rouge les cellules qui présentent les plus forts scores qui présentent la favorabilité la plus élevée de contenir des environnements favorables à la présence de minéralisations à étain.

La partie centrale de la Bretagne apparaît comme peu « intéressante ». Les clusters de cellules à forts scores sont soit à proximité de grands accidents (entre Cholet et Nantes, à l'est de Vannes, au nord de Quimper et à l'ouest de Dinan) ou déconnectés de ces failles dans des environnements où on observe de nombreuses petites intrusions subaffleurantes associées à des pegmatites et des veines de quartz (à l'ouest de Pontivy, entre Lannion et morlaix). Les gîtes de Montbelleux, l'Échasserie, la Rousselière ou Abbaretz sont associés à des cellules à fort score isolées.

2.5. UTILISATION DE DONNÉES GÉOPHYSIQUES POUR AMÉLIORER LES RÉSULTATS DE FAVORABILITÉ.

Après examen des levés géophysiques et leur éventuelles relations avec les indices à étain, il apparaît que seule l'anomalie de Bouguer est une donnée utile, quoique peu sélective, car les anomalies « légères » qui soulignent la présence des massifs granitiques, métallotectes de premier ordre pour l'étain couvrent de vastes surfaces (Figure 30). Les autres variables géophysiques issues du levé aéromagnétique et aérospectrométrique ne montrent pas de relation systématique à l'échelle du massif même si cela n'interdit pas que des relations puissent exister à un niveau plus local.

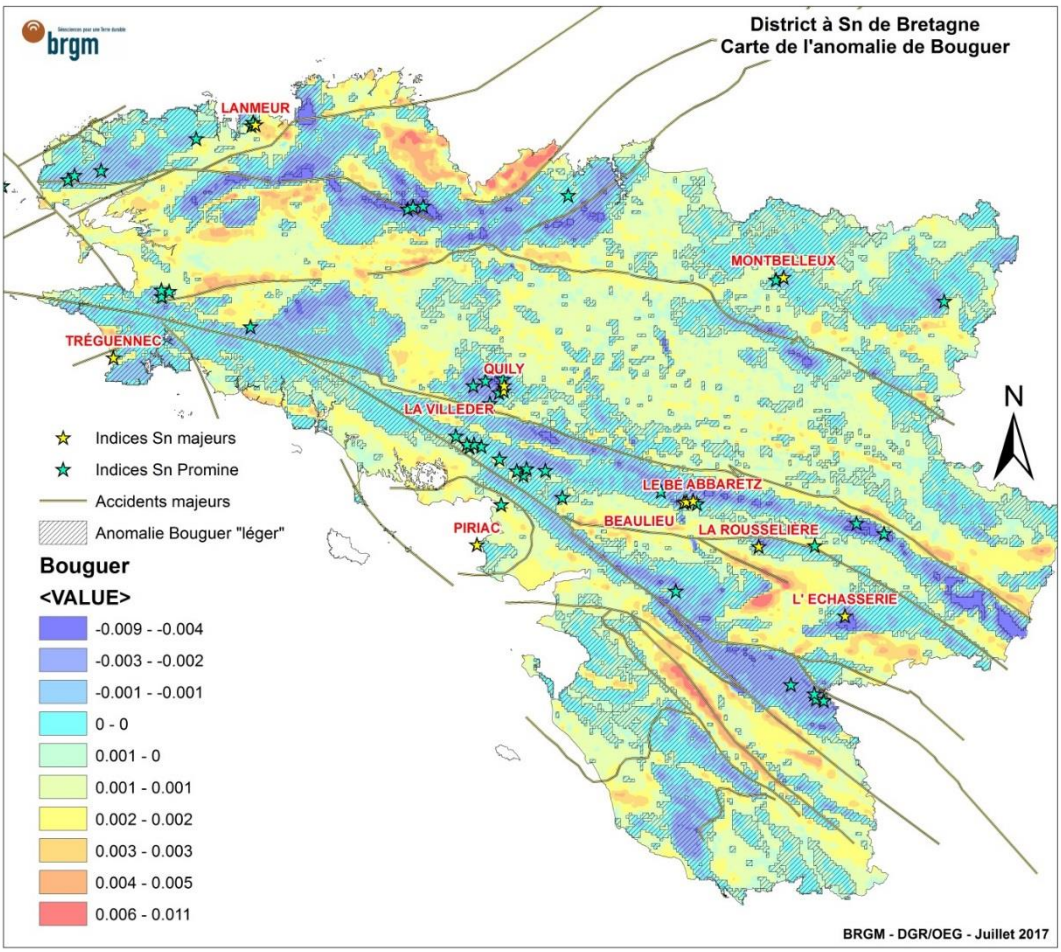


Figure 30 : Carte de l'anomalie de Bouguer, les indices à Sn sont superposés aux zones légères (Bouguer < 0).

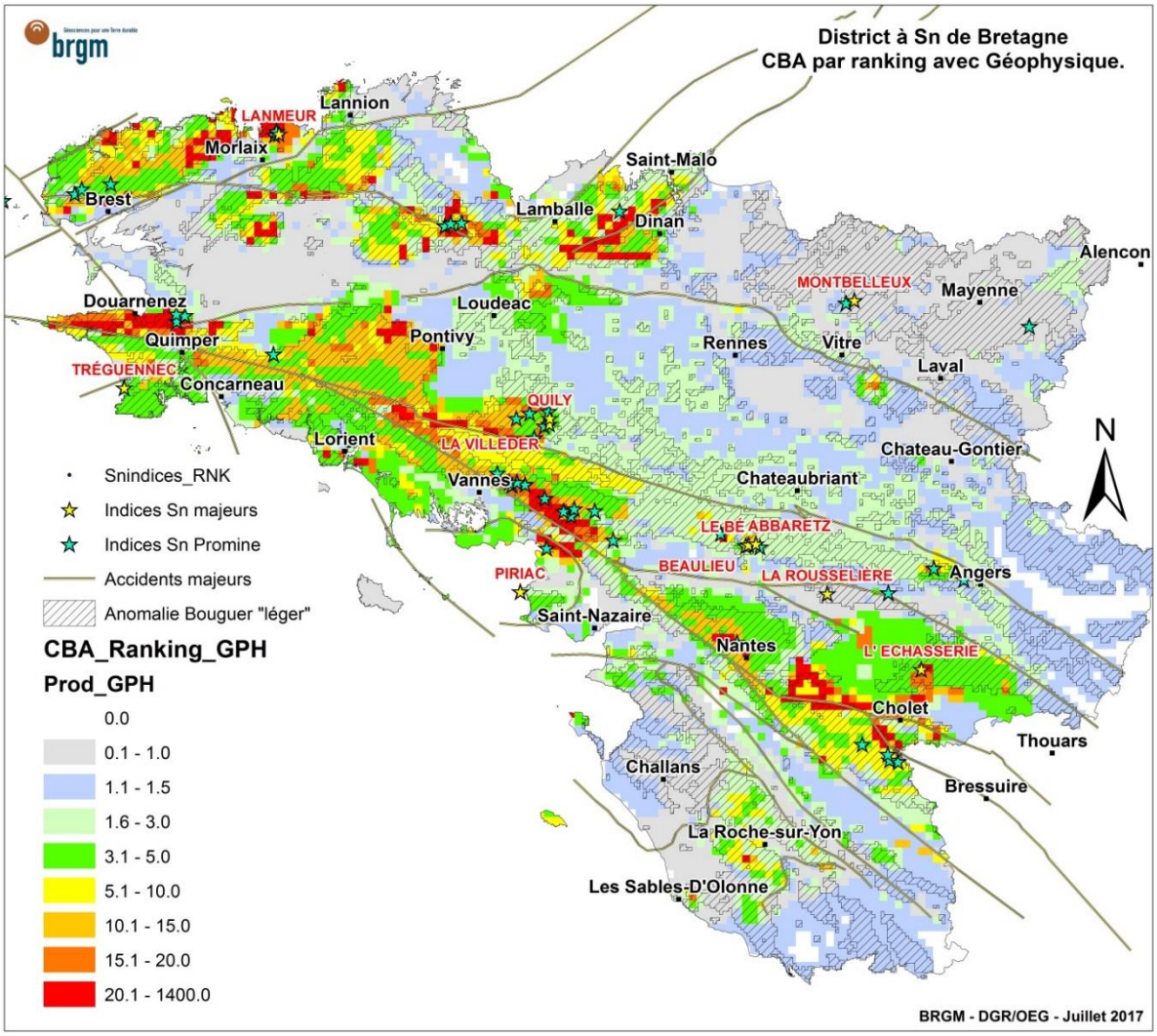


Figure 31 : Classement sur CBA intégrant les données lithologiques et l'anomalie gravimétrique de Bouguer.

L'ajout d'un ranking calculé en ajoutant les anomalies légères ne change pas l'image de la CBA calculée à partir des lithologies seules (Figure 31). Il ne fait qu'augmenter le score de certaines cellules mais sans conséquence notable sur leur répartition.

