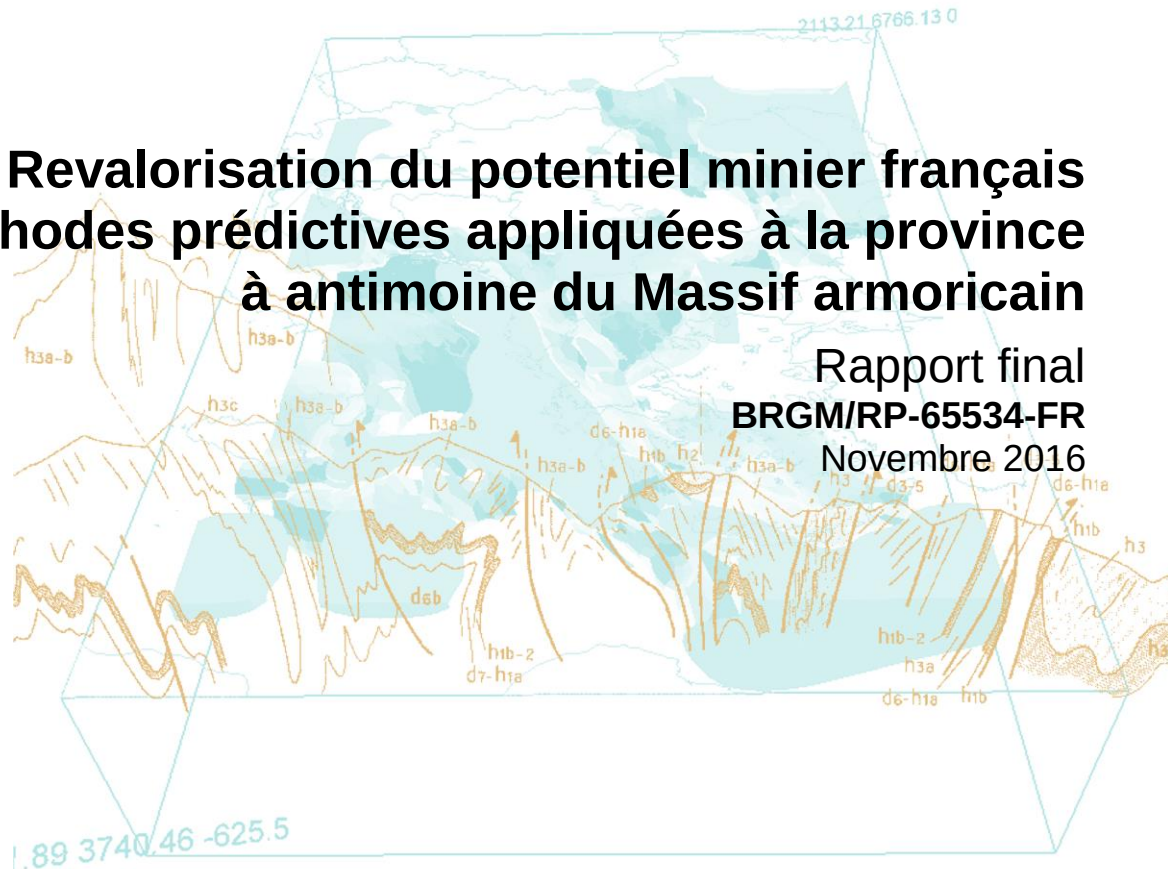




Revalorisation du potentiel minier français Méthodes prédictives appliquées à la province à antimoine du Massif armoricain

Rapport final
BRGM/RP-65534-FR
Novembre 2016



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

Rapport final
BRGM/RP-65534-FR
Novembre 2016

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

E. Gloaguen, B. Tourlière
Avec la collaboration de
JM. Angel

Vérificateur :

Nom : Jean Jacques Dupuy
Fonction : Correspondant APP
Date : novembre 2016

Signature :



Approbateur :

Nom : Jean Claude Guillaneau
Fonction : Directeur de DGR
Date : novembre 2016

Signature :



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



Mots-clés : Antimoine ; Massif Armoricaïn ; Favorabilité ; Prédicativité ; Weight of Evidence ; Cell Based Association

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

Gloaguen E., Tourlière B., Angel J.M. (2016) - Revalorisation du potentiel minier français Méthodes prédictives appliquées à la province à antimoine du Massif armoricaïn. Rapport final. BRGM/RP-65534-FR, 55 p., 23 fig., 13 tabl., 1 ann., 1 CD.

Synthèse

L'antimoine est un élément chimique présent à des teneurs très faibles de 0,4 à 0,2 ppm dans la croûte terrestre. L'antimoine dans la croûte continentale est à priori essentiellement porté par des sulfures et des alliages dispersés dans les roches. Les processus hydrothermaux et tectoniques qui conduisent à la formation de gisements à proximité de la surface sont capables de concentrer très fortement l'antimoine (x 150 000 environ) pour atteindre des teneurs économique de l'ordre du pourcent. D'un point de vue métallogénique, 5 types de gisements d'antimoine sont actuellement proposés :

- i) remplacement dans les carbonates qui correspond aux gisements à morphologie tabulaires ;
- ii) veines épithermales à or-antimoine ;
- iii) veines associées aux intrusions de granites réduits ;
- iv) veines polymétalliques à métaux de base et
- v) sources chaudes.

Les deux premiers types représentent environ 80% du stock métal et constituent donc les principales cibles économiques. La comparaison des différents types de gisements d'antimoine montre de nombreux points communs qui ont vraisemblablement un contrôle majeur sur la formation de la minéralisation et permet de proposer les métallogènes suivants :

- la proximité de grande zones de failles décrochantes ;
- la localisation dans les niveaux les plus superficiels de la croûte ;
- le contrôle géochimique (piège ?) fréquemment joué par les carbonates expliquant probablement les morphologies stratoïdes ;
- la présence d'un moteur thermique (intrusions ou volcanisme acide/basique) visible (dykes, intrusions, champs géothermique) ou supposé ;
- la position relativement « arrière » par rapport à une zone de subduction et un arc continental.

Le Massif armoricain est la première province pour antimoine de France que cela soit en termes de tonnage produit (62 190 t Sb métal) ou de réserves connues (32 095 t). Il contient un minimum de quatre districts (La Lucette *s.l.*, Vendée *s.l.*, Semnon *s.l.*, Quimper *s.l.*), le premier étant un district de classe mondiale. Tous ces districts, à part Le Semnon sont portés par des veines de quartz localisées à proximité des grands accidents nord et sud armoricain. Ces filons se sont formés à faible profondeur en contexte de déformation fragile. Les veines sont en général polyphasées avec un dépôt ultime de stibine massive qui constitue la minéralisation économique. Les stades antérieurs contiennent de petites quantités de sulfures de fer-arsenic et à métaux de base, parfois également de l'or et/ou du tungstène sous la forme de scheelite. Une particularité intéressante est l'existence du gisement stratoïde à stibine seule de Rosnoën, localisé à l'ouest du bassin de Châteaulin. La présence de ce gisement découvert et reconnu par le BRGM suggère la possibilité de découvrir d'autres gisements stratoïdes dans ce bassin, sachant que ce type de gisement fournit mondialement les tonnages les plus importants.

Ces éléments justifient donc la recherche de nouvelles cibles pour antimoine dans cette vaste province antimonifère 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 et de la Cell Based Association avec plusieurs variantes ont été réalisées. L'intérêt d'associer des données géophysiques (magnétisme & gravimétrie) a également été testé avec succès.

Les résultats (exemple figure 1 ci-dessous) conduisent à proposer en priorité une recherche de ressources en antimoine sur le district du Semnon (Ille-et-Vilaine), l'ouest et le sud du bassin de Châteaulin (gisements stratoïdes de type Rosnoën), le long des cisaillements nord armoricain, des monts d'Arrée et de la branche nord du cisaillement sud armoricain. Ces approches montrent aussi la présence de vastes zones à potentiel d'exploration dans le voisinage des gros districts antimonifères de La Lucette (Mayenne) et de Vendée.

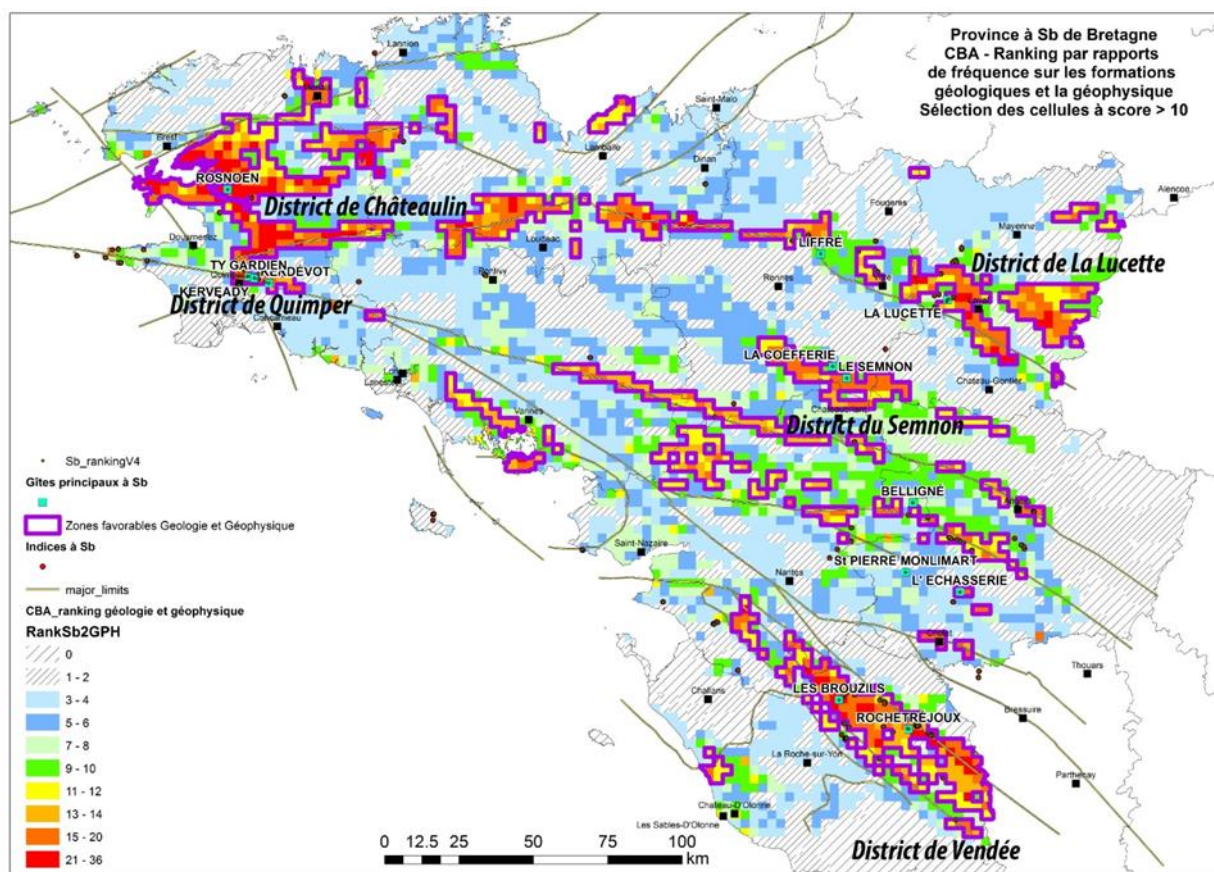


Figure 1 : Sélection des zones les plus favorables à la présence de minéralisations à antimoine estimées par classement sur CBA en utilisant des paramètres lithostratigraphiques et géophysiques.

Sommaire

1. Généralités sur l'antimoine.....	9
1.1. PORTEURS MINÉRALOGIQUES DE L'ANTIMOINE.....	11
1.2. TYPES DE GISEMENTS PORTEURS D'ANTIMOINE	14
1.3. MÉTALLOTECTES	19
1.4. LES DISTRICTS À ANTIMOINE DU MASSIF ARMORICAIN.....	19
2. Etude de favorabilité à partir des formations géologiques	22
2.1. CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL	22
2.2. CARTE GÉOLOGIQUE SYNTHÉTISÉE	23
2.3. WOE (WEIGHT OF EVIDENCE).....	25
2.3.1. Principes.....	25
2.3.2. Interprétation.....	26
2.4. CBA (CELL BASED ASSOCIATION)	28
2.4.1. CBA par CAH.....	28
2.4.2. CBA par signature exacte	32
2.4.3. Classement sur CBA.....	34
2.5. UTILISATION DE DONNÉES GÉOPHYSIQUES POUR AMÉLIORER LES RÉSULTATS DE FAVORABILITÉ.....	36
2.6. SÉLECTION DES ZONES FAVORABLES.....	40
3. Intersection entre zones favorables et CBA/CAH	42
3.1. A L'ÉCHELLE DE LA PROVINCE.....	42
3.2. A L'ÉCHELLE DU DISTRICT	43
4. Conclusion.....	49
5. Références.....	51

Liste des figures

Figure 1 : Sélection des zones les plus favorables à la présence de minéralisations à antimoine estimées par classement sur CBA en utilisant des paramètres lithostratigraphiques et géophysiques.	4
Figure 2 : Résultats d'interactions expérimentales entre fluides chauds et roches montrant la variation du pourcentage de lessivage des constituants Sb, S, As et Se à partir du grauwacke P23556 en fonction de la température du fluide (Ewers, 1977).	11
Figure 3 : Carte et coupe géologique du gisement d'Xikuangshan (Yang et al., 2006 et références incluses)	17
Figure 4 : Carte géologique de la ceinture de Murchison avec les minéralisations de l'Antimony Line et modèle métallogénique à deux stades expliquant les minéralisations à antimoine, Jaguin (2012) et références incluses.	18
Figure 5 : Principaux districts et indices à Antimoine du Massif Armoricain (source des données : base ProMine, Cassard et al., 2015), géologie simplifiée : rose = granites, granitoïdes ; marron : roches sédimentaires et métamorphique..	20
Figure 6 : Carte et coupe des principaux domaines géologique du Massif Armoricain (Ballèvre et al., 2013)	22
Figure 7 : Carte géologique synthétisée de Bretagne à partir des cartes harmonisées au 1: 50 000 et localisation des principaux indices et gisements.	25
Figure 8 : Résultats du WoE pour Sb en Bretagne	27
Figure 9 : Cellules appartenant à un groupe de CAH correspondant à un gîte à Sb.....	30
Figure 10 : Caractérisation des groupes de CAH correspondant à un gîte à Sb. Quand 2 gîtes sont regroupés c'est qu'ils appartiennent à la même famille de CAH (ex : Rochetréjoux et les Brouzils situés dans le district de Vendée).	31
Figure 11 : Cellules ayant exactement la même association lithologique qu'une cellule avec un gîte à Sb	34
Figure 12 : Classement sur CBA à partir des rapports de fréquence sur les formations seules	36
Figure 13 : Carte des anomalies géophysiques de Bretagne (Interprétation de Pochon et al. 2016). .	37
Figure 14 : CBA par signature exacte par cellules contenant un gîte intégrant les formations géologiques et les anomalies géophysiques.	38
Figure 15 : Classement sur CBA intégrant les données lithologiques et géophysiques.....	39
Figure 16 : Sélection des zones les plus favorables à la présence de minéralisations à Sb estimées par classement sur CBA (Valeurs > 10) en utilisant des paramètres lithostratigraphique et géophysiques.	40
Figure 17 : valeurs décroissantes du ramnking pour les cellules contenant au moins un indice.	40
Figure 18 : Intersection entre les zones favorables définies par classement et les cellules issues de la CBA par CAH.	42
Figure 19 : Weight of Evidence et intersection entre les zones favorables définies par classement et les cellules issues de la CBA par CAH.	43
Figure 20 : Zones favorables du secteur du Semnon	44
Figure 21 : Zone favorable du secteur Rosnoën-Quimper	45
Figure 22 : zones favorables dans le district de Vendée.	46
Figure 23 : Zones favorables du secteur de La Lucette	47