2.6. SÉLECTION DES ZONES FAVORABLES

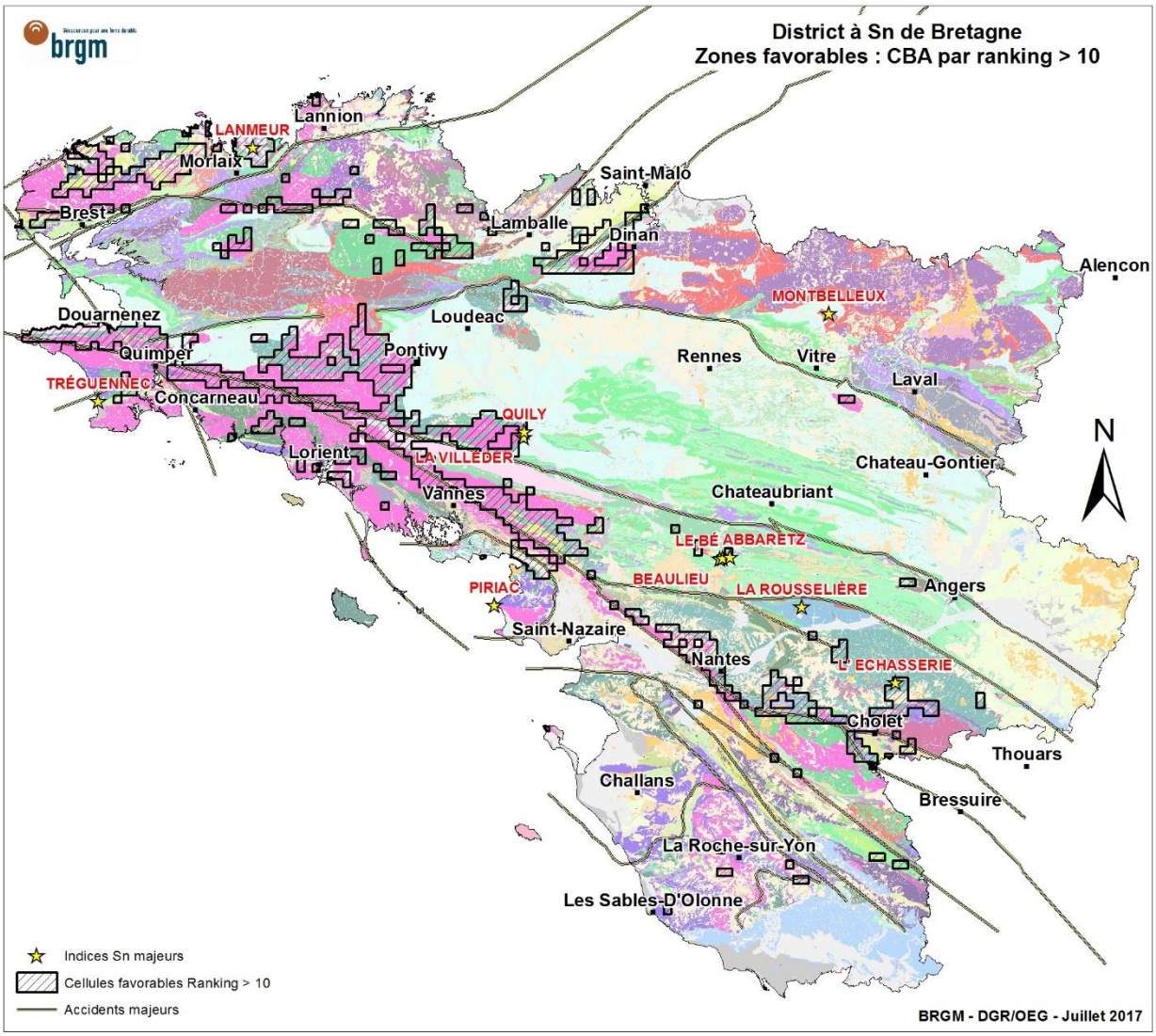


Figure 32 : Sélection des zones les plus favorables à la présence de minéralisations à Sn estimées par classement sur CBA (Valeurs > 10) en utilisant des paramètres lithostratigraphique et gravimétrique.

En sélectionnant les cellules dont le ranking est supérieur à 10 (valeur de la médiane pour Prod_GPH), on trouve 825 cellules favorables (sur 9 822 cellules au total, soit 8,4 % de la surface totale) qui représentent les plus fortes chances de contenir des environnements favorables à la présence d'indices d'étain.

2.7. INTERSECTION ENTRE ZONES FAVORABLES ET CBA/CAH

2.7.1. À l'échelle de la province

Pour cibler au mieux les zones à plus forte prospectivité, il est possible de faire l'intersection entre les résultats fournis par les 2 méthodes de CBA (CAH et classement) en partant de l'hypothèse que si les 2 méthodes répondent positivement sur une même cellule, sa probabilité de contenir une minéralisation augmente. 339 cellules sélectionnées en CAH sont superposées aux zones favorables définies par classement (sur les 835 cellules avec CAH favorable et les 825 cellules avec un ranking > 10).

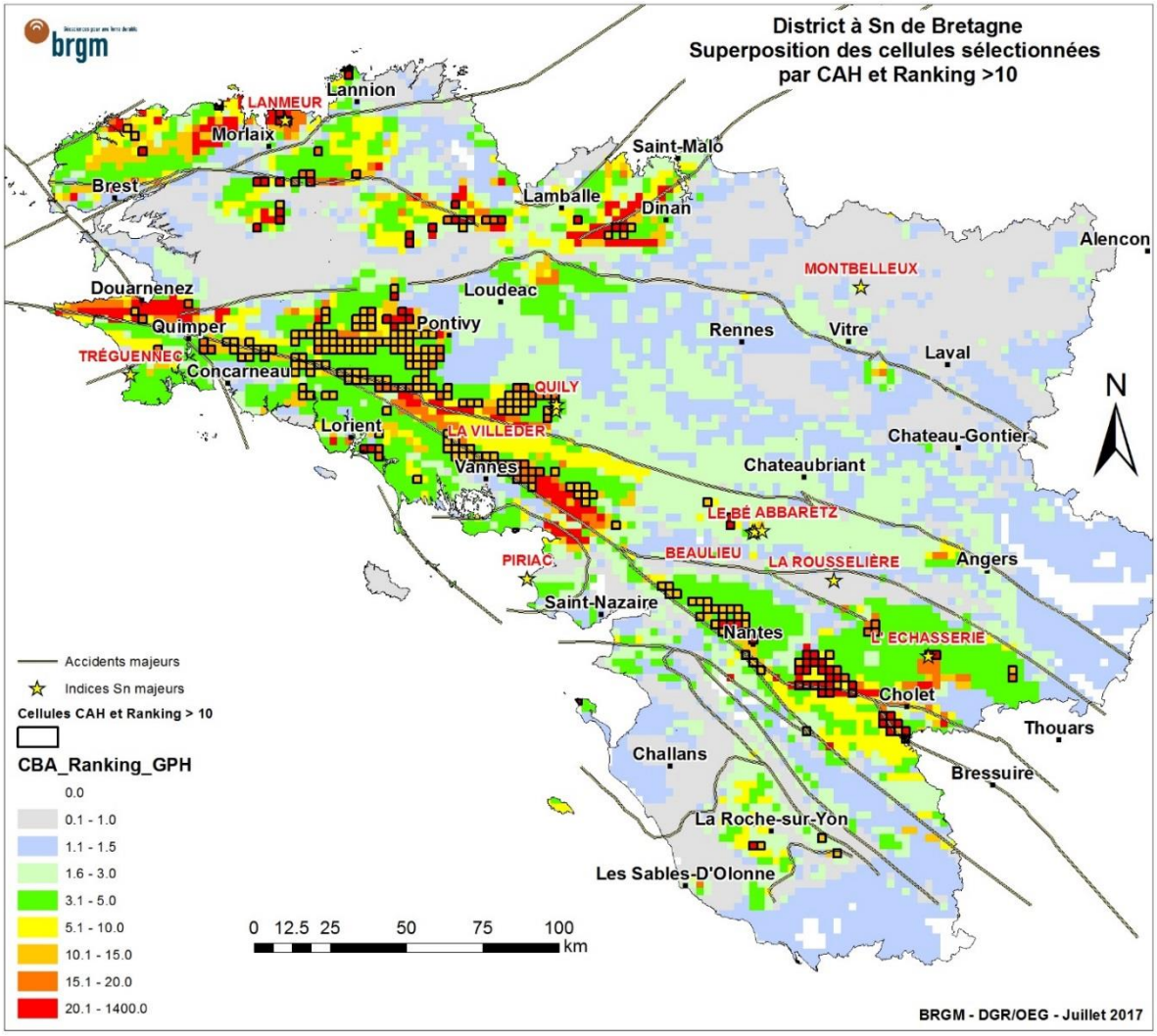


Figure 33 : Intersection entre cellules sélectionnées à partir de la CAH et cellules à ranking > 10.

Cette intersection (Figure 33) a comme effet de concentrer l'intérêt sur la partie sud de la Bretagne, entre Quimper et Cholet, en suivant le cisaillement sud-armoricain plus une zone déconnectée de l'accident entre Quimper et Pontivy, autour du granite de Pontivy et Scaër. Plus anecdotiquement, quelques cellules sont dispersées le long de l'accident nord-armoricain entre Brest et Dinan. Par rapport aux cellules sélectionnées par CAH, celles correspondant à la signature « Piriac » à **GRAN7**, GRES4, MCSH4 (en bordure de mer, de part et d'autre de l'estuaire de la Loire) ont pratiquement disparu, du fait de la grande « banalité » des faciès présents qui fait diminuer beaucoup leur FRatio, alors que cette association était bien marquée en CAH.

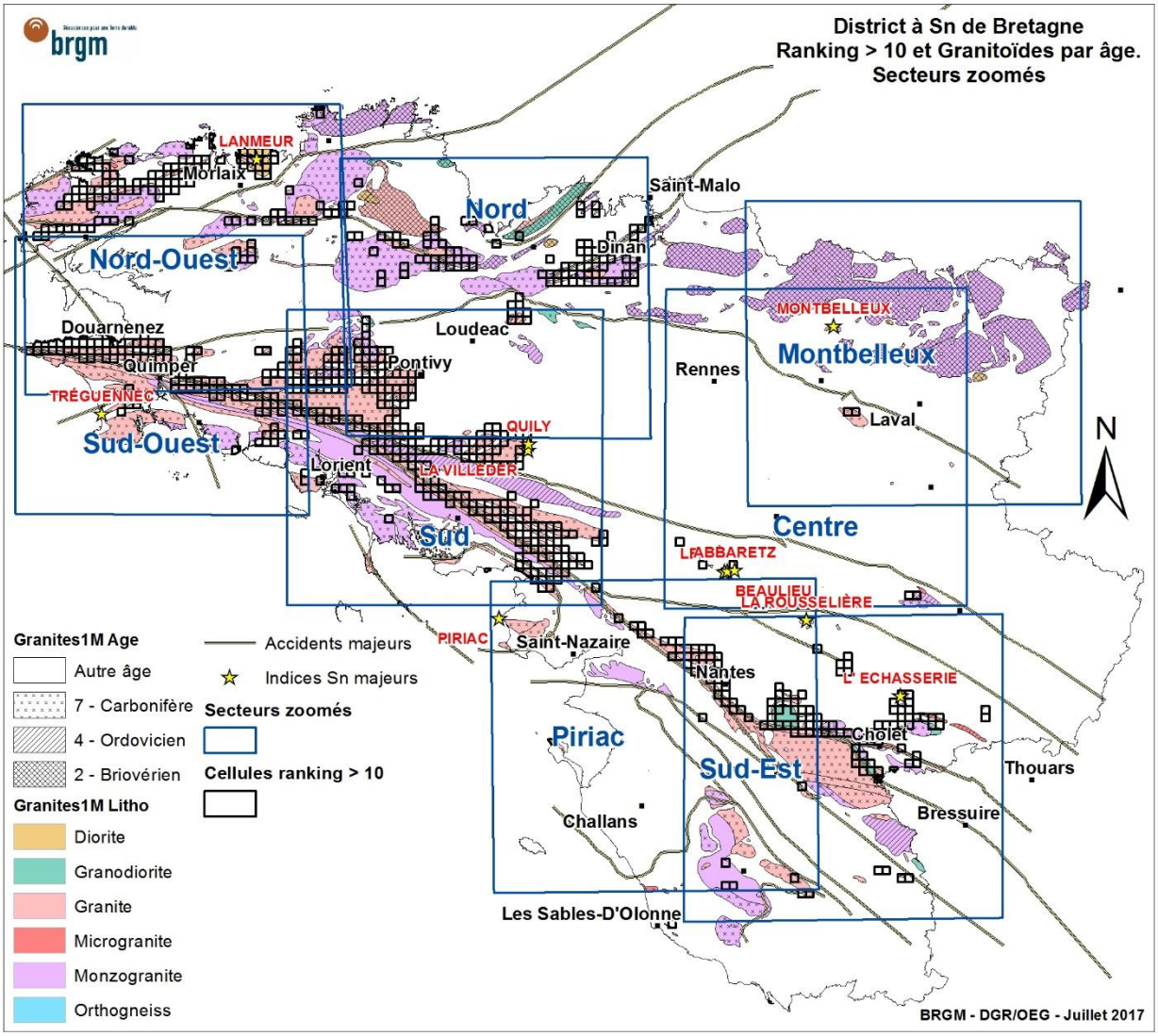


Figure 34 : Granites et cellules issues de la CBA par ranking > 10. Emprise des zones détaillées dans les zooms.

La superposition des cellules de CBA à score > 10 sur les granitoïdes de la carte géologique au 1/1 000 000 souligne la répartition des zones favorables en périphérie des granites et monzogranites carbonifères en liaison avec les grands accidents cisaillants du nord et surtout, du sud de la Bretagne. Le gîte de Montbelleux associé à des granites cambro-ordoviciens apparaît nettement déconnecté des autres secteurs favorables.

2.7.2. À l'échelle du district

Cette section s'appuie sur une suite de zooms qui permet de détailler l'interprétation des zones favorables.

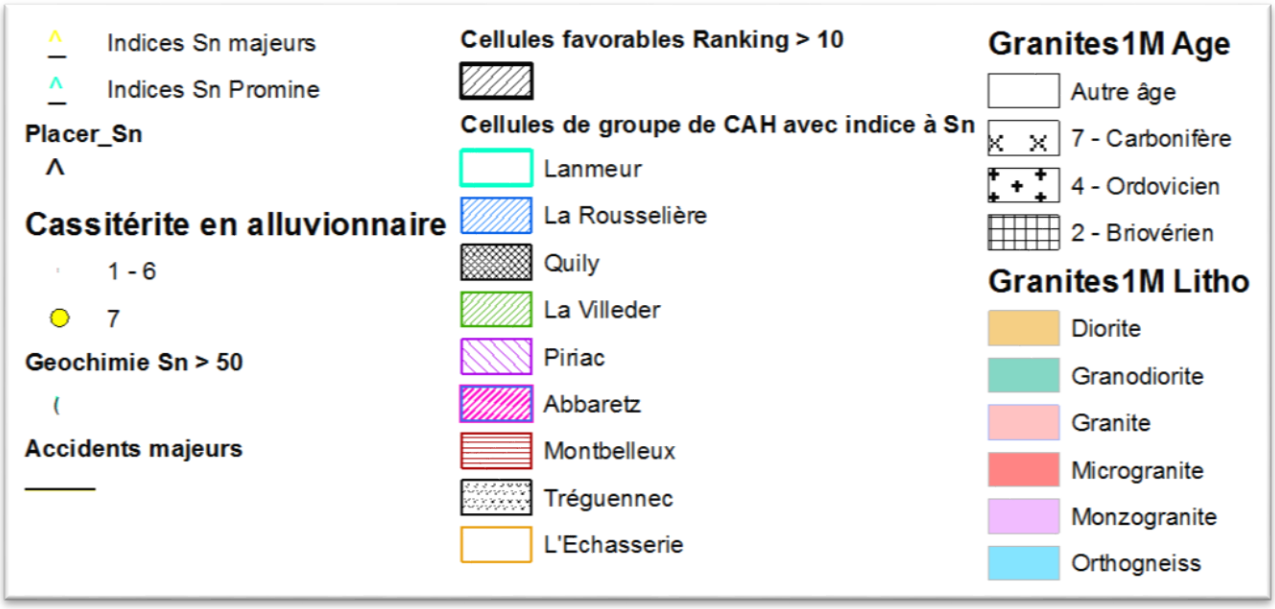


Figure 35 : Légende commune aux figures 35 à 43.

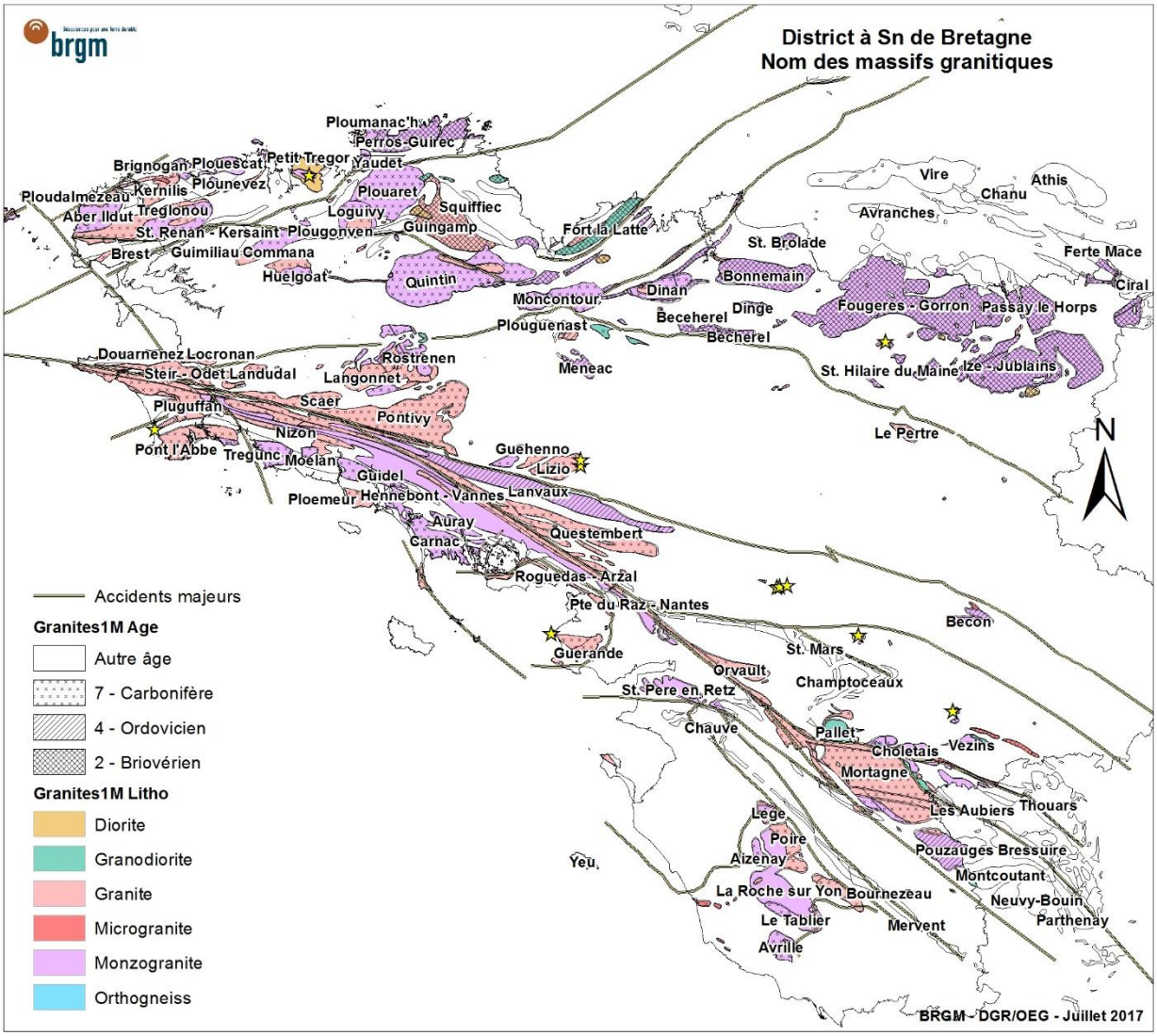


Figure 36 : Nom des principaux massifs de granitoïdes de Bretagne.