Liste des tableaux

Tableau 1 : Concentrations moyennes en antimoine (en ppm) de quelques lithologies de référence.	10
Tableau 2 : Répartition des porteurs minéralogiques de l'antimoine en termes de grandes familles minéralogiques, sur un total de 264 espèces connues (source des données : webmineral.com). L'antimoine est majoritairement porté par des sulfures/sulfosels (48 %), des oxydes ou composés à oxygène (34 %) et des alliages (16 %). La présence d'antimoine dans des silicates (2 %) n'est observée que dans des curiosités minéralogiques extrêmement rares (chapmanite, orebroïte et holtite).	12
Tableau 3 : Liste des espèces minérales contenant plus de 70 % d'antimoine et en gras principales espèces minérales primaires ou secondaires constituant les minerais d'antimoine exploités. Modifié d'après Schwarz-Schampera (2014) et données de webmineral.com	13
Tableau 4 : Caractéristiques clés et exemples des 5 types de gisements d'antimoine. Complété d'après Schwarz-Schampera (2014).	15
Tableau 5 : Dimensions et teneurs typiques des différents types de gisements d'antimoine, modifié d'après les données du BGR (Schwarz-Schampera, 2014).	16
Tableau 6 : Production et ressource des districts à antimoine du Massif Armoricain. Ces chiffres actualisés issus des données d'archives (Projet CADI) tiennent compte des travaux d'exploration et d'exploitation menés par le BRGM dans différents syndicats entre 1981 et 1992.	21
Tableau 7 : liste des codes stratigraphiques	23
Tableau 8 : liste des codes lithologiques.....	24
Tableau 9 : Résultats du WoE indices à Sb vs géologie.....	28
Tableau 10 : associations majoritaires présentes dans les groupes de CAH associés à un gîte à Sb. On remarque que toutes les associations lithologiques encaissant des gisements contiennent en leur sein un pourcentage significatif de dykes de dolérites, lithologie généralement peu représentée pour être listée dans l'association lithologique principale.	32
Tableau 11 : Associations exactes présentes dans les cellules contenant un gîte à Sb	33
Tableau 12 : Tableau des rapports de fréquence (FRatio) des formations associées aux minéralisations à Sb.....	35
Tableau 13 : Signatures exactes des cellules étalon pour la lithologie et les anomalies géophysiques (Mag : anomalie magnétique, Gravlourd : anomalie gravimétrique lourde)	37

1. Généralités sur l'antimoine

L'antimoine (de symbole Sb) appartient à la série des métalloïdes c'est-à-dire qu'il a des propriétés intermédiaires entre métaux et non métaux et possède la particularité d'avoir un point de fusion très bas, à 630,63 °C (Grund *et al.*, 2006). L'antimoine est un élément modérément sidérophile qui se comporte dans les processus magmatiques comme un élément lithophile et modérément incompatible. L'antimoine a ainsi la capacité d'exister sous la forme de gaz comme le trihydruure d'antimoine SbH_3 . Dans les processus hydrothermaux, l'antimoine est un élément très volatile et à caractère chalcophile qui cristallise sous la forme de sulfures et/ou de sulfosels entre 350 et 150 °C. C'est un élément qui est relativement rare car sa concentration moyenne dans la croûte continentale supérieure est de 0,4 ppm ; 0,28 ppm dans la croûte continentale moyenne et 0,10 ppm dans la croûte continentale inférieure (Rudnick et Gao, 2003). Le facteur d'enrichissement pour conduire à un gisement à teneur de l'ordre de 1 à 3 % est donc gigantesque, d'environ 150 000, ce qui suggère immédiatement un processus d'extraction à très haut rendement depuis les lithologies sources où les teneurs sont au mieux de l'ordre de la dizaine de ppm, plus généralement inférieures au ppm.

Le comportement géochimique de l'antimoine est similaire à celui de l'arsenic et du mercure ce qui explique leur coexistence fréquente dans les gisements. L'antimoine est d'ailleurs bien connu dans les eaux géothermales naturelles (ex : Yellowstone aux États-Unis), où il est en général accompagné d'arsenic, d'or et de mercure (White, 1981). Dans les fluides supra-crustaux au-delà de 200-250 °C l'antimoine serait transporté principalement sous la forme de $\text{Sb}(\text{OH})_{3(\text{aq})}$ (Zotov *et al.*, 2003 ; Obolenskiy *et al.*, 2007) et rarement sous la forme de $\text{H}_3\text{SbO}_{4(\text{aq})}$ avec une augmentation de la solubilité de l'antimoine liée à une augmentation de l'acidité de la solution (Casas *et al.*, 2004). Cependant dans des fluides réduits très acides riches en soufre, l'antimoine pourrait également être porté par des thiocomplexes comme $\text{HSb}_2\text{S}_{4(\text{aq})}^-$ contribuant à l'augmentation de la concentration en antimoine dans le fluide (Robb, 2005). À noter que la concentration en antimoine dans les fluides hydrothermaux dépend encore du potentiel rédox et de la teneur en chlore des fluides (Obolenskiy *et al.*, 2007). Dans les environnements volcaniques, l'antimoine comme de nombreux autres métaux, peut être transporté de façon tout à fait significative sous une forme gazeuse, un volcan comme l'Etna dissipant annuellement près de 9 tonnes d'antimoine (revue des estimations dans Henley et Berger, 2013). L'antimoine ainsi transporté par des gaz volcaniques peut précipiter dans des fractures en surface ou peut interagir avec des aquifères de surface.

Si le clark de l'antimoine montre une légère « affinité » supra-crustale plutôt que infra-crustale (0,4 versus 0,1 ppm, voir supra), il n'existe cependant pas de consensus sur les lithologies qui présentent les concentrations les plus élevées en antimoine, celles-ci variant suivant les lieux et les auteurs (tableau 1). Il faut également noter que du fait de son caractère volatile, l'antimoine est un élément chimique difficile à analyser, et donc fréquemment non analysé dans les publications.

Lithologie	Sb (ppm)	Références
Basaltes des rides medio-océaniques (MORB)	0,004-0,01	Pitcairn <i>et al.</i> , 2015 et références incluses
Basaltes altérés des rides medio-océaniques	0,1-1	Pitcairn <i>et al.</i> , 2015 et références incluses
Basaltes intraplaques (WPB)	0,02	Pitcairn <i>et al.</i> , 2015 et références incluses
Basaltes des îles océaniques (OIB)	0,283±0,115	Jochum et Hofmann, 1997
Basaltes	0,1-1,4	Robb, 2005
Serpentinites subductées (ex dunites)	0,02±0,01	Deschamps <i>et al.</i> 2013
Serpentinites subductées (ex harzburgite)	0,91±3,77	Deschamps <i>et al.</i> 2013
Serpentines abyssales (ex harzburgite refertilisée)	1,25±1,61	Deschamps <i>et al.</i> 2013
Grauwackes non métamorphiques (Nelle Zélande)	0,244±0,0264	Pitcairn <i>et al.</i> , 2010
Schistes	1,5	Li, 2000
Argiles hemipélagiques	0,96	Li, 2000
Granites	0,2	Li, 2000
Rhyolite	0,1-0,6	Robb, 2005
Andésite	0,2	Robb, 2005
Grès	0,6	Li, 2000
Calcaires	0,43	Li, 2000

Tableau 1 : Concentrations moyennes en antimoine (en ppm) de quelques lithologies de référence.

Par contre il semble que l'antimoine - comme As, S, Se et Hg - soit très efficacement lessivé par des circulations de fluides supracrustaux de basse à haute température (Ewers, 1977 ; figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En effet, à titre d'exemple, les résultats expérimentaux de Ewers (1977) montrent qu'il est possible d'incorporer 0,062 ppm (soit 62 ppb) d'antimoine dans un fluide à 100 °C et 0,186 ppm d'antimoine dans un fluide à 300 °C en seulement 72h d'interaction entre un fluide chaud et un grauwacke contenant seulement $0,310 \pm 0,022$ ppm d'antimoine (c'est-à-dire à peu près le clark en Sb de la croûte continentale supérieure), l'antimoine étant porté par de petites pyrites disséminées dans le grauwacke. Des études récentes ont montré que les pyrites d'origine sédimentaire-diagenétique issues de schistes noirs contiennent en moyenne de 10 à 100 ppm d'antimoine (Gregory *et al.*, 2015).

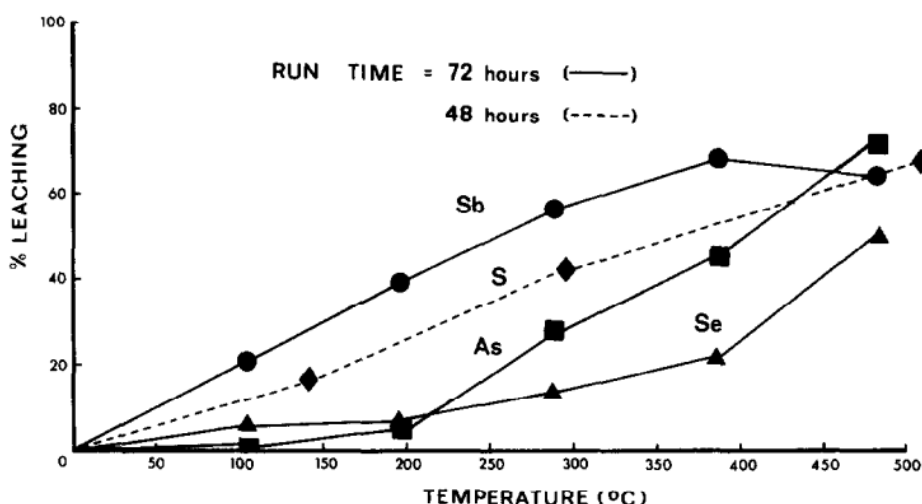


Figure 2 : Résultats d'interactions expérimentales entre fluides chauds et roches montrant la variation du pourcentage de lessivage des constituants Sb, S, As et Se à partir du grauwacke P23556 en fonction de la température du fluide (Ewers, 1977).

On voit ainsi qu'une interaction entre un fluide chaud et une lithologie « normale » est suffisante pour mobiliser de l'antimoine. Les paramètres critiques sont donc plutôt le maintien d'un flux minéralisé pendant une longue période (perméabilité) et le fonctionnement concomitant d'un piège efficace et bien évidemment un porteur minéralogique de l'antimoine - probablement un sulfure - qui puisse être lessivé de son antimoine par des fluides.

1.1. PORTEURS MINÉRALOGIQUES DE L'ANTIMOINE

En plus de l'antimoine natif, il existe actuellement au minimum 255¹ espèces minérales contenant de l'antimoine reconnues par l'International Mineralogical Association (<http://rruff.info/ima/>). L'antimoine est très majoritairement présent (48 %) sous la forme de sulfures et de sulfosels au sens large (tableau 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il existe également sous forme d'élément natif (Sb) ou d'alliages (16 %) avec de nombreux métaux et métalloïdes (As, Co, Ni, Cu, Fe, Pd, Au, Se, Te, Pt, Bi, Tl, Ag, Sn). Les oxydes d'antimoine et composés à oxygène (34 %) sont également répandus (valentinite, senarmontite), ils dérivent en grande partie de l'altération supergène des sulfures et/ou sulfosels primaires mais des oxydes primaires « exotiques » existent comme la stibiotantalite (SbTaO₄), etc. Dans les silicates, l'antimoine semble extrêmement rare ou à l'état de traces, néanmoins au minimum trois silicates porteurs d'antimoine sont connus : la chapmanite (un rare phyllosilicate), l'orebroïte et l'holtite, deux nésosilicates également très rares.

¹ 264 espèces minérales contenant de l'antimoine sont répertoriées par www.webmineral.com, incluant des espèces non homologuées par l'International Mineralogical Association

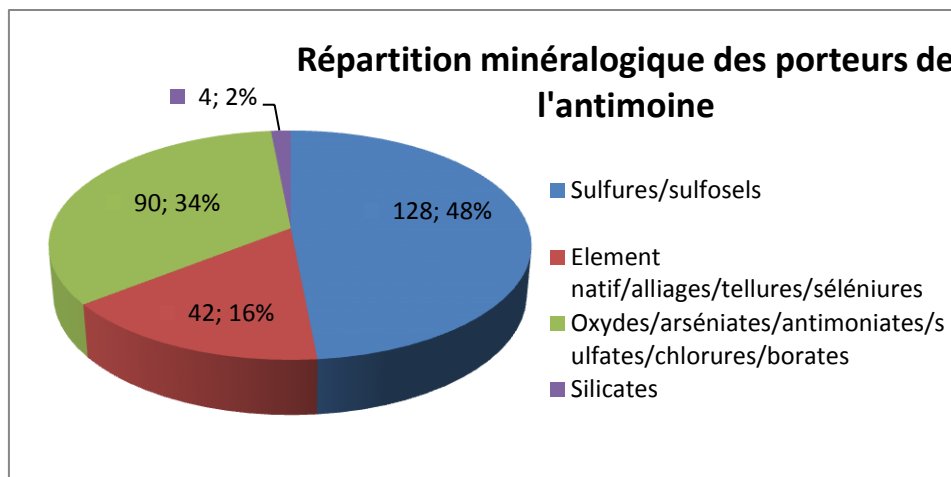


Tableau 2 : Répartition des porteurs minéralogiques de l'antimoine en termes de grandes familles minéralogiques, sur un total de 264 espèces connues (source des données : webmineral.com). L'antimoine est majoritairement porté par des sulfures/sulfosels (48 %), des oxydes ou composés à oxygène (34 %) et des alliages (16 %). La présence d'antimoine dans des silicates (2 %) n'est observée que dans des curiosités minéralogiques extrêmement rares (chapmanite, orebroïte et holtite).

Parmi les nombreuses espèces minérales contenant de l'antimoine, seules 20 espèces (tableau 3) constituent les porteurs de l'antimoine dans les minerais. Cependant, le principal minerai d'antimoine est composé de stibine. Dans les minéralisations sulfurées altérées par les phénomènes supergènes, le minerai est alors constitué principalement d'oxydes : kermesite, valentinite, senarmontite. Il existe enfin des gisements à basse teneur en antimoine dans lesquels l'antimoine est en général un sous-produit de l'exploitation d'autres métaux de base. Dans ces gisements, les porteurs de l'antimoine correspondent à différents nombreux sulfosels (tétrahedrite, bournonite, boulangérite, etc).