Zones favorables du secteur nord

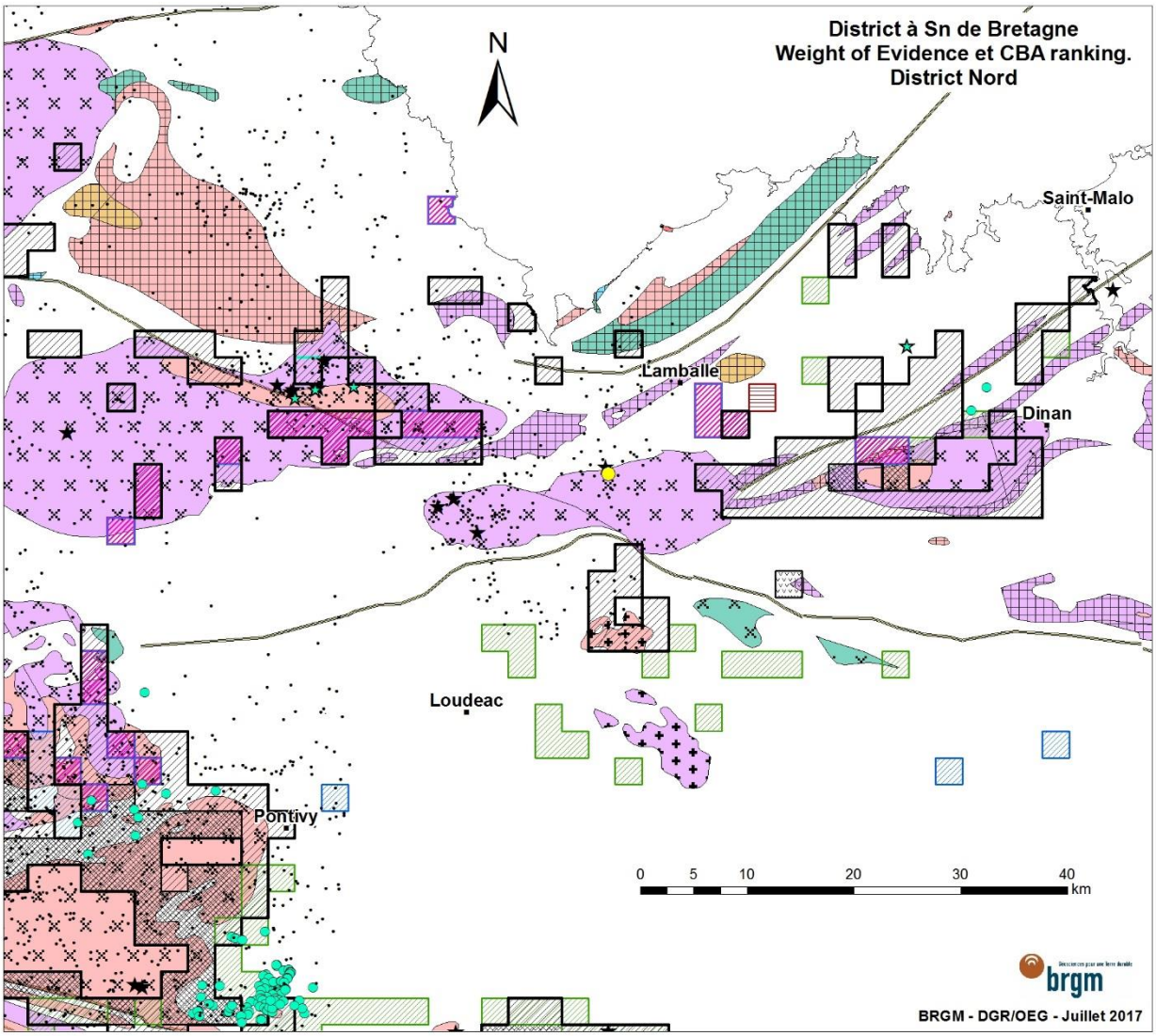


Figure 37 : Zones favorables, secteur nord.

Le secteur nord, entre Saint-Malo et Pontivy, structuré par le cisaillement nord-armoricain montre 3 zones à potentiel de minéralisation en Sn :

- la première zone se trouve en périphérie des granites de Dinan et de Quintin. Curieusement, celui de Moncontour n'est pas associé à des cellules favorables malgré la présence de quelques placers dans sa partie ouest. L'association lithologique est plutôt du type « Abbaretz » ;
- la deuxième est localisée dans et autour du granite de Pontivy (de type « la Villeder ») et du monzogranite de Rostrenen (de type « Abbaretz »). On peut aussi noter la présence d'une importante anomalie géochimique à étain dans la partie sud-est du massif de Pontivy ;
- la troisième correspond à des cellules de type « la Villeder » dispersées entre le granite de Méneac et celui de de Plouguenast.

Zones favorable du secteur nord-ouest

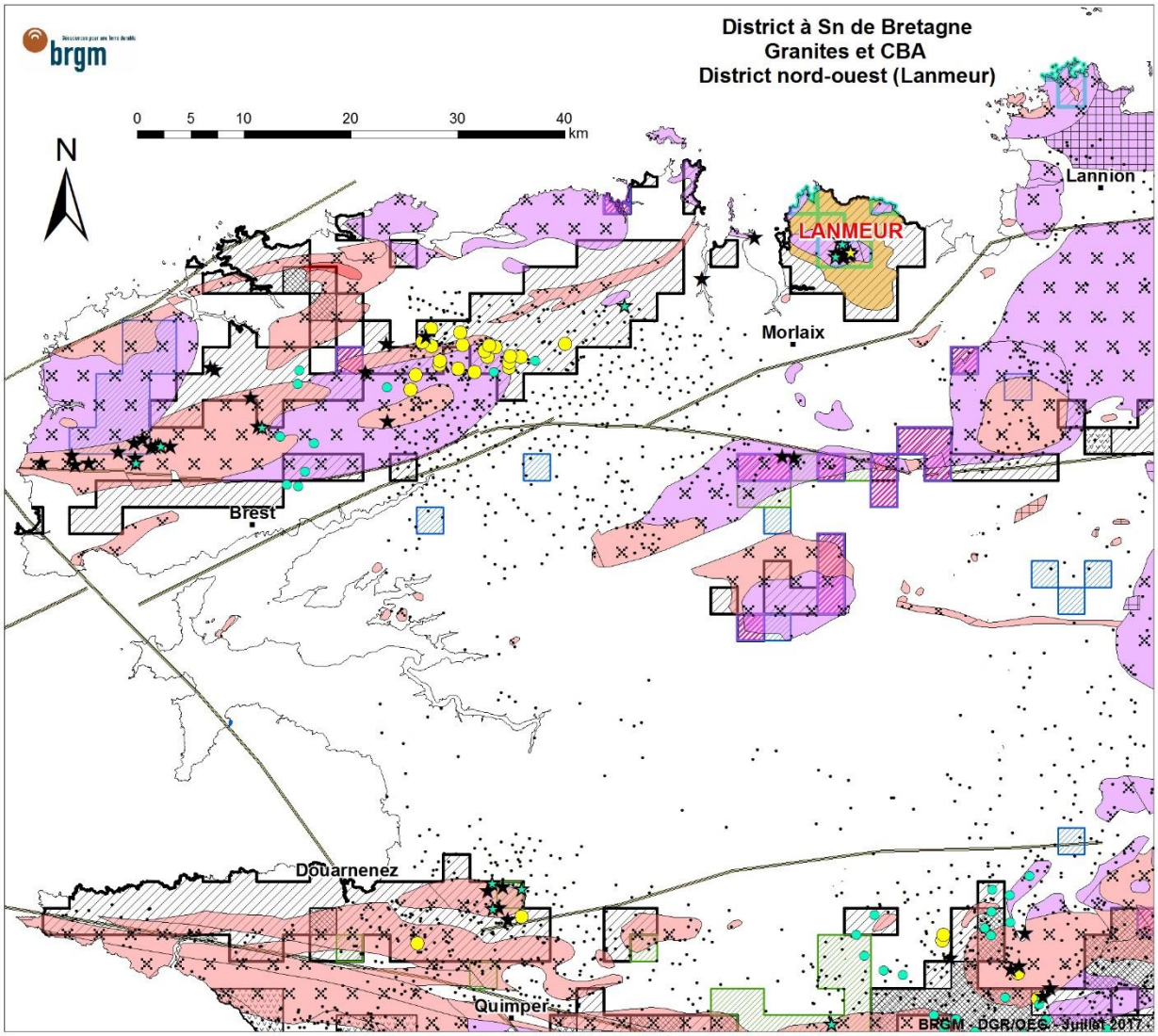


Figure 38 : Zones favorables, secteur nord-ouest.

Ce secteur est marqué par la présence de 4 groupes de cellules favorables :

- un en périphérie du granite de Ploumanac'h de type « Abbaretz » ou « la Villeder » ;
- un autour du granite de Quintin de type Abbaretz très similaire au précédent ;
- un groupe correspondant au gisement réputé atypique (de type « Cornouaille anglaise ») de Lanmeur caractérisé par une intrusion granitique dans un environnement de gabbro (massif du Petit Trégor). Deux cellules présentant la même association se retrouvent un peu plus à l'est dans le massif de Ploumanac'h au nord de Lannion ;
- un groupe en périphérie des granites de Saint-Renan, Aber Ildut et Kernilis de type « la Rousselière » aussi marqué par la présence de cassitérite alluvionnaire, de placers et de teneurs en Sn géochimique supérieures à 50 ppm.

Zones favorables du secteur sud-ouest

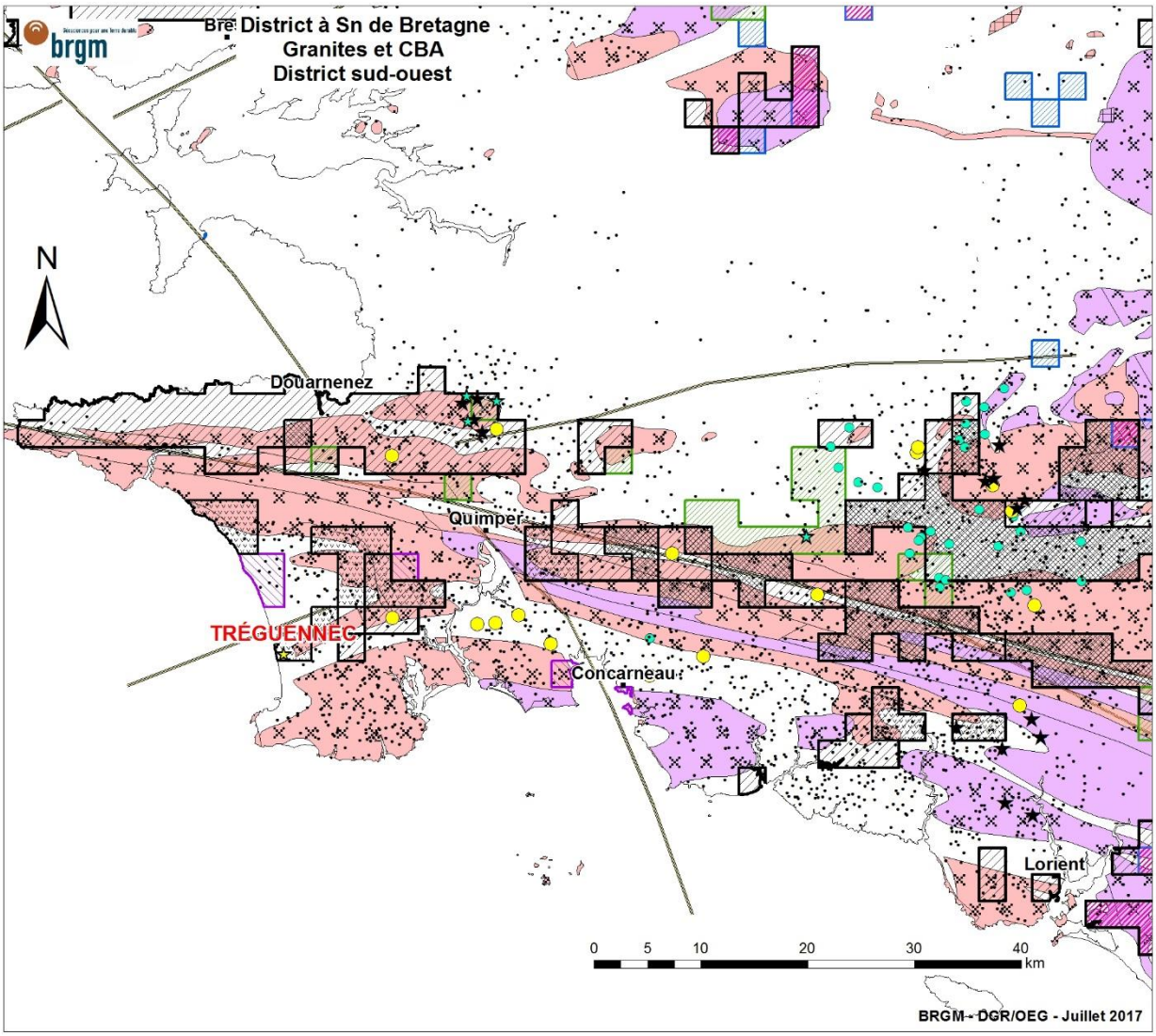


Figure 39 : Zones favorables, secteur sud-ouest.

Le secteur sud-ouest est marqué par 2 zones favorables majeures :

- une associée spatialement au cisaillement sud-armoricain, plutôt du type « Quily-la Villeder » ou « Treguennec » suivant une direction nord-est à partir de ce gîte. Ces zones favorables sont accompagnées de teneurs en cassitérite alluvionnaire et de quelques placers ;
- une autre localisée entre les granites de Scaër et Langonnet, en prolongement ouest du granite de Rostrenen plutôt de type « la Villeder » marquée aussi par des teneurs en Sn > 50 ppm en géochimie et quelques points à cassitérite.

Zones favorables du secteur sud

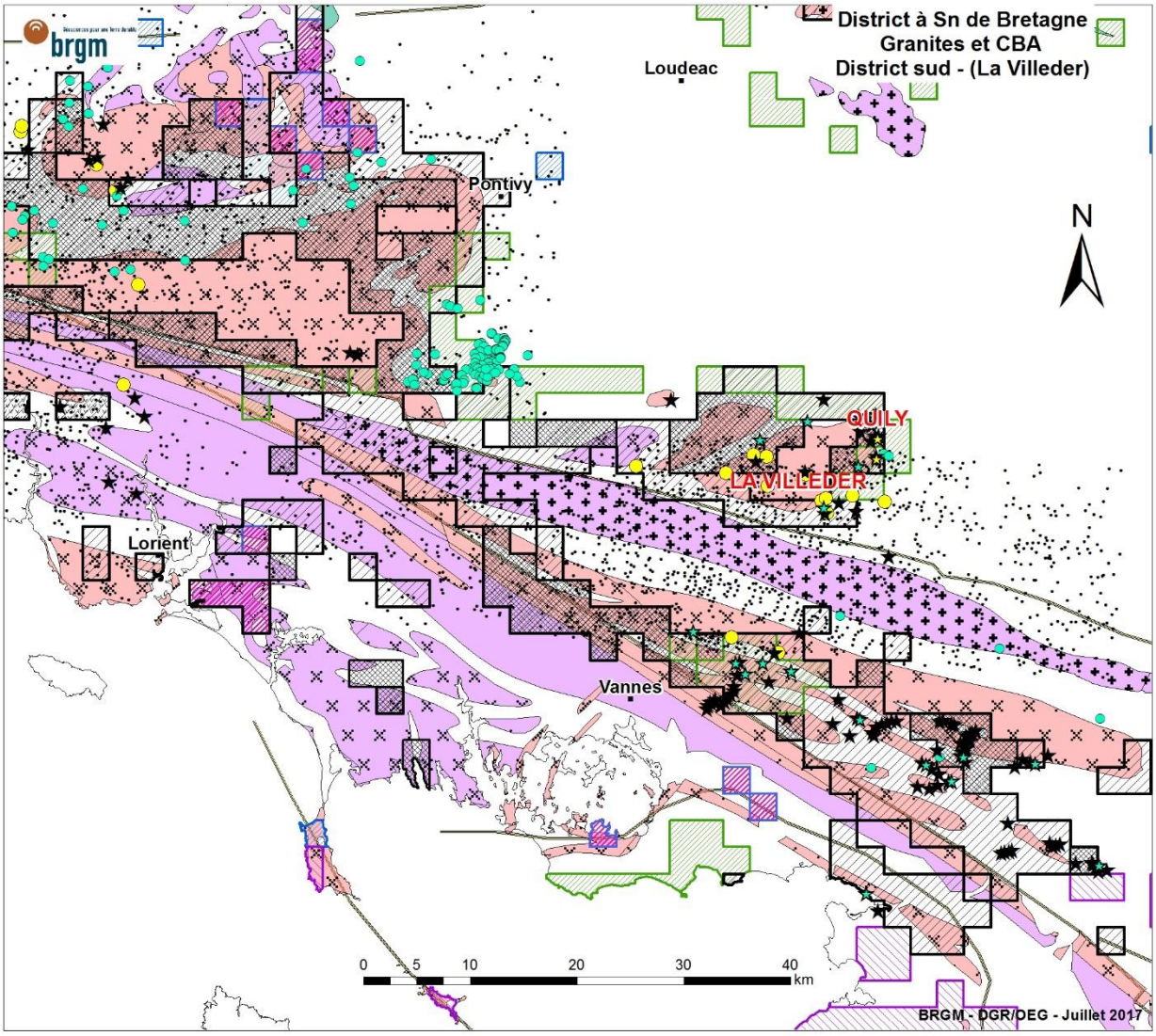


Figure 40 : Zones favorables, secteur sud.

En dehors de la périphérie du granite de Pontivy, les zones favorables se trouvent :

- autour des petits granites de Lizio et Guehenno avec des cellules de type « la Villeder » et la présence de placers et des cassitérite en alluvionnaire ;
- le long de la branche sud du cisaillement sud-armoricain, entre les granites de Questembert et de Hennebont-Vannes avec des cellules du type « Quilly-la Villeder » et la présence de nombreux placers et quelques teneurs de géochimie à plus de 50 ppm ;
- plus anecdotiquement, on peut noter quelques cellules favorables de type « Abbaretz » ou « Quilly » à l'est de Lorient dans le granite de Carnac

Zones favorables du secteur Piriac

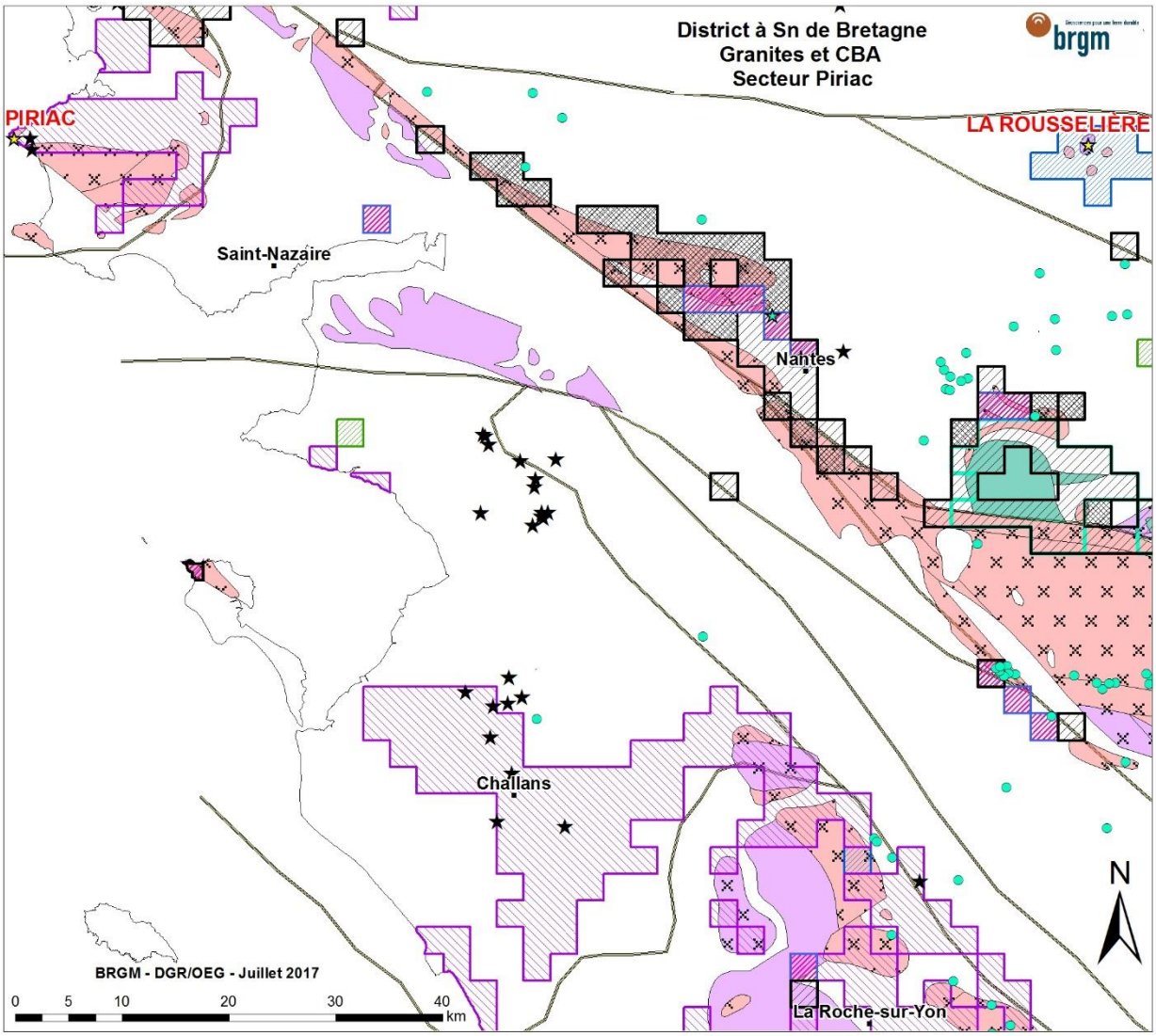


Figure 41 : Zones favorables, secteur de Piriac, la Rousselière.