Teneur Sb du minéral (%)	Nom du minéral	Formule
100	Antimony	Sb
91,92	Paradocrasite	$\text{Sb}_2(\text{Sb},\text{As})_2$
88,39	Senarmontite	Sb_2O_3
86,11	Kieftite	CoSb_3
83,53	Valentinite	Sb_2O_3
80,58	Nisbite	NiSb_2
79,78	Onoratoite	$\text{Sb}_8\text{O}_{11}\text{Cl}_2$
79,19	Cervantite	$\text{Sb}^{3+}\text{Sb}^{5+}\text{O}_4$
76,37	Stibiconite	$\text{Sb}^{3+}\text{Sb}^{5+}_2\text{O}_6(\text{OH})$
75,62	Sarabauite	$\text{CaSb}_{10}\text{O}_{10}\text{S}_6$
75,24	Kermesite	Sb_2S_{20}
75,11	Coquandite	$\text{Sb}_6\text{O}_8(\text{SO}_4) \cdot (\text{H}_2\text{O})$
71,68	Metastibnite	Sb_2S_3
71,68	Stibnite	Sb_2S_3
71,5	Kleibergite	$\text{Sb}^{3+}_4\text{O}_4(\text{OH})_2(\text{SO}_4)$
70,08	Ottensite	$\text{Na}_3(\text{Sb}_2\text{O}_3)_3(\text{SbS}_3) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
67,47	Breithauptite	NiSb
61,91	Stibarsen	SbAs
58,07	Gudmundite	FeSbS
57,29	Ullmannite	NiSbS
56,94	Berthierite	FeSb_2S_4
55,28	Aurostibite	AuSb_2
48,81	Chalcostibite	CuSbS_2
35,39	Jamesonite	$\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$
29,64	Tetrahedrite	$(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$
27,34	Dyscrasite	Ag_3Sb
26,44	Boulangerite	$\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$
24,91	Bournonite	PbCuSbS_3
22,48	Pyrargyrite	Ag_3SbS_3
18,93	Freibergite	$(\text{Ag},\text{Cu},\text{Fe})_{12}(\text{Sb},\text{As})_4\text{S}_{13}$
15,42	Stephanite	Ag_5SbS_4
3,83	Vinciennite	$\text{Cu}_{10}\text{Fe}_4\text{Sn}(\text{As},\text{Sb})\text{S}_{16}$

Tableau 3 : Liste des espèces minérales contenant plus de 70 % d'antimoine et en gras principales espèces minérales primaires ou secondaires constituant les minerais d'antimoine exploités. Modifié d'après Schwarz-Schampera (2014) et données de webmineral.com

1.2. TYPES DE GISEMENTS PORTEURS D'ANTIMOINE

En première approximation, il existe deux grandes morphologies de gisements : les gisements tabulaires interstratifiés dans des séries sédimentaires détritiques et carbonatées et les gisements filoniens. Les gisements stratiformes - notamment Chinois - constituent de loin les plus importantes réserves mondiales connues.

D'un point de vue métallogénique, 5 types de gisements d'antimoine sont actuellement proposés (Schwartz-Schampera, 2014 ; tableaux 4 et 5 :

- i) remplacement dans les carbonates qui correspond aux gisements à morphologie tabulaires ;
- ii) veines épithermales à or-antimoine ;
- iii) veines associées aux intrusions de granites réduits ;
- iv) veines polymétalliques à métaux de base ;
- v) sources chaudes.

Type de gisement	Description	Caractéristiques	Exemples
Veines Au-Sb épithermales	Disséminations et stockwerks de veines de quartz à stibine $\pm$ tetrahedrite dans les schistes, calcaires, quartzites, roches volcaniques, dans les granites des ceintures de roches vertes. Dans les contextes de subduction et d'arc insulaire	Veines de quartz pauvres en sulfures mais avec stibine massive sans sulfures de Cu, Pb, Zn et Ni ni sulfosels. Signature métallique de type épithermale à Sb-As-Hg-Au-Ag-Te. Système de transition vers les gisements mésozonaux orogéniques	Hemlo (Canada) Yanacocha (Perou) El Indio (Chili) Goldfield (USA) La Lucette (France)
Veines à quartz-carbonates et remplacements dans les carbonates	Stockwerks haute teneur de veines à stibine massive dans des séries sédimentaires, métasédimentaires (calcaires) et volcaniques très altérées. Contexte syn à post tectonique	Gisements sans métaux de base ou précieux caractérisés par des lentilles de quartz et stibine au sein de carbonates. Importantes altérations quartz-carbonates au contact avec les schiste sus-jacents et à proximité de failles à fort angle. Les silicifications atteignent des dizaines de mètres de puissance dans les encaissants métasédimentaires ou volcaniques	Xikouangshan (Chine) Kadamdzhay (Russie) Murchinson (Afrique du Sud) Olympiada (Russie)

Magmatique réduit	Districts régionaux d'intrusions de granites réduits auxquels sont associés des stockwerks orientés de veines de quartz-carbonate à or. Présence de veines As-Sb-Au dans l'environnement de ces systèmes. Contexte de faible extension en arrière d'une marge continentale épaissie.	Les gisements se trouvent dans des systèmes magmatiques-hydrothermaux zonés marqués par l'assemblage Au-Bi-Te-W-As-Sb-Ag-Pb-Zn. Présence de systèmes de type skarns et remplacements, veines. Associé avec des magmas monzonitiques riches en volatils	Tintina (USA, Canada) Timbarra (Australie) Kidston (Australie) Niuxinshan (Chine) Boborás-Irixo (Espagne)
Veines polymétalliques à métaux de base	Gisements polymétalliques petits à moyens. Dans des zones de brèches tardives affectant des formations metasedimentaires ou intrusives. Minéralisations liées à des saumures de bassins.		Cobalt district (Canada) Ceinture antimonifère (Bolivie) Bau district (Malaisie)
Sources chaudes	Précipités siliceux déposés par des fluides hydrothermaux, des sources chaudes, des fumeroles. Contexte volcanique	Fluides de basse température à l'origine de ségrégations de sulfures et sulfosels à Sb. Au sein de lithologies encaissantes acides à intermédiaires. Co-enrichissement de Sb avec As, Hg et localement Te, Se, Au, Ag.	Kudryavyi (Russie) Iles Kuril (Russie) Merapi (Indonésie) Taupo (Nouvelle Zélande)

*Tableau 4 : Caractéristiques clés et exemples des 5 types de gisements d'antimoine.
Complété d'après Schwarz-Schampera (2014).*

Le tableau 5 montre que la majorité de la ressource est à rechercher dans les gisements de type veines et de type remplacement qui représentent 80 % du stock métal.

Type de gisement	Ordre de grandeur des tailles de gisements (minerais)	Teneurs (Sb ₂ S ₃ %)	Estimation du tonnage Sb métal des ressources connues	Pourcentage du total
Veine Au-Sb épithermale	10 000 – 1 Mt	0,1 – 3,5 %	580 000 t	20
Remplacement dans les carbonates	1 Mt – 100 Mt	1,5 – 25 %	2,5 Mt	60
Magmatique réduit	1 Mt – 100 Mt	0,1 – 1,5 %	320 000 t	10
Veine polymétallique à métaux de base	10 000 – 1 Mt	0,1 – 0,5 %	175 000 t	8
Source chaude	10 000 – 1 Mt	0,1 – 0,2 %	2500	2
			3 577 500 t	100

Tableau 5 : Dimensions et teneurs typiques des différents types de gisements d'antimoine, modifié d'après les données du BGR (Schwarz-Schampera, 2014).

Si on s'intéresse donc principalement à la métallogénie des deux types de gisements - suivant la classification de Schwarz-Schampera (2014) - qui portent l'essentiel de la ressource, on peut mettre en avant les éléments suivants :

- i) les gisements de type veine Au-Sb épithermales sont des veines qui se forment à la toute fin d'un orogène. Elles sont en général spatialement associées à des grandes failles décrochantes d'importance régionale. Elles se mettent en place en contexte de déformation cassante (brèches fréquentes) en général associé à des failles décrochantes (synthèse dans Bellot *et al.*, 2003). La profondeur à laquelle se forment les filons minéralisés serait entre la quasi-surface et 5 km. Les fluides impliqués sont principalement à H₂O-CO₂-CH₄±N₂±NaCl (synthèse dans Bellot *et al.* 2003), il s'agit en général de fluides métamorphiques et/ou de bassin mélangés avec des fluides météoriques, à une température entre 100 et 280°C et une pression de 0,1 à 1,2 kbar (500 à 4500 m de profondeur) lors du dépôt de l'antimoine (synthèse de Bellot *et al.*, 2003) ;
- ii) les gisements de type « remplacements dans les carbonates » regroupe en fait des gisements différents : A) les gisements stratoïdes paléozoïques ou mésozoïques au sein de séries carbonatées et détritiques dont le plus connu est l'énorme gisement de Xikouangshan (Chine) ; B) les gisements archéens de type Murchinson, localisés au sein de ceintures de roches vertes et formées d'enrichissements successifs via des circulations de fluides énormes et polyphasées (Jaguin, 2012).

Le gisement supergéant d'antimoine stratoïde d'Xikouangshan (figure 3) est localisé dans des calcaires du Dévonien moyen à supérieur du centre de la province du Hunan. La minéralisation est datée du jurassique supérieur pour le premier stade et du crétacé inférieur pour le 3^{ème} stade (155,5 ± 1,1 Ma et 124,1 ± 3,7 Ma Sm/Nd sur calcites, Peng *et al.*, 2003). Le minerai est composé de trois cristallisations successives de stibine (1: stibine 1-calcite 1-pyrite, 2 : stibine 2-quartz, 3 : stibine 3-calcite 2). Les données isotopiques du soufre suggèrent une origine commune du soufre des stibines, avec des sources probables à rechercher dans le socle précambrien sous-jacent (Yang *et al.*, 2006). Il s'agit donc là encore d'une minéralisation épigénétique et non syngénétique.

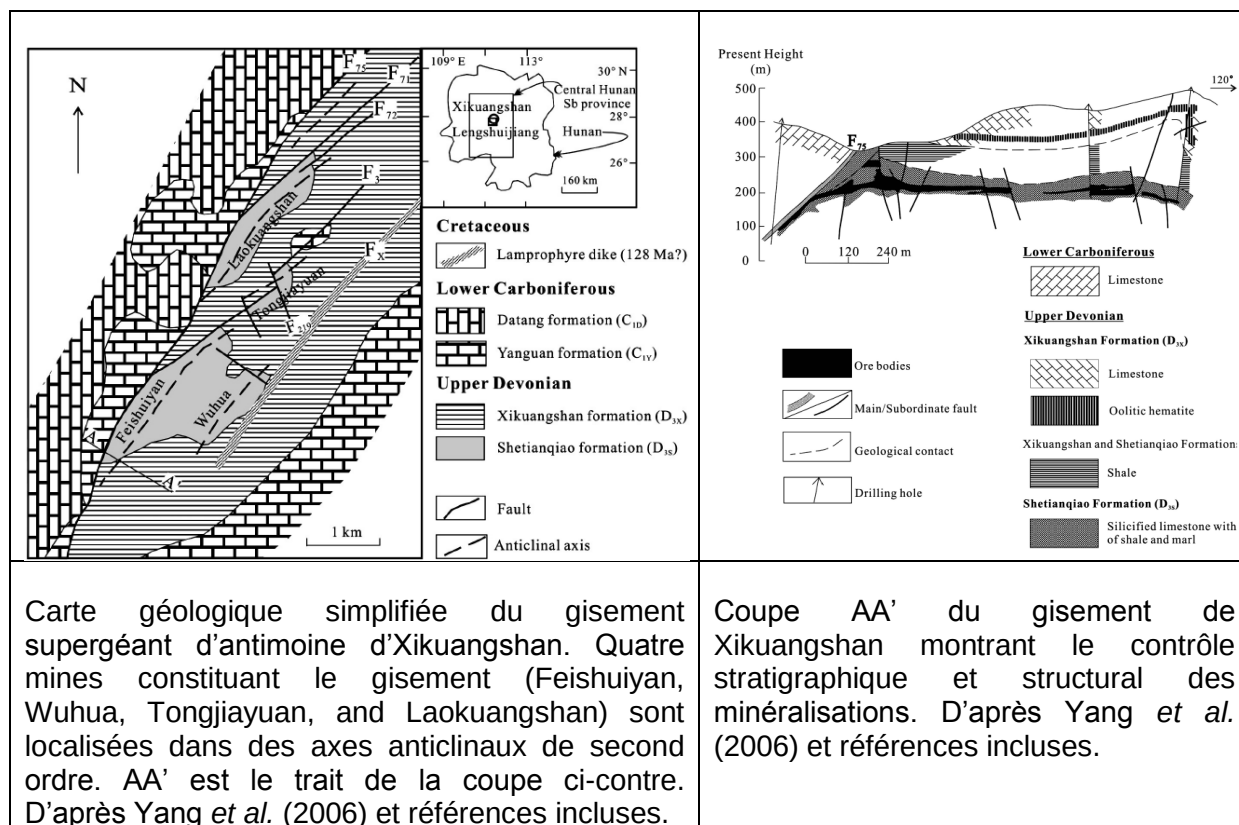


Figure 3 : Carte et coupe géologique du gisement d'Xikuangshan (Yang *et al.*, 2006 et références incluses).

Dans le cas des minéralisations archéennes de Murchinson, (figure 4) appelées « Antimony line », ces minéralisations se seraient formées en 2 étapes (Jaguin 2012 et références incluses) : vers 2,97 Ga des intrusions de granodiorites se mettent en place dans des formations volcano-sédimentaires supra-crustales pré-enrichies en antimoine (Fm de Weigel) et mobilisent de l'antimoine à leur périphérie. Vers 2,8 Ga, une circulation de fluides métamorphiques à $H_2O-CO_2-(CH_4)$ très importante, syn-déformation, se produit provoquant une forte altération des encaissants (métasomatose et albitisation) permettant la remobilisation et la formation d'importants gisements d'antimoine le long d'une grande zone de faille. Les minéralisations se formeraient à 350-450 °C et 2-3 kbar soit à 8-11 km de profondeur. Les grands gisements de l'Antimony line résulteraient donc d'un premier stade de concentration associé à des intrusions de sub-surface et peut être des veines Au-Sb qui sont ensuite remobilisées et reconcentrée par une très importante circulation de fluides métamorphiques chauds à 8-11 km de profondeur, associés à l'enfouissement et la déformation de la ceinture de roches vertes.