Ce secteur est couvert par les zones favorables de type « Piriac » et d'une partie de celles correspondant à la Rousselière. Les anomalies localisées le long du cisaillement sud-armoricain de part et d'autre de Nantes seront décrites dans le secteur sud-ouest.

Les cellules favorables de type « Piriac » couvrent 2 grandes surfaces en CBA par CAH, mais disparaissent en ranking car elles correspondent à des formations (GRES4 et MCSH4) qui couvrent de grandes surfaces en Bretagne et qui sont donc très défavorisées par le calcul de ranking. Les plus intéressantes sont centrées sur les granites de Guérande et de la Roche-sur-Yon. Les cellules essentiellement composées de MCSH4, autour de Challans, peuvent être considérées comme présentant un faible intérêt malgré la présence de placers.

Les cellules de type « la Rousselière », qui sont présentes à proximité du gîte et qui s'étendent aussi dans la partie orientale du secteur central de la Bretagne, sont caractérisées par la présence systématique de filons microgranites et de quelques petits pointements de granites carbonifères dans des encaissants de type grès et/ou schistes.

Zones favorables du secteur sud-est

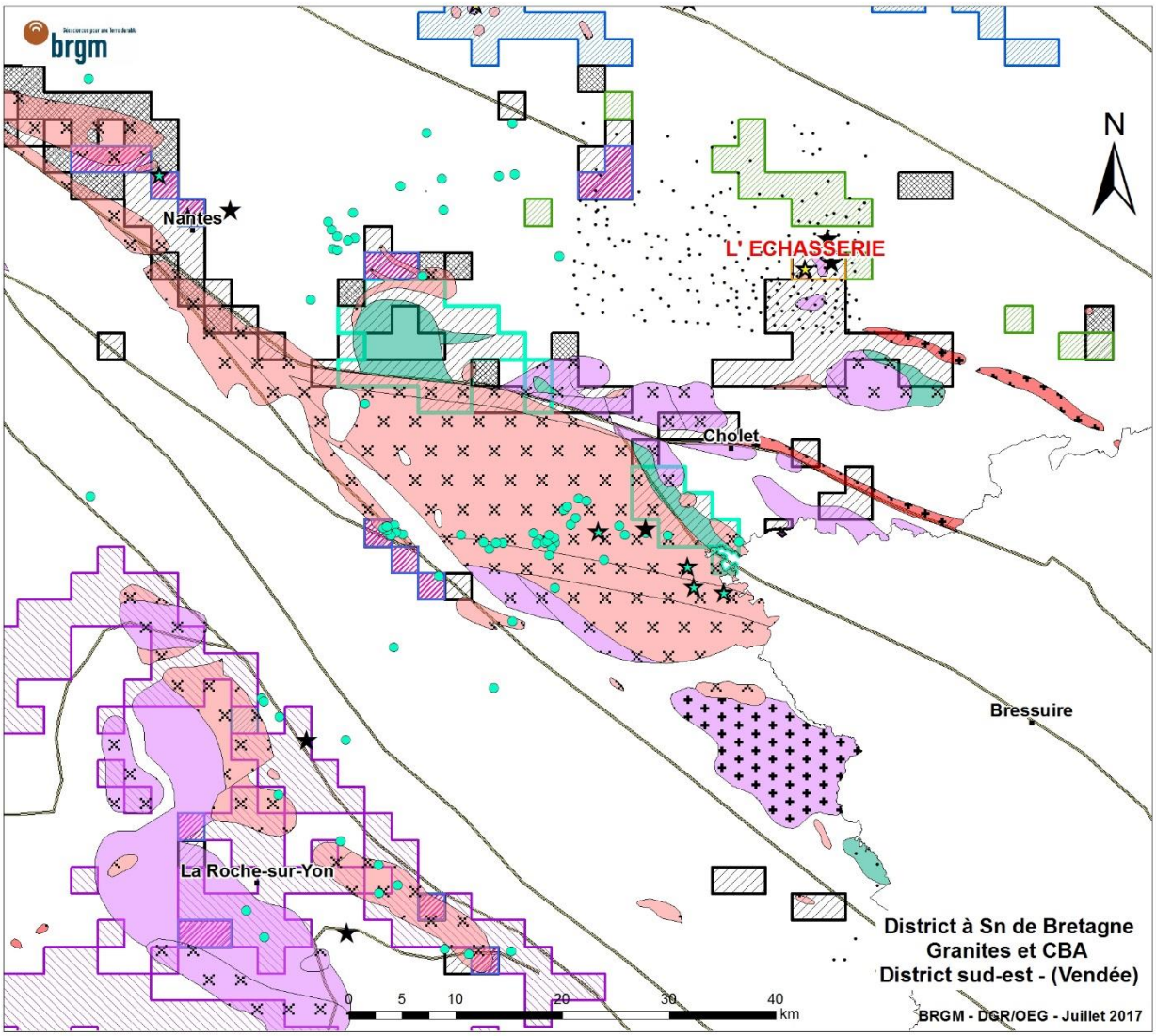


Figure 42 : Zones favorables, secteur sud-est.

Dans le secteur sud-est on s'intéressera surtout à la périphérie du granite de Mortagne (qui contient aussi des anomalies géochimiques à Sn et quelques placers à cassitérite) avec 2 types de cellules favorables :

- une de type « Lanmeur », qui s'explique par la présence d'un gabbro et d'un granite carbonifère (granite de Mortagne). Le contexte lithologique est équivalent à celui de Lanmeur même s'il ne peut pas s'agir de ce volcanisme en ce secteur, mais plus probablement d'un volcanisme un peu plus précoce (320 Ma) ;
- les autres cellules, localisées autour du granite ou sur le cisaillement, sont de type « Abbaretz » ou « Quilly » ;
- les 2 cellules de type « l'Échasserie » (GRAN4, MCGR4, MCSH2) sont confinées autour de ce gîte associé à de petits pointements du granite de Chemillé. L'attribution de ce granite à un événement ordovicien est discutable et si son âge est carbonifère, les cellules deviendraient de type « Quily - la Villeder ».

Zones favorables du secteur centre

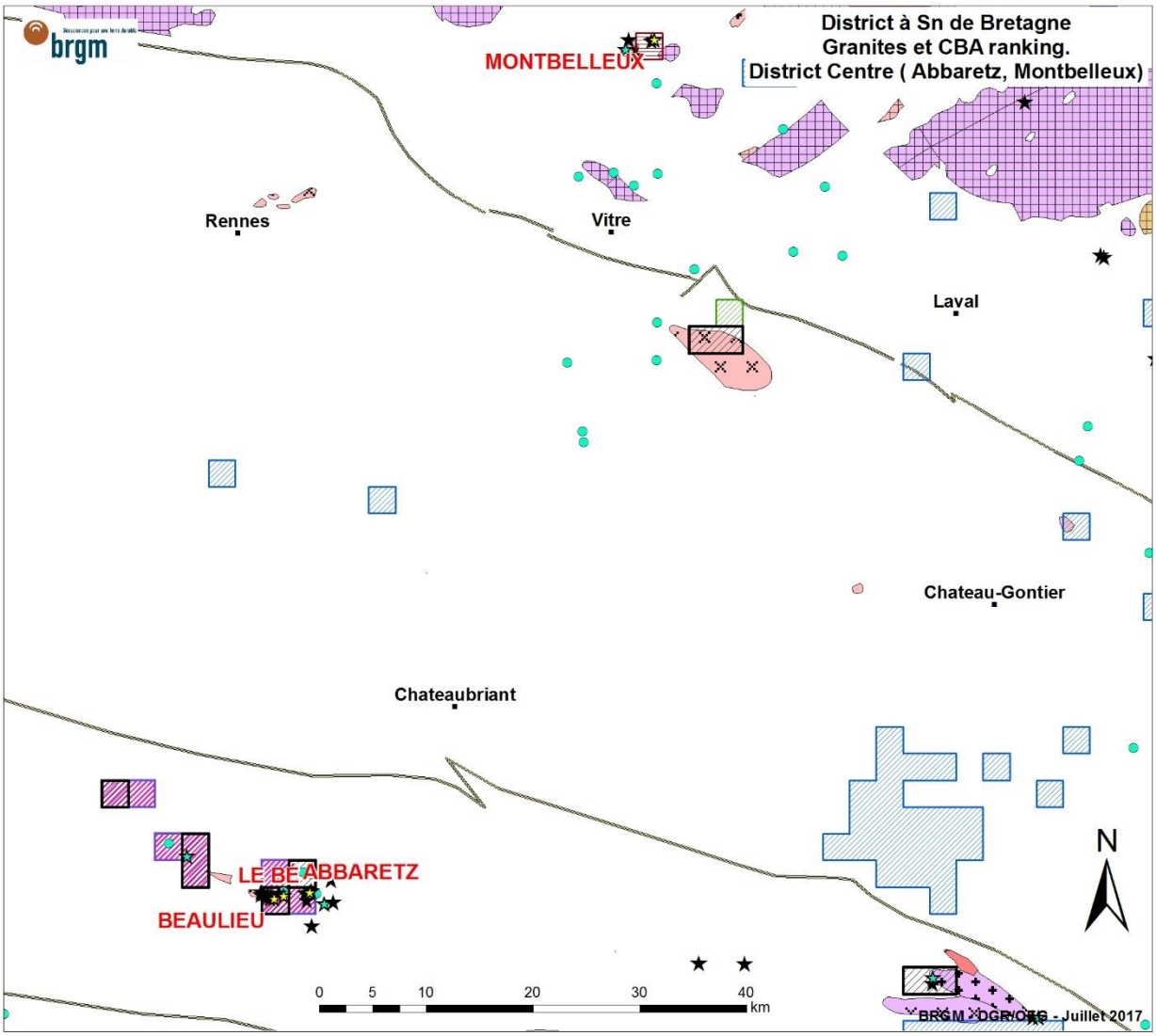


Figure 43 : Zones favorables, secteur centre.

La zone centrale de la Bretagne est globalement vide de zones favorables à la présence de gîtes à étain, sauf autour et à l'ouest des gîtes d'Abbaretz / le Bé / Beaulieu (signature de type FPEGM, GRAN7, GRES4, SCSH4, SCSH5) associés à des placers à cassitérite et à quelques points de géochimie à plus de 50 ppm Sn.

On y trouve aussi un groupe de cellules de type « la Rousselière » associées à des occurrences de microgranites, mais ces zones n'ont pas été couvertes par l'Inventaire et ne présentent donc pas d'autres critères de favorabilité.

On peut aussi noter la présence de quelques cellules favorables autour des petits granites de Le Pertre et de Bécon.

Zones favorables du secteur Montbelleux

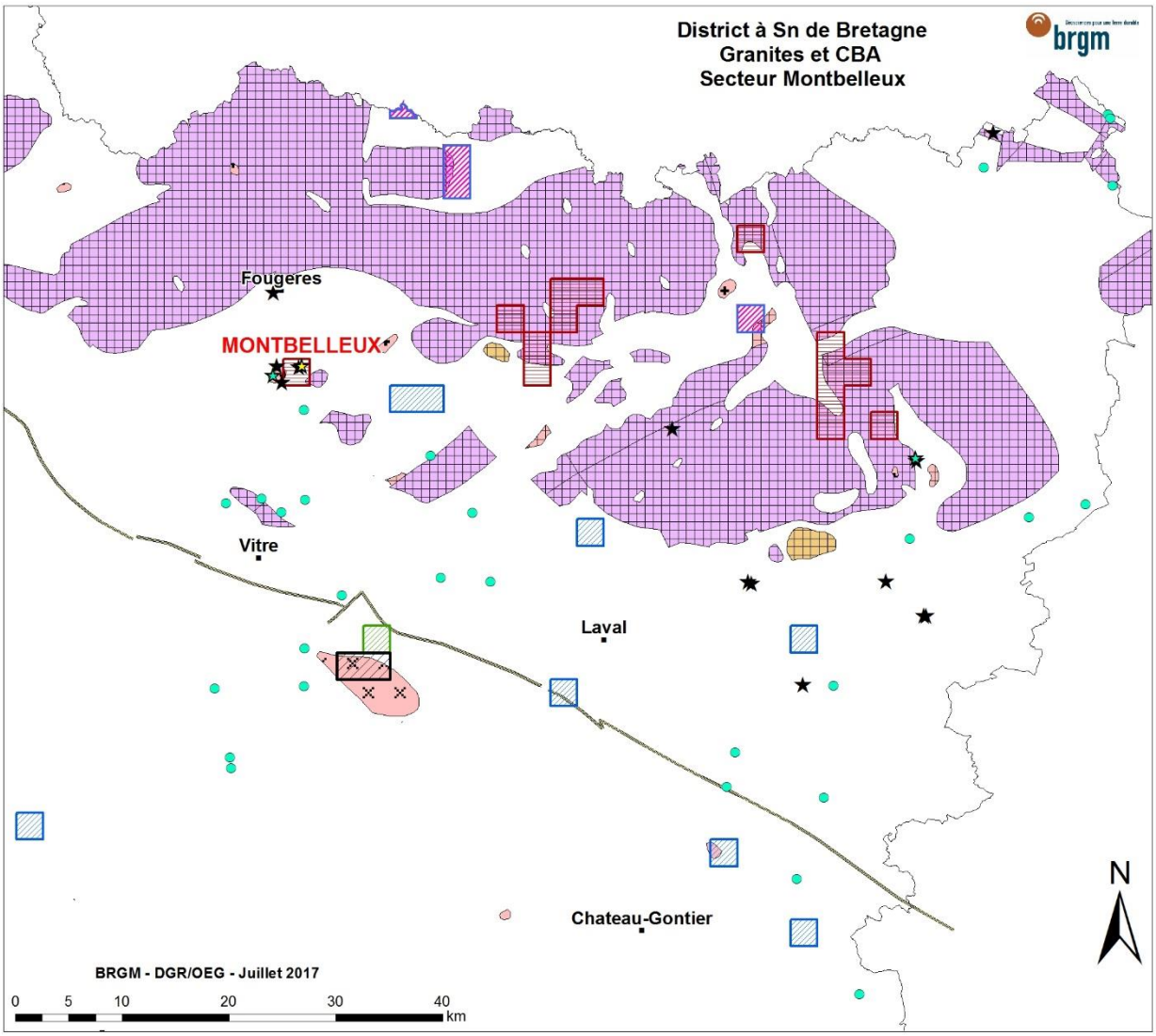


Figure 44 : Zones favorables, secteur de Monbelleux.

Le gisement de Montbelleux génère 15 cellules favorables d'association FPEGM, GRAN2, GDIO2, KORN. C'est le seul gîte qui soit spatialement associé à des granites cambro-ordoviciens. La présence de cornéeennes et de filons de pegmatite est systématique dans les cellules de ce type, qui sont superposées aux massifs granitiques de Fougères, Jublains et Izé. Quelques placers et anomalies à Sn > 50 ppm sont présentes dans la zone mais, sans liaison évidente avec les cellules de type Montbelleux. Ces cellules orientales par rapport au gîte connu pourraient justifier d'un contrôle terrain.

3. Conclusion

L'étain (de symbole Sn et de numéro atomique 50) est un métal mou de couleur gris argent très malléable et qui fond à basse température (232 °C).

L'étain est principalement utilisé pour les soudures dans l'électronique et l'industrie (48,3 % de sa consommation en 2014), mais également dans la chimie (stabilisation du PVC, catalyseurs, pigments, etc., 15,5 %), la fabrication de fer-blanc (emballages, boîtes de conserve, 14,7 %), et plus marginalement, dans la fabrication des batteries plomb-acide (7,3 %), certains alliages (bronze, laiton, 5,2 %), les verres flottés (2 %) et d'autres usages (7,0 %) tels que les capsules de vin et de spiritueux ou les plaquettes de frein (BRGM, 2017).

En 2017, l'étain n'est pas jugé comme substance critique pour l'Union Européenne. Malgré une forte importance économique du fait de ses nombreux usages, les risques pesant sur les approvisionnements sont jugés modérés en raison de la multiplicité des producteurs dans le monde et en Europe en particulier (Portugal, Espagne, Cornouailles anglaise, Suède) (European Commission, 2017a et 2017b).

Les types de gisement présents en Bretagne sont les suivants :

1) Les filons, veines, stockwerks et greisens associés à des intrusions de granites, exemples : La Villeder, Montbelleux, Abbaretz.

2) Les granites à métaux rares, exemple : Tréguennec.

3) Les porphyres et intrusions subvolcaniques, exemples : la Rousselière, Lanmeur, (Beauvain), l'Échasserie.

4) Les pegmatites LCT, exemples : Saint-Sébastien, Baud, Le Guilvinec.

5) Les stockscheiders, exemples : Penfeuteun, Scaer.

6) Les pipes bréchiques, par exemple Kervenguy (essentiellement à tungstène).

Les différentes approches de prédictivité utilisées dans cette étude (Weight of Evidence, CBA par CAH et classement avec un jeu de données comprenant indices à étain, une carte géologique synthétisée issue des cartes géologiques au 1/50 000 et des données aéromagnétiques et gravimétriques) ont globalement des résultats convergents et mettent en évidence des zones avec un fort potentiel de découverte.

L'analyse des résultats de la prédictivité montre que plusieurs secteurs seraient à explorer en priorité.

Les résultats conduisent à proposer en priorité une recherche de ressources en étain sur **le pourtour du massif de Pontivy-Langonnet, les pourtours est et nord des massifs de Mortagne et de Partenay et le flanc nord et le prolongement nord-est du massif de Saint-Renan-Kersaint**. Toutefois, certains gisements qui ne génèrent pas de groupement significatif de cellules favorables (Montbelleux, Abbaretz) ne doivent pas être négligés et justifieraient des campagnes d'exploration complémentaires.

Les résultats obtenus sur les districts ayant des réserves importantes ne mettent pas en évidence de vastes zones prospectives, ce qui conduit à recommander **la recherche de satellites dans l'environnement immédiat des gisements connus pour les districts d'Abbaretz, de Montbelleux, de Lanmeur et de Tréguennec**.

4. Bibliographie

Allon A., Brosset R. (1983) - Inventaire du territoire métropolitain. Les minéralisations tungstifères de l'Échasserie (Maine-et-Loire). État des connaissances au 30.04.1983. Division minière Massif armoricain. Rapport BRGM 83 RDM 0191 FE. 23 p., 21 ann.

Allon A., Le Fur Y. (1979) - Inventaire du territoire métropolitain. Les minéralisations polymétalliques de la Rousselière (Loire-Atlantique). Note synthétique. État des connaissances 30.04.1979. Rapport BRGM 79 RDM 026 FE. 26 p., 28 ann.

Ballèvre M., Bosse V., Dabard M.P., Ducassou C., Fourcade S., Paquette J.L., Peucat J.J., Pitra P. (2013) - Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche. *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne* D (10-11): 5-96.

Ballouard C., Boulvais P., Poujol M., Gapais D., Yamato P., Tartèse R. & Cuney M. (2015) - Tectonic record, magmatic history and hydrothermal alteration in the Hercynian Guérande leucogranite, Armorican Massif, France. Lithos 220-223, 1-22.

Ballouard C., Poujol M., Boulvais P., Mercadier J., Tartèse R., Venneman T., Deloule E., Jolivet M., Kéré I., Cathelineau M. & Cuney M. (2017) - Magmatic and hydrothermal behavior of uranium in syntectonic leucogranites: The uranium mineralization associated with the Hercynian Guérande granite (Armorican Massif, France). Ore Geology Reviews 80, 309-331.

Bonham-Carter G.F. (1994) - Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS: Pergamon, Oxford, 398 pp.