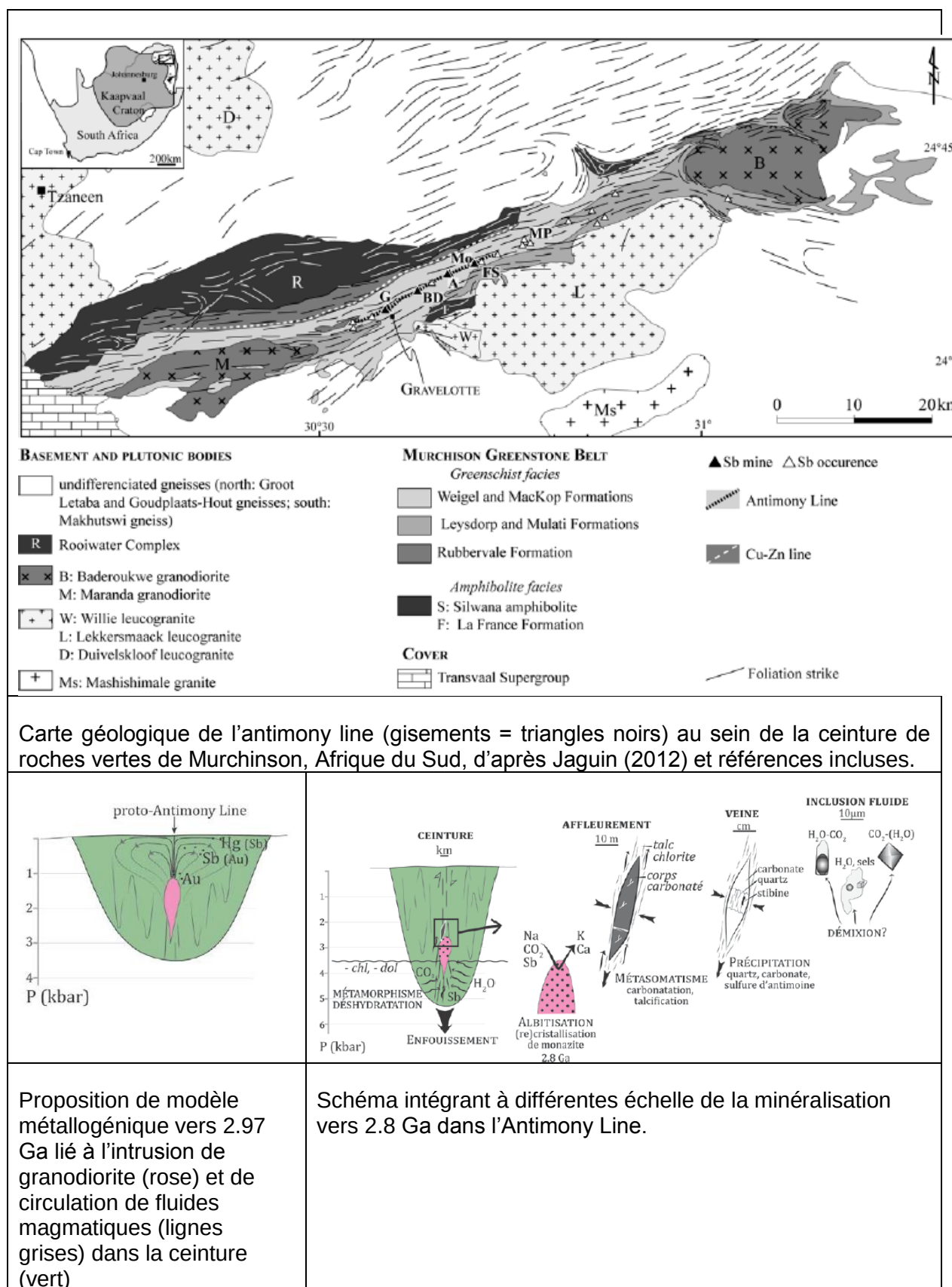


Figure 4 : Carte géologique de la ceinture de Murchison avec les minéralisations de l'Antimony Line et modèle métallogénique à deux stades expliquant les minéralisations à antimoine, Jaguin (2012) et références incluses.

1.3. MÉTALLOTECTES

En première analyse, la comparaison des différents types de gisements d'antimoine montre de nombreux points communs qui ont vraisemblablement un contrôle majeur sur la formation de la minéralisation :

- la proximité de grandes zones de failles décrochantes ;
- la localisation dans les niveaux les plus superficiels de la croûte ;
- le contrôle géochimique (piège ?) fréquemment joué par les carbonates expliquant probablement les morphologies stratoïdes ;
- la présence d'un moteur thermique (intrusions ou volcanisme acide/basique) visible (dykes, intrusions, champs géothermique) ou supposé ;
- la position relativement « arrière » par rapport à une zone de subduction et un arc continental.

1.4. LES DISTRICTS À ANTIMOINE DU MASSIF ARMORICAIN

Le Massif Armoricain est la première province pour antimoine de France que cela soit en termes de tonnage produit (62 190 t Sb métal) ou de réserves connues (32 095 t). Ces productions et réserves sont synthétisées dans le tableau 6 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Les quatre principaux districts à Antimoine (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), sont par ordre décroissant d'importance :

1. le district de La Lucette s.l., le gisement de la Lucette étant de classe mondiale ;
2. le district de Vendée s.l. ;
3. le district du Semnon s.l. ;
4. le district de Quimper s.l..

Tous ces districts (tableau 6) - à part Le Semnon et Rosnoën - sont portés par des veines de quartz localisées à proximité des grands accidents nord et sud armoricain. Ces filons se sont formés à faible profondeur en contexte de déformation fragile. Les veines sont en général polyphasées avec un dépôt ultime de stibine massive qui constitue la minéralisation économique. Les stades antérieurs contiennent de petites quantités de sulfures de fer-arsenic et à métaux de base, parfois également de l'or et/ou du tungstène sous la forme de scheelite.

Dans le district du Semnon, la minéralisation est localisée exclusivement dans des dykes de dolérites carbonifères qui recoupent la couverture paléozoïque. Au sein de ces dykes on observe des stockwerks de veines de quartz à stibine qui recoupent les épontes schistosées des dykes, montrant que ces veines minéralisées sont beaucoup plus récentes que les dykes. Le champ de dykes étant pluri-kilométrique, les tonnages reconnus sont importants.

Une particularité intéressante est l'existence du gisement stratoïde à stibine seule de Rosnoën, localisé dans le bassin de Châteaulin. La présence de ce gisement découvert et reconnu par le BRGM suggère la possibilité de découvrir d'autres gisements stratoïdes dans ce bassin, sachant que c'est ce type de gisement qui fournit les tonnages les plus importants.

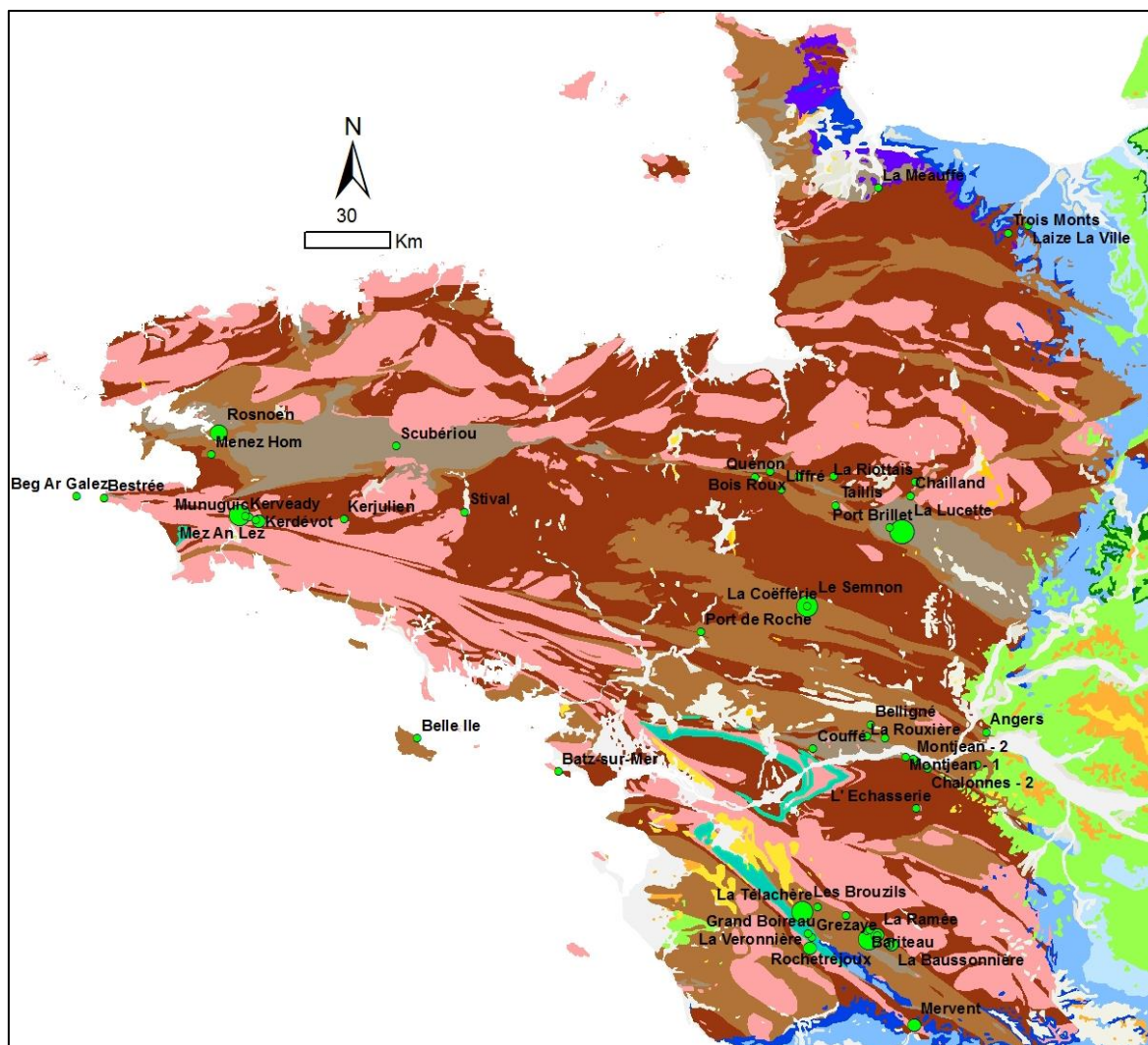


Figure 5 : Principaux districts et indices à antimoine du Massif Armoricain
(source des données : base ProMine, Cassard et al., 2015),
géologie simplifiée : rose = granites, granitoïdes ;
marron : roches sédimentaires et métamorphique..

District	Gisement	Production (t Sb)	Période de production	Ressources mesurées	Ressources indiquées	Ressources totales	Production + ressources	Références
La Lucette								
	La Lucette	42000	1899-1913; 1916-1934				42000	Moyroud <i>et al.</i> , 1979
	Port Brillet	inconnu	1899-1910					Guiollard, 2009
		42000					42000	
Vendée								
	Rochettréjoux	16500	1907-1925		100	100	16600	Moyroud <i>et al.</i> , 1979
	Les Brouzils	1100	1988-1992	4465	5640	10310	11205	Blouin, 1991
	La Véronnière	250	1881-1889				250	Moyroud <i>et al.</i> , 1979
	La Ramée	850	1882-1884; 1903-1906; 1915; 1917; 1926-1932				850	Moyroud <i>et al.</i> , 1979
	Ste-Marie	100	1924-1927				100	Moyroud <i>et al.</i> , 1979
	La Baussonnière				600	600	600	BRGM 1988b ; Gentilhomme <i>et al.</i> , 2001
		18800		4465	6340	11010	29605	
Le Semnon	Le Semnon	500	1913-1918		5000	5000	5500	Moyroud <i>et al.</i> , 1979
	La Coëfferie			9900		9900	9900	BRGM 1987
		500		9900	5000	14900	15400	
Quimper	Kerdévot	325	1913-1916; 1927-1928				325	Moyroud <i>et al.</i> , 1979
	Ty-Gardien	565	1981-1982	2885	900	3785	4350	Gorichon and Kerjean, 1979
	Kervéady			400	1000	1400	1400	Gorichon and Kerjean, 1979 ; BRGM, 1990
		890		3285	1900	5185	6075	
Châteaulin	Rosnoën			500	500	1000	1000	BRGM 1988; Gentilhomme <i>et al.</i> , 2001
Total		62190		18150	13740	32095	94080	

Tableau 6 : Production et ressource des districts à antimoine du Massif Armoricain.
Ces chiffres actualisés issus des données d'archives (Projet CADI) tiennent compte des travaux d'exploration et d'exploitation menés par le BRGM dans différents syndicats entre 1981 et 1992.

2. Étude 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 orogènes cadomienne au Néoprotérozoïque et varisque au Paléozoïque. A 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 suivi 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 6), du nord au sud: nord-armoricain, du Léon, centre-armoricain, de Lanvaux, des Mauges et sud-armoricain.

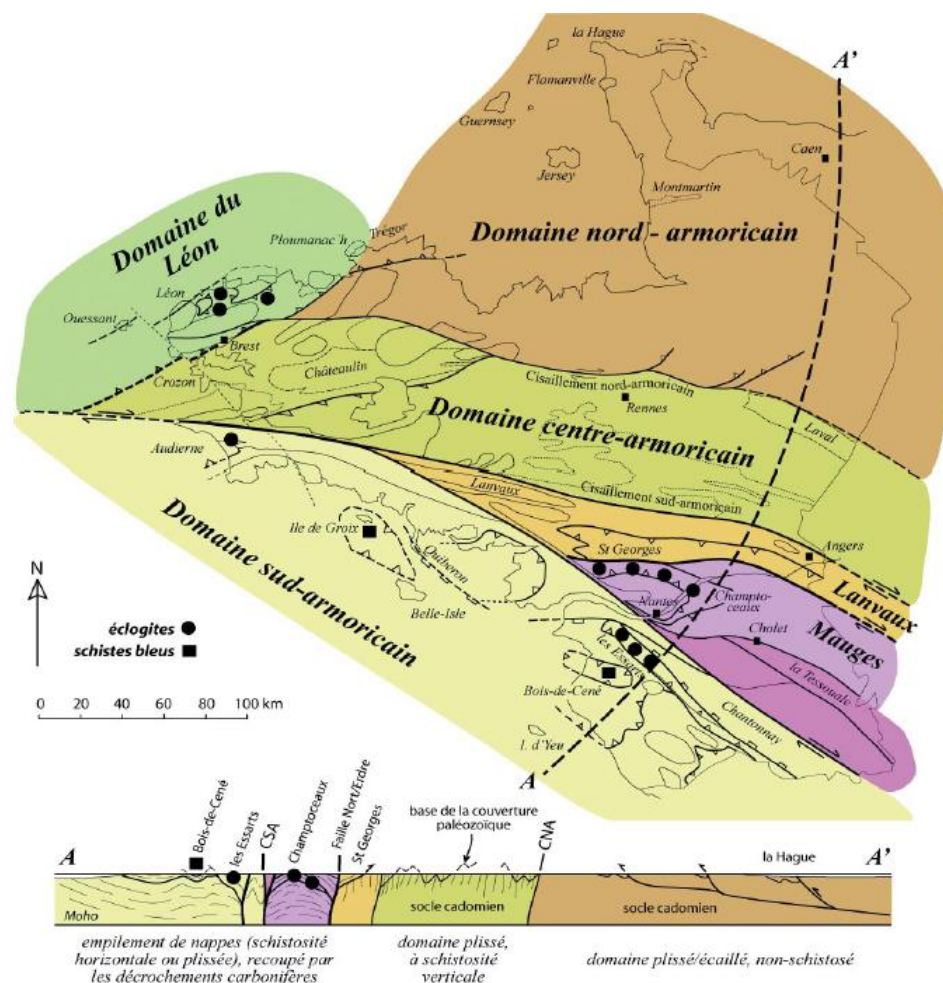


Figure 6 : Carte et coupe des principaux domaines géologiques du Massif Armoricain (Ballèvre et al., 2013).

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 7). Cela permet d'avoir une bonne précision des contours et de conserver les petits objets. Par contre, 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 à partir de toute 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 7) à un code lithologique (tableau 8) 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 :

Age stratigraphique	Intervalle de datation	Code
Carbonifère	359-299Ma	7
Devonien	416-359Ma	6
Silurien	443-416Ma	5
Ordovicien	488-443Ma	4
Cambrien	542-488Ma	3
Néoprotérozoïque	100-542Ma	2
Paléoprotérozoïque	2500-1600Ma	1

Tableau 7 : 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'aprites 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 8 : liste des codes lithologiques.

GRAN4 se traduit ainsi en granite d'âge ordovicien, CALC6 se traduit 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, quelques soient leurs lithologies.

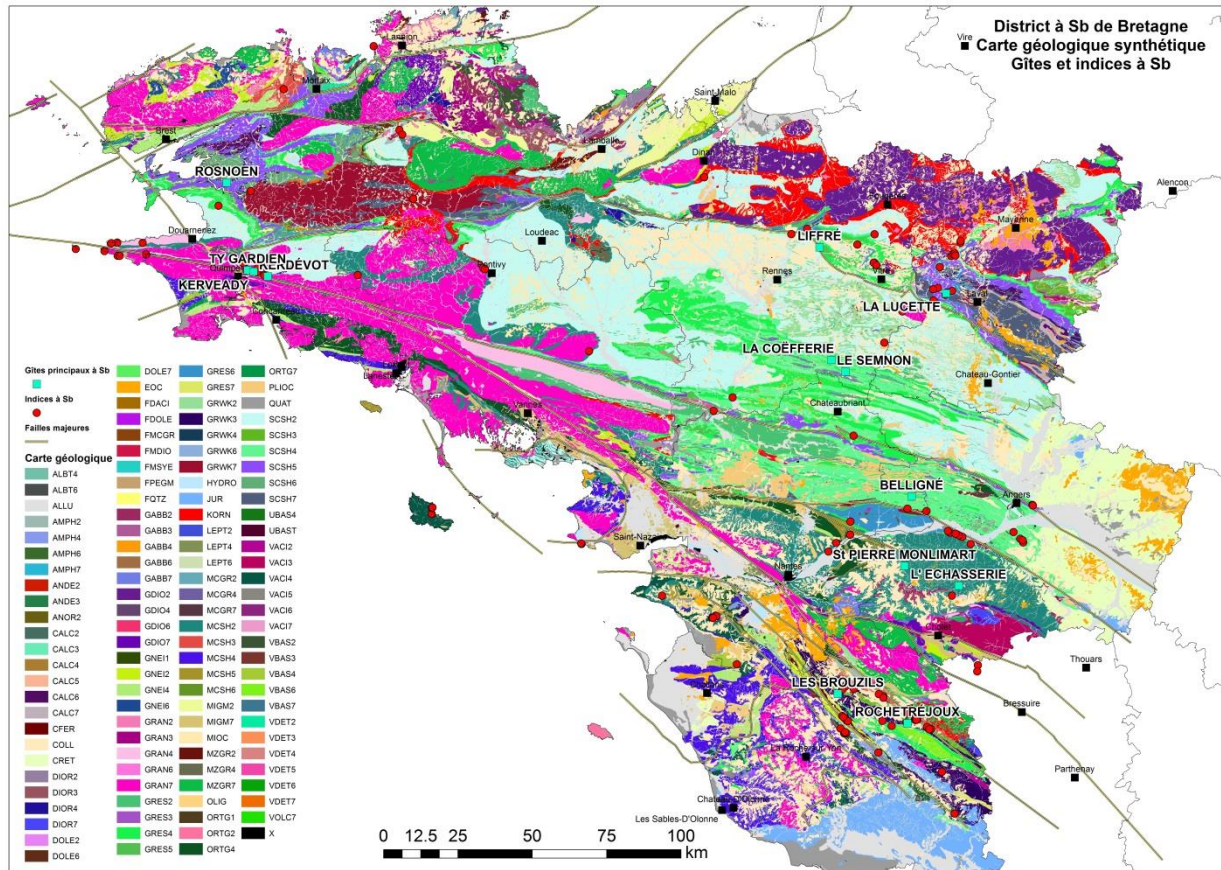


Figure 7 : Carte géologique synthétisée de Bretagne à partir des cartes harmonisées au 1/50 000 et localisation des principaux indices et gisements.

La dernière étape consiste à utiliser la fonction "Dissolve" d'ArcGis pour unir les polygones jointifs présentant le même code litho-stratigraphique. On passe ainsi de 101545 polygones unitaires à 78275 pour l'ensemble de la zone d'étude.

2.3. WOE (WEIGHT OF EVIDENCE)

2.3.1. Principes

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

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

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

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

$$\text{WoE} = \% \text{ indices} / \% \text{ surface formation} \times$$

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

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

Toutefois, on voit bien aussi que le WoE est sensible à la qualité de positionnement des points (une occurrence ne peut être que dans une formation et il faut qu'elle soit donc superposée à la bonne formation pour rendre bien compte de son potentiel) et aussi à la surface relative des formations (un indice sur une toute petite surface générera un WoE plus grand que plusieurs indices sur une surface plus grande, ce qui n'est pas forcément pertinent). Un autre défaut de la méthode est aussi de ne pas prendre en compte 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 on a utilisé pour faire les calculs les 108 gîtes et indices répertoriés dans la province de Bretagne.

2.3.2. Interprétation

Les résultats obtenus par le WoE (figure 8 et tableau 9) montrent que les formations présentant les plus fortes valeurs sont soit des formations de type schistes et micaschistes (MSCH3, SCSH3, SCSH6, SCSH4, GRES7, GRWK3), soit des formations basiques (VBAS4, AMPH2). Cet environnement peu métamorphique est plutôt cohérent avec le modèle général dans lequel les gisements filoniens à Sb sont encaissés dans des formations supracrustales au moment du dépôt. Cet élément est cohérent avec le fait que les formations néoproterozoïques (schistes, grès, grauwackes) situées structuralement sous le paléozoïque apparaissent moins favorables. Les scores des granites sont nuls ou faibles ce qui peut se traduire par le fait qu'ils ne seraient pas génétiquement associés à Sb.

Néanmoins, les plus forts scores portés par SCSH3 et MASH3 sont générés par les indices du seul district vendéen (clustérisation cf. 2.3.1). Leur faible surface relative augmente artificiellement leur score en WoE. On remarque aussi dans le tableau de résultats la présence de formations comme MIOC, COLL et ALLU qui ne peuvent pas être associées à des gisements de Sb et sont très probablement liés à des unités géologiques trop petites pour être cartographiées au sein d'unités plus grandes de type colluvions, alluvions, etc. Un autre biais du WoE est l'importance du facteur surface des formations qui est le pondérateur de la méthode. On imagine très bien que si la formation couvre une toute petite surface, et qu'elle contient un indice, son poids relatif va être très élevé alors que son importance en termes de favorabilité est en fait faible. Dans notre jeu de données, c'est le cas par exemple de la formation GRES7 qui couvre 0,08 % de la surface et qui ne contient qu'un indice mais qui ressort avec un WoE supérieur à 13.

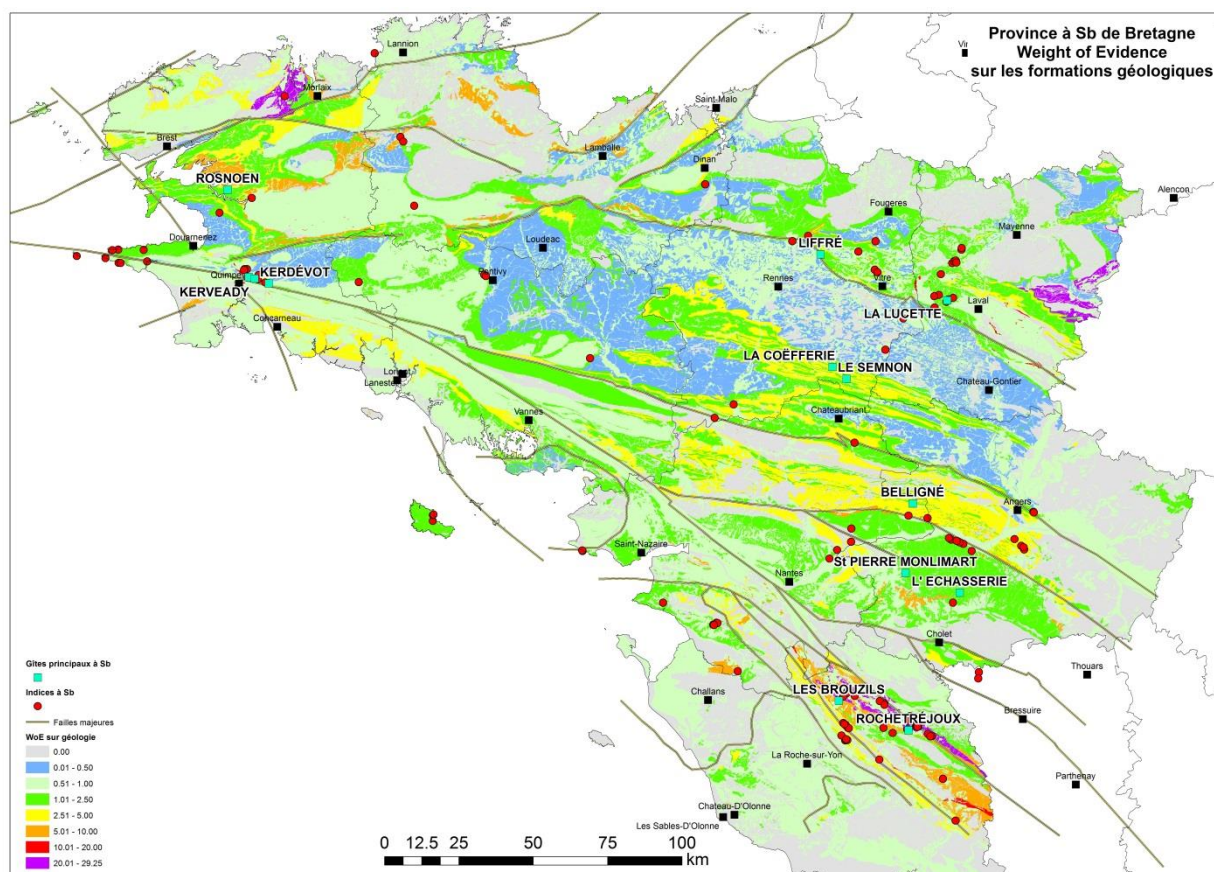


Figure 8 : Résultats du WoE pour Sb en Bretagne.

Au premier niveau, le WoE fait bien ressortir le district vendéen (synclinal de Chantonnay) et le pourtour du bassin de Châteaulin avec des scores compris entre 5 et 29.5 ; la présence de nombreux gisements et indices dans des schistes (SCSH3) et micaschistes (MCSH3) de Chantonnay a pour effet de mettre en évidence des unités de schistes similaires au nord-est du bassin de Laval et à l'ouest de Morlaix, où se localise l'indice de Coat-Crenn. Ceci semble suggérer un lien entre la présence de ces schistes et l'existence d'antimoine. Le WoE met en évidence le pourtour (schistes et calcaires dévoniens) du bassin de Châteaulin du fait de la présence de nombreux indices dans des formations similaires localisées en bordure de la Loire (Chalonnès, Montjean-sur-Loire). Il faut noter que des indices et gisements d'antimoine sont connus dans ces formations ou dans des formations similaires (Rosnoën, indices présents dans les calcaires dévoniens), ce qui souligne l'intérêt de cet association à l'échelle du Massif Armoricain où elle représente une surface et une puissance notable.

Au deuxième niveau (scores de 2.51 à 5), les schistes paléozoïques du sud de Rennes, du domaine de Lanvaux-St Georges (gîte de Belligné et autres indices de ce domaine) définissent des secteurs favorables malgré leurs très vastes surfaces. Les orthogneiss (ORTG4) du domaine Sud-Armoricain ont également un score du même ordre du fait de l'existence de lithologies similaires dans les districts de Quimper et de Vendée. Le district antimonifère du Semnon est associé à ces formations de schistes (SCSH4) et dolérites subordonnées.

Au troisième niveau (scores entre 1 et 2.5), les formations impliquées couvrent de très grandes surfaces (schistes et grès ordoviciens ou néoprotérozoïques), ce qui diminue leurs scores en WoE. Des gisements ou indices comme La Lucette, Rosnoën ou Liffre sont localisés dans ce type d'environnement tellement répandu et géologiquement peu diversifié que ce type de méthode ne les met que très peu en évidence.

Code Géologique	% Indices	% formations	WoE	Code Géologique	% Indices	% formations	WoE
MCSH3	8.08	0.28	29.25	VACI4	1.01	0.48	2.11
SCSH3	7.07	0.34	20.76	SCSH5	4.04	1.92	2.11
GRES7	1.01	0.08	13.11	MIOC	1.01	0.49	2.05
AMPH2	1.01	0.11	8.89	GRES4	6.06	3.80	1.59
VBAS4	1.01	0.12	8.28	KORN	3.03	2.32	1.30
FQTZ	1.01	0.13	8.05	MIGM7	1.01	0.80	1.26
SCSH6	5.05	0.75	6.73	GRES6	1.01	0.82	1.24
GABB2	2.02	0.39	5.18	MCSH2	5.05	4.57	1.10
GRWK3	3.03	0.60	5.03	SCSH7	1.01	1.05	0.96
ORTG4	6.06	1.57	3.87	GRAN7	7.07	9.83	0.72
CALC6	1.01	0.33	3.03	GRWK7	1.01	1.58	0.64
SCSH4	12.12	4.46	2.72	COLL	8.08	13.24	0.61
GNEI2	2.02	0.75	2.69	ALLU	6.06	10.66	0.57
GRES5	1.01	0.44	2.31	SCSH2	1.01	10.25	0.10
GRAN4	2.02	0.88	2.31				

Tableau 9 : Résultats du WoE indices à Sb vs géologie.