Bonijoly D., Perrin J., Truffert C. et Asfirane F. (1999) - Couverture géophysique aéroportée du Massif armoricain. Magnétisme et radiométrie spectrale. Rapport BRGM, RR-40471-FR, BRGM, Orléans, 75 p.

BRGM (1982) - Ressources minières françaises. Tome 12. Les gisements d'étain (situation en 1981). Éude réalisée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières sous l'égide du Comité de l'Inventaire des ressources minières métropolitaines. Rapport BRGM RR-41430-FR-12, 155 p.

BRGM (2017) - Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - L'étain - janvier 2017, 8 p., disponible en ligne sur www.mineralinfo.fr

Callier L. (1989) - Le porphyre à molybdène d'âge hercynien de Beauvain en Basse Normandie. Chroniques de la Recherche Minière 496, 3-23.

Cassard D., Bertrand G., Billa M., Serrano J.J., Tourlière B., Angel J.M., and Gaál G. (2015) - ProMine Mineral Databases: New Tools to Assess Primary and Secondary Mineral Resources in Europe. In: Pär Weihed (Ed.), *3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe*, 9–58. Mineral Resource Reviews. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-17428-0_2.

Černý, P., Blevin P.L., Cuney M., London D. (2005) - Granite-Related Ore Deposits. *In:* Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., and Richards J.R. (Editeurs.). Economic Geology - One Hundredth Anniversary Volume 1905-2005, pp. 337–370. Littleton, CO, USA.

Černý, P., Ercit, S.T. (2005) - The Classification of Granitic Pegmatites Revisited. The Canadian Mineralogist 43, 2005-2026.

Chauris, L., Houlgatte, E. (1988) - Un gisement pliocène de cassitérite alluvionnaire : La Hye. Chroniques de la Recherche Minière, 492, pp 41-50.

Chauris L., Lulzac Y., Cotten J. (1989 - Une lame de granite albitique tardi-cadomienne : le gisement stannowolframifère de Montbelleux (Massif armoricain, France). Chroniques de la Recherche Minière, 496, 25-39.

Chauris L. & Marcoux E. (1994) - Metallogeny of the Armorican Massif. In: Pre-Mesozoic Geology in France and Related Areas. In: Keppie J.D. (Ed), Springer-Verlag, Berlin pp. 243-264.

Ducassou C., Poujol M., Hallot E., Bruguier O. & Ballèvre M. (2011) - Petrology and geochronology of the high-K calc-alkaline Mésanger magmatism (Armorican massif, France): a ca. 320 Ma old volcano-plutonic association. Bulletin de la Société Géologique de France, 182, 467-477.

European Commission (2017a) - Study on the review of the list of critical raw materials. Final report. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (European Commission). 92 p. doi:10.2873/876644.

European Commission (2017b) - Study on the review of the list of critical raw materials. Non-critical raw materials factsheets. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (European Commission). pp. 435-448. doi:10.2873/49178.

Gassot, L. (2017) - Réalisation d'un système d'information géographique de la mine de Montbelleux. Rapport de stage de Licence Terre et Environnement. Université d'Orléans, 27 p.

Gatinel P. (2011) - Hydrothermalisme d'Abbaretz (Loire-Atlantique). Rapport de stage de recherche (T.E.R.). Master de Sciences de la Terre et de l'Environnement, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, 24 p., 1 ann.

Gloaguen E., Dain Y. (2001) - L'occurrence stannifère de la Villeder dans la province W-Sn armoricaine. Le Règne Minéral, hors-série VII, 6-25.

Guigues, J., Devismes, P. (1969) - La prospection minière à la batée dans le Massif armoricain. Mémoires du BRGM Vol. 71. BRGM, Orléans, France, 171 p.

Jébrak M., Marcoux E. (2008) - Géologie des ressources minérales, Géologie Québec, Ressources naturelles et faune Québec, 667 p.

Leistel J. M., Marcoux E., Thiéblemont D., Quesada C., Sánchez A., Almodóvar G.R., Pascual E., Sáez R. (1997) - The Volcanic-Hosted Massive Sulphide Deposits of the Iberian Pyrite Belt Review and Preface to the Thematic Issue. Mineralium Deposita 33, no. 1-2, pp 2-30.

Lulzac Y. (1986) - Inventaire du territoire métropolitain. Les minéralisations filoniennes à étain et cuivre de Lanmeur (Finistère). Rapport BRGM 86-DAM-010-OP4, BRGM, Orléans, 51 p.

Lulzac Y. (2012) - L'étain armoricain. Où le trouve-t-on ? Où l'a-t-on exploité ? Mines & Carrières hors-série 196, 17-56.

Lulzac Y., Apolinarski F. (1986) - Les minéralisations à étain, tantale et lithium de Tréguennec (Finistère). Rapport BRGM, 86 DAM 011 OP4, 18 p.

Martelet G., Pajot G., Debeglia N. (2009) - Nouvelle carte gravimétrique de la France; RCGF09 - Réseau et Carte Gravimétrique de la France. Rapport BRGM RP-57908-FR, BRGM, Orléans, 26 p.

Mathey C. (2017) - Le gisement W-Sn de Montbelleux (Ille-et- Vilaine, France), bloc cadomien du Massif armoricain : évolution paragénétique et nouvelles données radio-géochronologiques ; implication sur le modèle métallogénique. Rapport de stage de Master 2 ENAG, Université d'Orléans, ENAG/MFE-094-FR-2017, 58 p.

Picault M. (2010) - Caractérisation pétro-structurale et minéralogique d'un gisement magmatique à lithium - métaux rares. Rapport de stage de Master 1, Université d'Orléans, 39 p.

Raimbault L., Cuney M., Azencott C., Duthou J.L. (1995) - Geochemical Evidence for a Multistage Magmatic Genesis of Ta-Sn-Li Mineralization in the Granite de Beauvoir, French Massif Central. Economic Geology, 90, 548–576.

Robb L. (2005) - Introduction to ore-forming processes. Wiley-Blackwell, 384 p.

Rudnick R.L., Gao S. (2003) - Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3:1-64. Elsevier Ltd.

Serranti S., Ferrini V., Masi U., Cabri L.J. (2002) - Trace-Element Distribution in Cassiterite and Sulfides from Rubané and Massive Ores of the Corvo Deposit, Portugal." The Canadian Mineralogist 40, no. 3, pp 815–835. doi:10.2113/gscanmin.40.3.815.

Tartèse, R., Boulvais, P. (2010) - Differentiation of Peraluminous Leucogranites 'en Route' to the Surface. Lithos, 114: 353–368. doi:10.1016/j.lithos.2009.09.011.

Tartèse, R., Poujol, M., Ruffet, G., Boulvais, P., Yamato, P., Košler, J. (2011a) - New U-Pb Zircon and $^{40}Ar/^{39}Ar$ Muscovite Age Constraints on the Emplacement of the Lizio Syn-Tectonic Granite (Armorican Massif, France). Comptes Rendus Geoscience 343, no. 7, 443-453. doi:10.1016/j.crte.2011.07.005.

Tartèse, R., Ruffet, G., Poujol, M., Boulvais, P., Ireland, T.R. (2011b) - Simultaneous Resetting of the Muscovite K-Ar and Monazite U-Pb Geochronometers: A Story of Fluids." Terra Nova 23, no. 6, 390–398. doi:10.1111/j.1365-3121.2011.01024.x.

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. doi:10.1016/j.cageo.2015.01.012.

Trautmann F., Monnot M., Lemaire D., Cagnet-Mawhin M.P. (1987) - Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille 420 Nozay. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Vallance, J., Cathelineau, M., Marignac, C., Boiron, M.-C., Fourcade, S., Martineau, F., Fabre, C. (2001) - Microfracturing and Fluid Mixing in Granites: W-(Sn) Ore Deposition at Vaulry (NW French Massif Central). Tectonophysics 336, no. 1-4: 43-61.

Vidal P. (1980) - L'évolution polyorogénique du Massif armoricain : apport de la géochronologie et de la géochimie isotopique du strontium. *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*., n° 21.

Annexe 1

Liste des fichiers numériques sur le CD-ROM

Tous les fichiers sont en coordonnées projetées RGF Lambert 93 (EPSG 2154).

Répertoire \ArcGIS_Explorer_Desktop_Install :

Fichier d'installation du visualisateur gratuit ArcGIS Explorer à installer (version windows uniquement) pour ouvrir les fichiers shapefile.

Répertoire \SIG :

Nom du fichier	Description	Type
Allu_Cassiterite.shp	Géochimie alluvionnaire avec résultats positifs en cassitérite.	Points
Armorique.shp	Emprise de la zone étudiée (dép. 29, 22, 56, 35, 44, 85, 49, 53)	Polygones
Carte_Geologique.shp	Carte géologique harmonisée (dép. 29, 22, 56, 35, 44, 85, 49, 53)	Polygones
CBA_CAH_Favo_Sn.shp	Classification des cellules de CBA par CAH à 250 classes	Polygones
CBA_RNKG_FRatio_Sup10.shp	Classement par rapport de fréquences sur les formations géologiques. Sélection des cellules > 10.	Polygones
CBA_RNKG_GPH_FRatio.shp	Classement par rapport de fréquences sur les formations géologiques et la géophysique. Sélection des > 10.	Polygones
CBA_RNKG_Litho_FRatio.shp	Classement par rapport de fréquences sur les formations géologiques. Sélection des cellules > 10.	Polygones
Failles_majeures.shp	Failles majeurs sur l'emprise de la zone étudiée	Polylignes
GCH_Snsup50.shp	Points de géochimie sédiment de ruisseau de la campagne Inventaire avec valeurs significatives en étain (>50 ppm)	Points
Geologie_WoE.shp	Formations géologiques à favorabilité Sn classifiée par la méthode du Weight of Evidences	Polygones
Granites_1M_Age.shp	Caractéristiques des granites et ages, d'après la carte géologique au 1/1 000 000	Polygones
Indices_Sn_Majeurs.shp	Principaux types de gisements d'étain à signatures recherchées	Points
Indices_Sn_Promine.shp	Gisements et indices d'étain issus de la base ProMine	Points
Placers_Sn.shp	Placers à étain	Points
Secteurs_zoomes.shp	Emprise des secteurs détaillés	Polygones
Villes.shp	Principales villes dans la zone d'étude	Points

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