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 à 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 présente dans 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 pris en compte la présence et l'absence, on ne fait pas intervenir la surface car cette variable est soumise à des contraintes cartographiques (formation partiellement recouverte par des colluvions par exemple) et qu'elle n'est au mieux représentative que de l'intersection entre un objet géologique 3D et la surface topographique actuelle.

À partir de cette grille de cellules, on va générer des familles d'associations qu'on pourra cartographier 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, on ne va utiliser comme étalon que les gisements les plus représentatifs (16 gîtes) et on éliminera du traitement les formations non impliquées dans les minéralisations comme les alluvions, les colluvions ou les formations tertiaires ou mésozoïques.

• **Résultat et Interprétation**

Par cette méthode, on sélectionne 877 cellules sur les 6 983 constituant la grille totale et 41 indices sur 138 sont superposés à des cellules ayant des classes de CAH similaires à celles des gisements étalons. En première lecture, la CBA par CAH (figure 9 et figure 10) met en évidence plusieurs associations lithologiques différentes dont le point commun est une localisation le long des grands accidents du Massif Armoricain.

L'association lithologique des indices d'antimoine (tableau 10) de Saint-Pierre-Montlimart (MCSH2, GRAN7) est très commune et répandue, ce qui a pour effet de cibler de nombreux environnements similaires d'intrusions de granites dans des schistes d'âges identiques (336 cellules).

Les environnements lithologiques associés aux gisements du district du Semnon et aux indices de type Liffre ou La-Coëfferie sont géologiquement très similaires (principalement des schistes et grès ordoviciens de la couverture paléozoïque) et la CBA par CAH n'est pas très discriminante. Toutefois, la présence de filons de dolérite reconnus dans certaines des cellules pourrait donner un poids supplémentaires à celles-ci.

Les environnements lithologiques associés au gîte de type Belligné caractérisé par la présence de volcanites acides dans l'environnement sont retrouvés en clusters principalement dans l'unité de Lanvaux-Saint-Georges-sur-Loire, dans le domaine centre armoricain le long du cisaillement sud armoricain, et dans les nappes de schistes peu métamorphiques du domaine sud (exemple de Belle-Île où il existe précisément des indices d'antimoine).

Les environnements lithologiques associés au gisement de La Lucette avec des schistes et grès en partie d'âge dévonien et carbonifère sont peu répandus (26 cellules), localisés principalement à l'ouest et au centre du bassin de Laval ainsi que sur le sud du bassin de Châteaulin et dans le sud de l'unité de Lanvaux-Saint-Georges-sur-Loire.

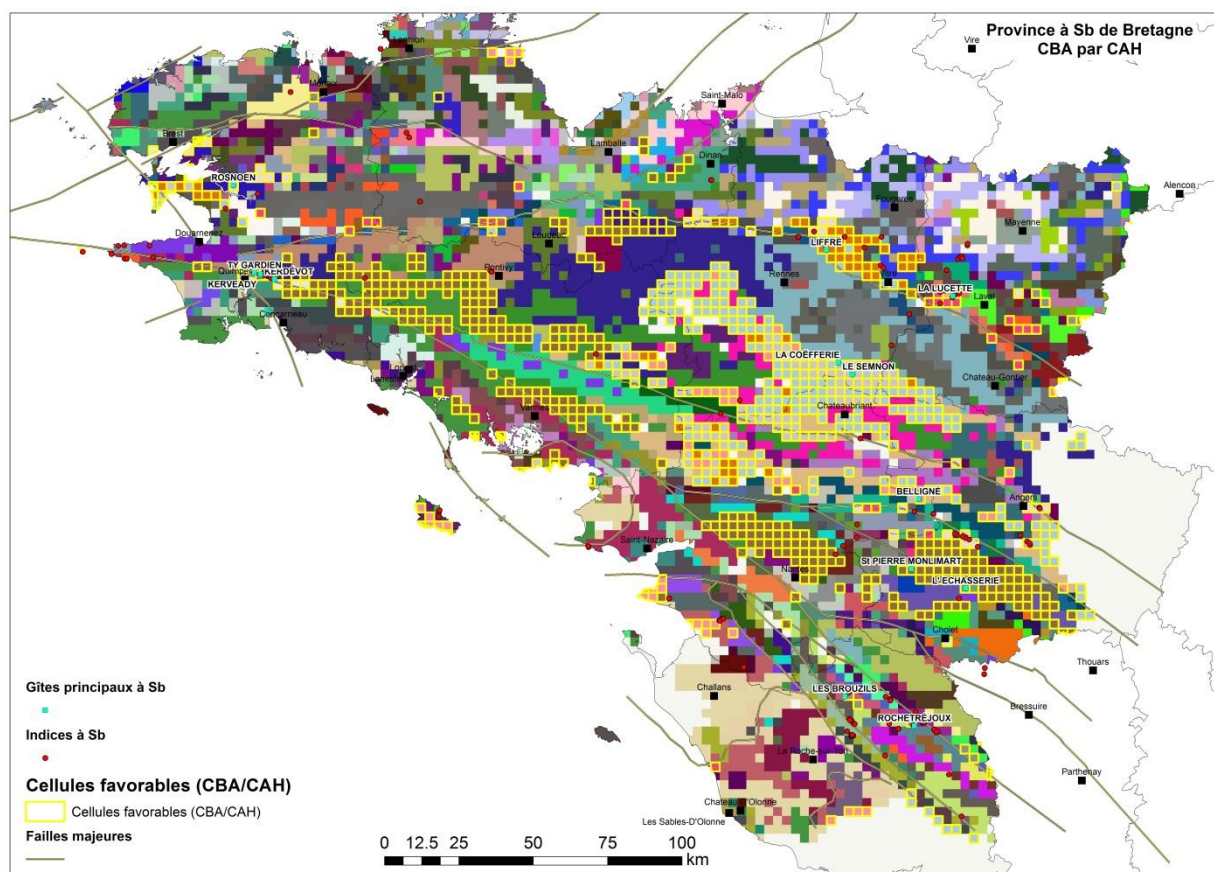


Figure 9 : Cellules appartenant à un groupe de CAH correspondant à un gîte à Sb.

L'environnement lithologique associé au gisement de Rosnoën est surtout marqué par la présence de calcaires, grès et schistes dévoniens. Ces formations sont fréquemment porteuses d'indices (disséminations de stibine dans les carbonates) à proximité des zones de failles. Ceci explique le ciblage de cellules avec ces lithologies le long du cisaillement nord armoricain et de la branche nord du cisaillement sud armoricain.

L'environnement lithologique associé aux gisements de Rochetréjoux et des Brouzils est notamment marqué par la présence de grauwackes à la différence d'autres environnements. La présence de cette lithologie peu représentée associée à des lithologies plus fréquentes (schistes et grès) a pour effet de cibler très fortement la sélection de cellules favorables (14 seulement) et donc de sous-valoriser l'intérêt de ce district très important en termes de production et de réserves connues. Néanmoins, la CBA souligne un contexte favorable sur 10 km le long du cisaillement sud armoricain au sud-est de Rochetréjoux. À noter enfin que ce type d'association est uniquement retrouvé au nord-est de Laval et à proximité de Morlaix.

L'environnement lithologique associé aux gisements de Ty-Gardien et Kerdévoit est marqué par la présence d'intrusifs mafiques (gabbro, diorite). Cette signature intéresse un nombre très restreint de cellules (12 et 17 respectivement). De façon intéressante des cellules sont ciblées dans le prolongement est du district de Quimper, le long du cisaillement sud-armoricain et un endroit localisé du cisaillement nord armoricain où existent des intrusions mafiques.

La signature de type l'Échasserie se révèle peu intéressante car elle est définie par une association lithologique trop spécifique (2 cellules).

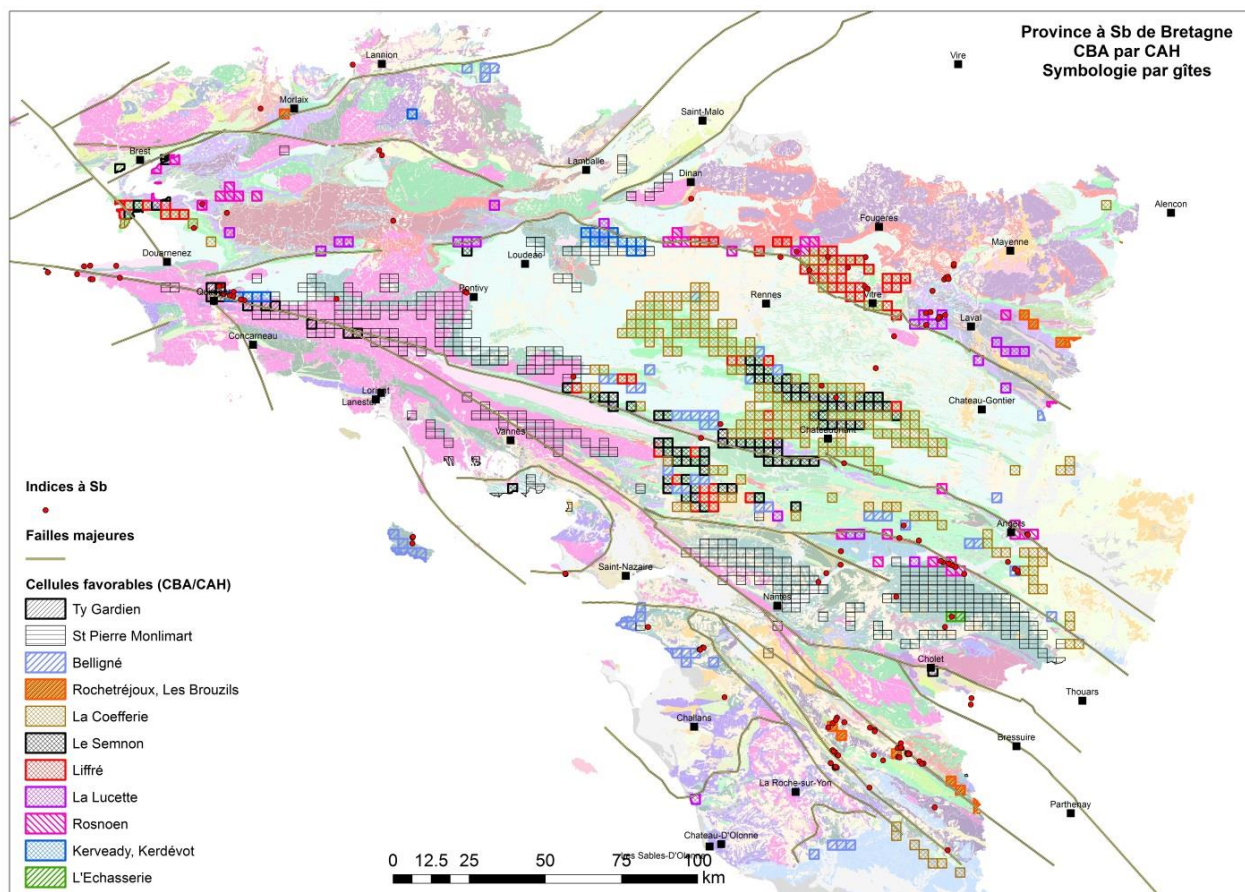


Figure 10 : Caractérisation des groupes de CAH correspondant à un gîte à Sb. Quand 2 gîtes sont regroupés c'est qu'ils appartiennent à la même famille de CAH (ex : Rochetréjoux et les Brouzils situés dans le district de Vendée).

Groupe de CAH	Nb de Cellules	Gisements associés	Association lithologique principale	Pourcentage de Dolérites dans l'association
1	12	Ty-Gardien	GABB4, GRAN7, MCSH2, SCSH2	25 % (3\12)
32	336	St Pierre Montlimart	MCSH2, GRAN7	0 % (0\336)
60	66	Belligné	VACI4, GRES4, SCSH4	5 % (3\66)
78	14	Rochetretjoux, Les Brouzils	SCSH3, GRES4, GRWK3, SCSH4	14 % (2\14)
118	205	La Coëfferie	SCSH4, GRES4	9,75 % (20\205)
124	97	Le Semnon	GRES5, SCSH5, SCSH4, GRES4	19 % (18\97)
125	67	Liffré	GRES5, SCSH4, GRES4, SCSH2	18 % (12\67)
126	26	La Lucette	SCSH7, SCSH5, GRES6, GRES4	21% (5\24)
130	35	Rosnoën	CALC6, GRES6, SCSH6, SCSH5, GRES4, SCSH4, SCSH2	20 % (7\35)
164	17	Kervéady, Kerdévot	DIOR4, SCSH2, MCSH2, FQTZ	12 % (2\17)
205	2	L'Échasserie	GRAN4, MCGR4, MCSH2	0 % (0\2)

Tableau 10 : Associations majoritaires présentes dans les groupes de CAH associés à un gîte à Sb. On remarque que toutes les associations lithologiques encaissant des gisements contiennent en leur sein un pourcentage significatif de dykes de dolérites, lithologie généralement peu représentée pour être listée dans l'association lithologique principale.

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 10) mais qui agrègent aussi d'autres lithologies moins représentées dans la classe. On a 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 pallier à cet éventuel défaut, on peut choisir de rechercher sur toute la zone d'étude la composition lithologique exacte de chaque cellule étalon (cellule contenant un gisement).

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

Si on compare les associations exactes (tableau 11) aux compositions principales des classes de CAH pour des cellules associées au même gisement, on retrouve bien les lithologies communes qui constituent le noyau des classes de la CAH. Par contre, en signature exacte, on ajoute des lithologies spécifiques comme les filons de quartz par

exemple. La signature correspondant à la cellule contenant le gîte de Saint-Pierre-Montlimart est peu spécifique (FQTZ-MCSH2) et se retrouve dans 256 cellules. Il faut aussi noter que la sélection se fait sur la présence **d'au moins** les lithologies mentionnées dans la signature, d'autres lithologies peuvent être présentes; on voit bien dans ce cas que plus l'association sera simple et banale, plus on aura de chance de la trouver dans la zone d'étude. C'est pourquoi la signature de type Saint-Pierre-Montlimart ne présente pas beaucoup d'intérêt.

En première analyse, la CBA par CAH et la CBA par signature exacte (figure 11) donnent des résultats relativement similaires. En fonction des différentes associations lithologiques, ces 2 méthodes ont pour effet, l'une par rapport à l'autre, de réduire ou d'augmenter les surfaces des zones favorables. À titre d'exemple la présence de dykes de dolérite a un effet critique sur la signature exacte alors que cet effet est moins marqué avec la CBA sur CAH (voir le district du Semnon ou de La Coëfferie) où cette lithologie n'intervient pas dans le noyau de la CAH pour cette classe.

Gîte	CAH250	Association lithologique exacte	Nombre de cellules
Rochetréjoux	78	FQTZ-GRWK3-SCSH3	18
Les Brouzils	78	FDOLE-FQTZ-GRWK3-SCSH3	4
L'Échasserie	205	GRAN4-MCGR4-MCSH2	2
St Pierre Montlimart	32	FQTZ-MCSH2	256
Belligné	60	GRES4-SCSH4-SCSH5-VACI4	59
La Coëfferie	118	FDOLE-GRES4-SCSH4	121
Le Semnon	124	FDOLE-GRES4-GRES5-SCSH4-SCSH5	38
La Lucette	126	FDOLE-GRES4-GRES6-SCSH5-SCSH7	10
Ty-Gardien	1	AMPH4-FQTZ-GABB4-GRAN7-GRES7-MIGM7-ORTG4-SCSH2-SCSH4-VDET7	1
Kervéady-Kerdévot	164	DIOR4-FQTZ-GRAN7-MCSH2-MIGM7-ORTG4-SCSH2	1
Liffré	125	FQTZ-GRES4-GRES5-SCSH2-SCSH4	116
Rosnoën	130	CALC6-GRES6-GRWK6-SCSH5-SCSH6	34

Tableau 11 : Associations exactes présentes dans les cellules contenant un gîte à Sb.

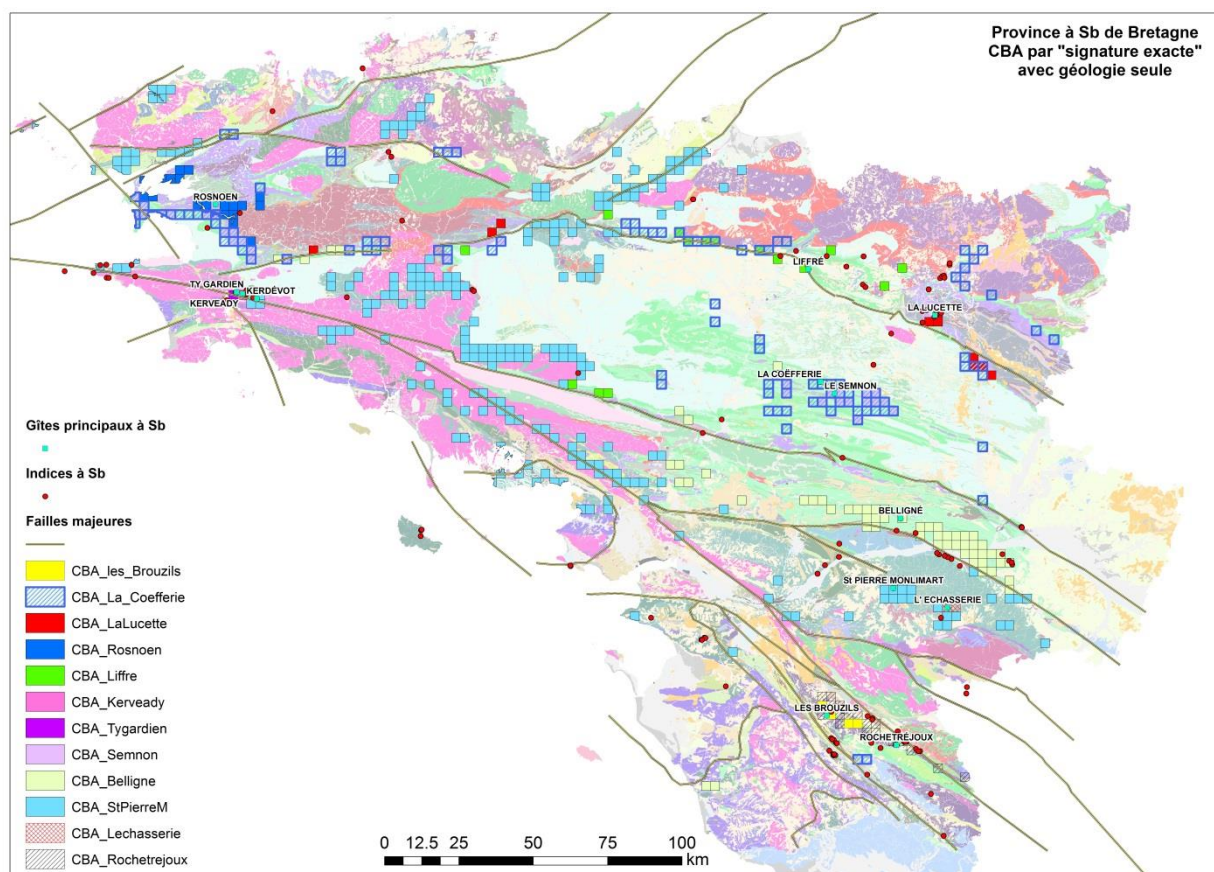


Figure 11 : Cellules ayant exactement la même association lithologique qu'une cellule avec un gîte à Sb.

2.4.3. Classement sur CBA

• Principe

Pour améliorer les résultats obtenus par les 2 méthodes précédentes on a cherché à élaborer une méthode permettant 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 Sb 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 :

- extraire les cellules contenant au moins une occurrence minéralisée ;
- 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) ;
- à faire le même calcul sur l'ensemble des cellules de la zone d'étude (FSA) puis ;
- de faire le rapport entre les 2 valeurs par formation (FRatio = FSC / FSA) (tableau 12).

Fréquence dans les cellules étalon														
AMPH4	CALC6	DIOR4	DOLE6	FDOLE	FQTZ	GABB4	GRAN4	GRAN7	GRES4	GRES5	GRES6	GRES7	GRWK3	GRWK6
0.077	0.077	0.154	0.077	0.308	0.538	0.077	0.077	0.231	0.385	0.231	0.154	0.077	0.154	0.077
Fréquence dans la population totale														
0.020	0.031	0.004	0.008	0.142	0.210	0.004	0.029	0.263	0.222	0.050	0.066	0.018	0.022	0.010
3.86	2.48	35.81	9.10	2.17	2.56	17.33	2.63	0.88	1.73	4.60	2.32	4.16	6.84	8.02
		10.000				10.000								
Fréquence dans les cellules étalon														
MCGR4	MCSH2	MIGM7	ORTG4	SCSH2	SCSH3	SCSH4	SCSH5	SCSH6	SCSH7	VACI4	VDET7	Mag	Gravfourd	
0.077	0.308	0.154	0.231	0.308	0.154	0.385	0.385	0.077	0.077	0.077	0.077	0.308	0.462	
Fréquence dans la population totale														
0.001	0.162	0.054	0.079	0.263	0.017	0.168	0.114	0.049	0.040	0.039	0.011	0.373	0.190	
134.29	1.90	2.84	2.93	1.17	8.81	2.28	3.37	1.58	1.91	1.95	7.26	0.83	2.43	

Tableau 12 : Tableau des rapports de fréquence (FRatio) des formations associées aux minéralisations à Sb.

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 donc, que cette formation peut avoir un lien avec la minéralisation. Afin de ne pas donner trop d'importance à des formations à score très élevés (DIOR4, GAB et MCGR4) mais 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 d'en faire la somme.

$$\text{Classement} = \sum \text{FRatio}$$

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 étalons, les autres formations sont ignorées.

Dans notre hypothèse, plus le score sera élevé, plus la cellule contiendra d'associations définies dans les cellules étalons.

Un biais induit par cette méthode est de favoriser les cellules présentant le plus de formations, c'est-à-dire qui correspondent à un environnement géologique complexe.

• Résultat et interprétation

Le classement sur CBA possède l'intérêt de hiérarchiser la pertinence des associations lithologiques (figure 12). Les éléments gîtologiques immédiatement mis en évidence par cette approche sur les environnements à antimoine sont le rôle des grands cisaillements et de la couverture paléozoïque non métamorphique. Les zones où la couverture paléozoïque est déformée par un grand cisaillement ressortent ainsi particulièrement (cisaillement des Monts d'Arrée, Cisaillement nord armoricain).

Cette approche accorde un fort potentiel au paléozoïque de la presqu'île de Crozon-Rosnoën au cisaillement des Monts d'Arrée, au cisaillement nord Armoricain. La branche

nord du cisaillement sud armoricain ainsi que l'unité de Lanvaux-St-Georges-sur-Loire apparaissent également très favorables à la présence de minéralisations antimonifères.

Le district du Semnon La Coëfferie ressort aussi mais avec des scores moins élevés, surtout parce qu'il est couvert par des formations très courantes dans la zone s'étude qui génèrent donc des rapports de fréquence assez faible.

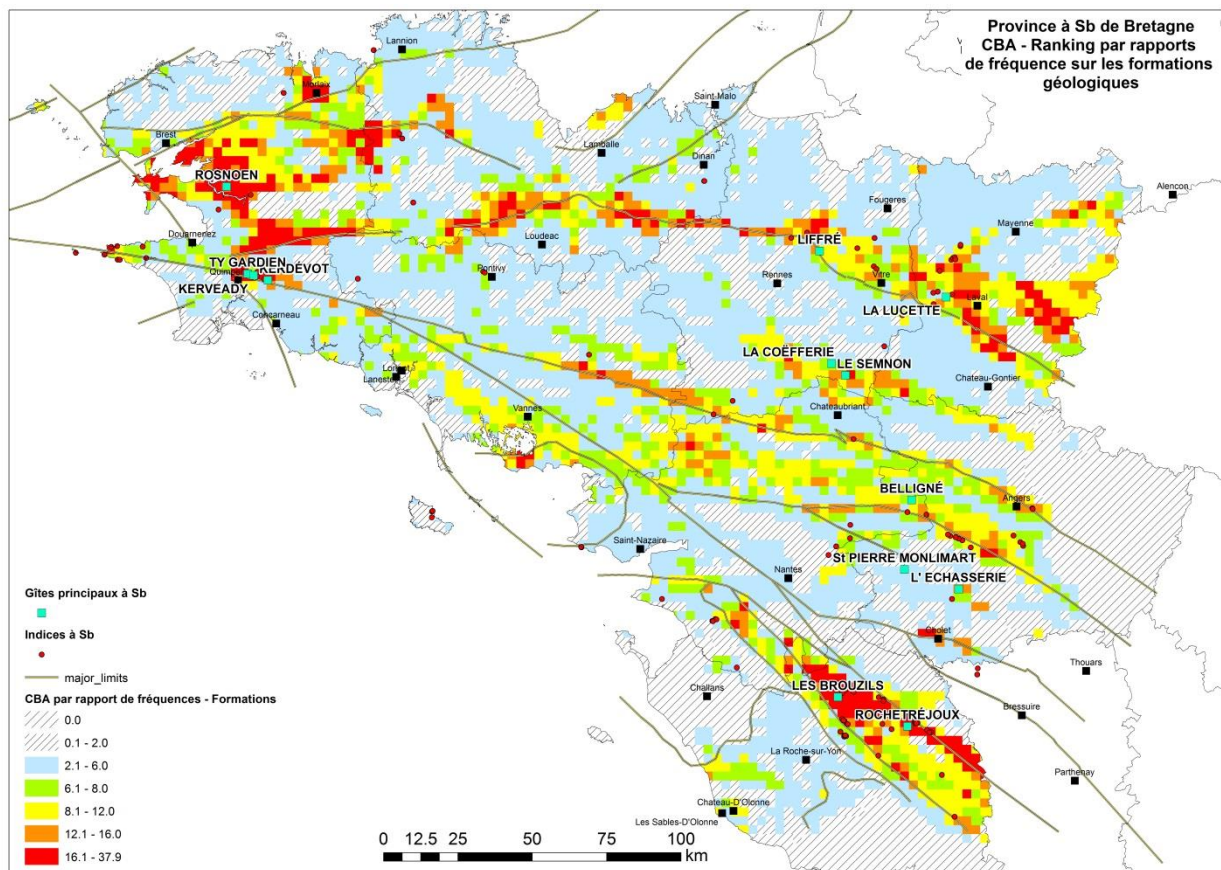


Figure 12 : Classement sur CBA à partir des rapports de fréquence sur les formations seules.

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

En Bretagne, on a la chance de pouvoir disposer d'un levé aérogéophysique récent (Bonijoly *et al.*, 1999) avec des lignes de vols distantes de 1 000 m qui permet d'obtenir des grilles d'une résolution de 250 m.

Durant ce levé, les capteurs installés ont permis de mesurer le champ magnétique et le rayonnement gamma émis naturellement par les roches. Dans le cadre de cette étude, on ne va utiliser que les anomalies extraites à partir des données magnétiques.

On possède aussi sur cette zone une grille gravimétrique à maille de 1 000m (Martelet *et al.*, 2009) qui permet d'extraire des anomalies « lourdes » (Pochon, 2015) (figure 13).

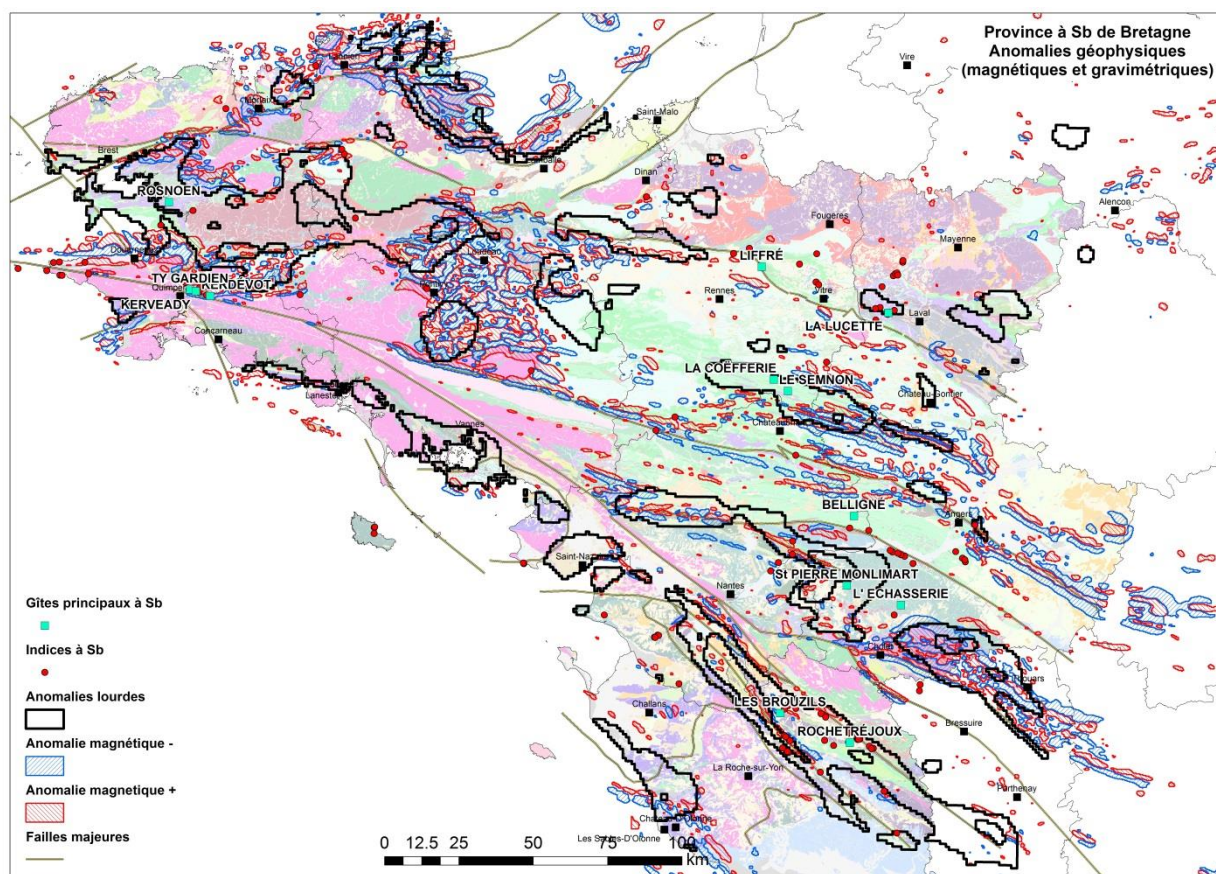


Figure 13 : Carte des anomalies géophysiques de Bretagne (Interprétation de Pochon et al. 2016).

On va alors pouvoir intégrer ces 2 familles d'anomalies (anomalies gravimétriques lourdes ou légères et anomalies magnétique) comme données supplémentaires pour recalculer le classement (figure 14).

Gîte	CAH250	Association lithologique exacte	Anomalie géophysique
Rochetréjoux	78	FQTZ-GRWK3-SCSH3	Gravlourd
Les Brouzils	78	FDOLE-FQTZ-GRWK3-SCSH3	Gravlourd, Mag
L'Échasserie	205	GRAN4-MCGR4-MCSH2	
St Pierre Montlimart	32	FQTZ-MCSH2	Gravlourd
Belligné	60	GRES4-SCSH4-SCSH5-VACI4	
La Coëfferie	118	FDOLE-GRES4-SCSH4	Gravlourd
Le Semnon	124	FDOLE-GRES4-GRES5-SCSH4-SCSH5	Gravlourd
La Lucette	126	FDOLE-GRES4-GRES6-SCSH5-SCSH7	
Ty-Gardien	1	AMPH4-FQTZ-GABB4-GRAN7-GRES7-MIGM7-ORTG4-SCSH2-SCSH4-VDET7	Mag
Kervéady-Kerdévo	164	DIOR4-FQTZ-GRAN7-MCSH2-MIGM7-ORTG4-SCSH2	Mag
Liffre	125	FQTZ-GRES4-GRES5-SCSH2-SCSH4	
Rosnoën	130	CALC6-GRES6-GRWK6-SCSH5-SCSH6	Gravlourd

Tableau 13 : Signatures exactes des cellules étalon pour la lithologie et les anomalies géophysiques (Mag : anomalie magnétique, Gravlourd : anomalie gravimétrique lourde).

On remarque dans le tableau 13 qu'à part la cellule contenant les gisements de Belligné et Liffre, toutes les cellules étalon sont associées à une anomalie gravimétrique ou à une anomalie magnétique. Ces paramètres semblent donc être associés aux minéralisations, ainsi que très récemment proposé par Pochon *et al.* (2016).

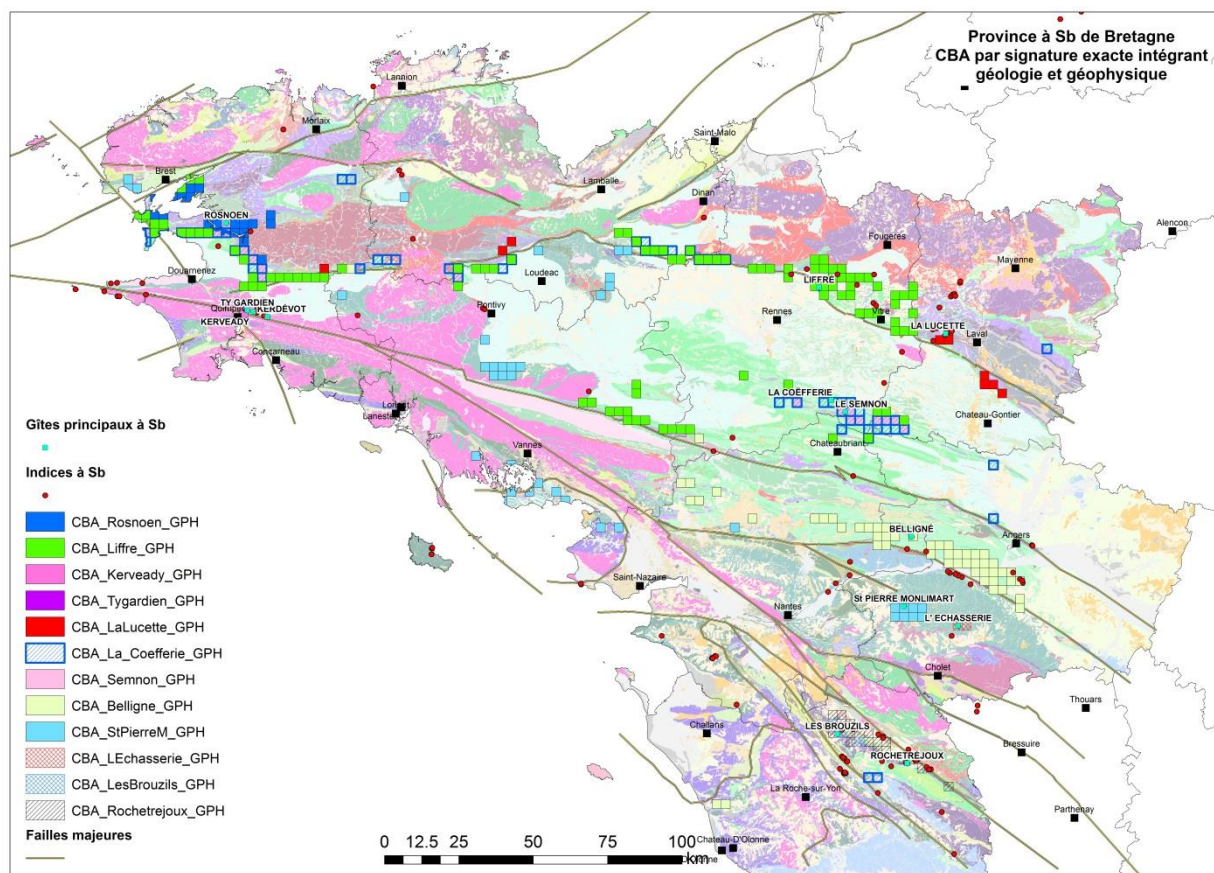


Figure 14 : CBA par signature exacte par cellules contenant un gîte intégrant les formations géologiques et les anomalies géophysiques.

En intégrant la thématique géophysique à la signature lithologique exacte (tableau 13), on diminue le nombre de cellules répondant favorablement, parfois de façon importante (de 121 à 72 pour la Coëfferie, de 256 à 43 pour Saint-Pierre-Montlimart, de 22 à 3 pour Les Brouzils). La réponse est donc plus sélective dans ce cas et probablement plus pertinente qu'avec la lithologie seule.

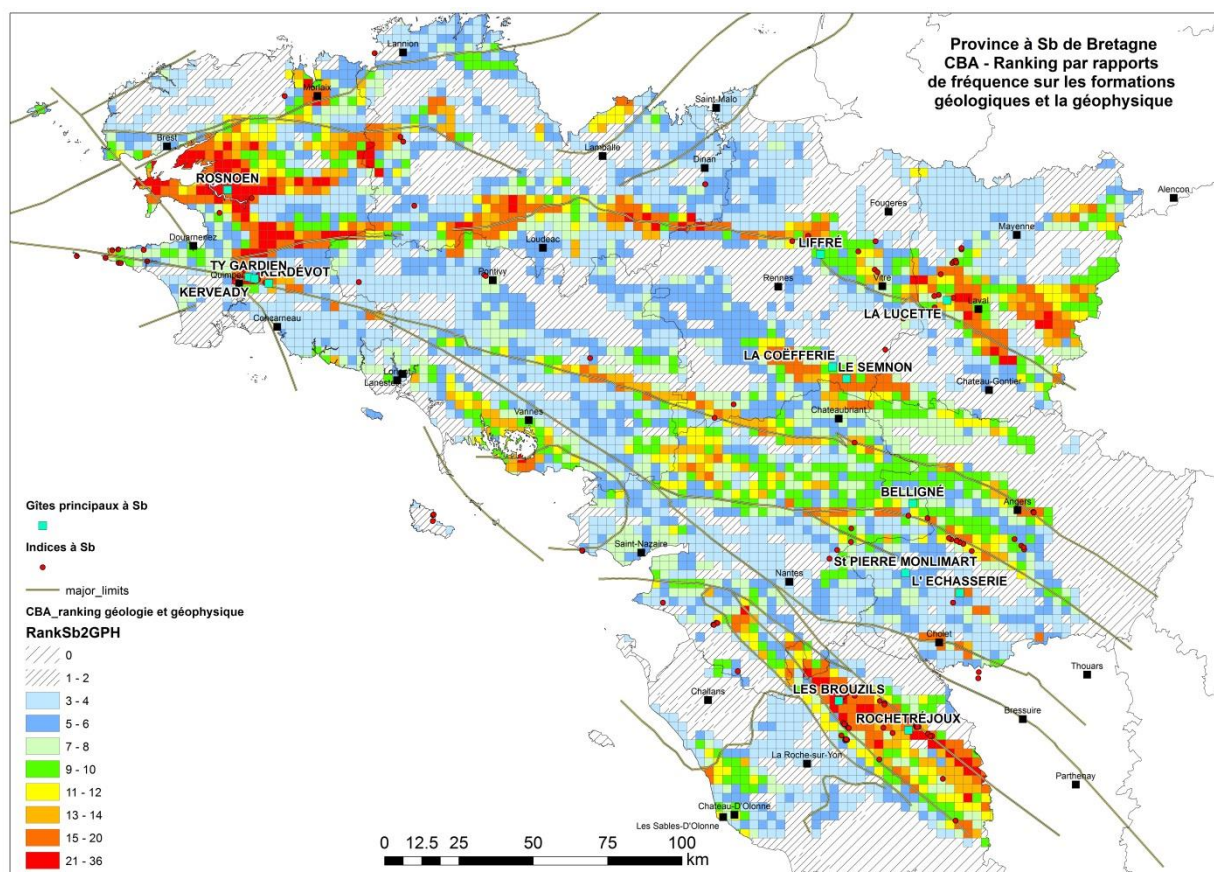


Figure 15 : Classement sur CBA intégrant les données lithologiques et géophysiques.

Les associations (lithologie **avec** géophysique - tableau 13) contenues dans les cellules étalons sont utilisées pour un calcul de classement et utilisant la même méthode que pour la lithologie seule mais en y ajoutant le critère géophysique (figure 15).

Le résultat de ce calcul produit une carte très semblable à celle obtenue dans la figure 11 en terme de cellules valorisées mais, par contre, les valeurs obtenues sont un peu plus contrastées et certaines zones, comme celle du Semnon par exemple présentent une meilleure continuité des fortes valeurs; le district vendéen ressort mieux comme l'ensemble des cellules bordant le cisaillement nord armoricain et la branche nord du cisaillement sud armoricain ainsi que les bordures ouest et sud du Bassin de Châteaulin.

2.6. SÉLECTION DES ZONES FAVORABLES

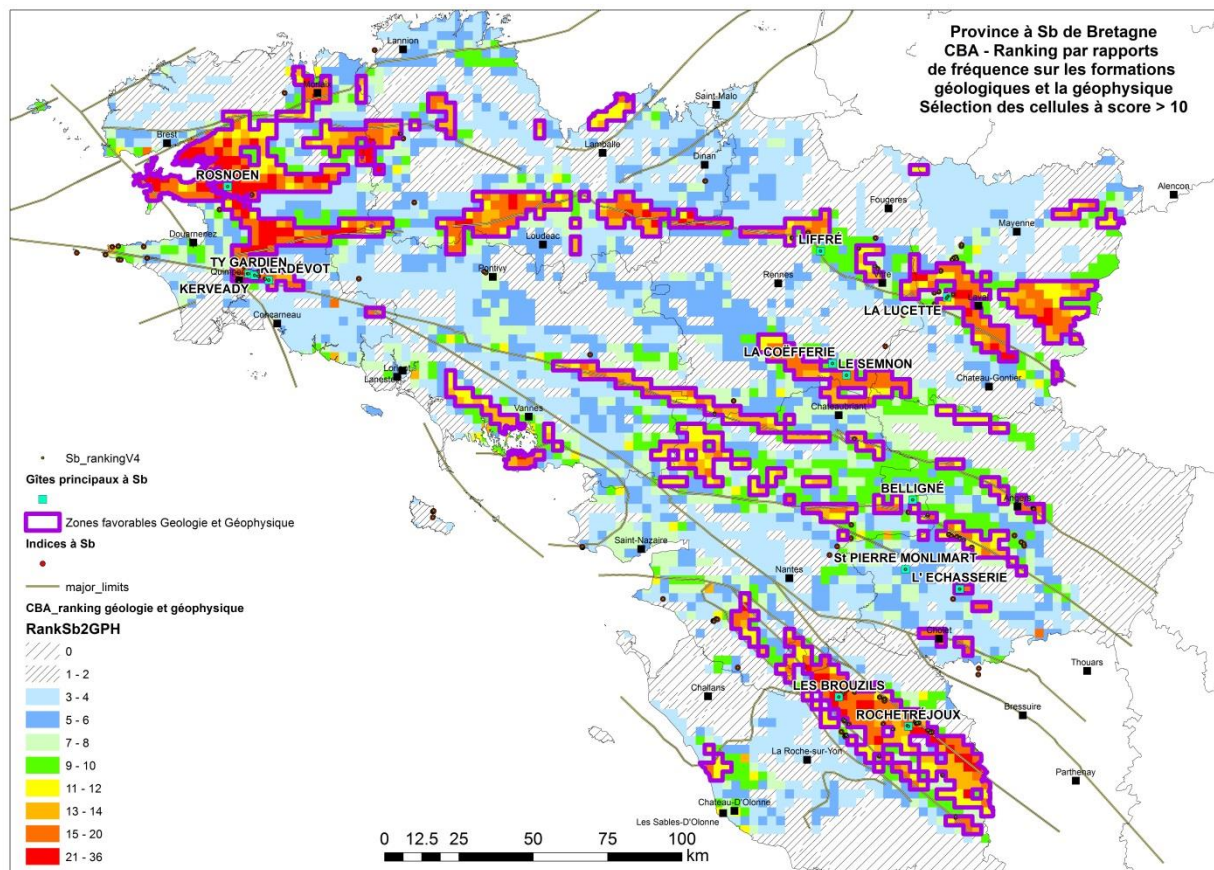


Figure 16 : Sélection des zones les plus favorables à la présence de minéralisations à Sb estimées par classement sur CBA (Valeurs > 10) en utilisant des paramètres lithostratigraphique et géophysiques.

Sur la zone d'étude, 135 indices sur 139 se retrouvent sur des cellules avec un classement supérieur à 0, 108 sur 139 avec un classement supérieur à 5 et 62 sur 139 pour un classement supérieur à 10.

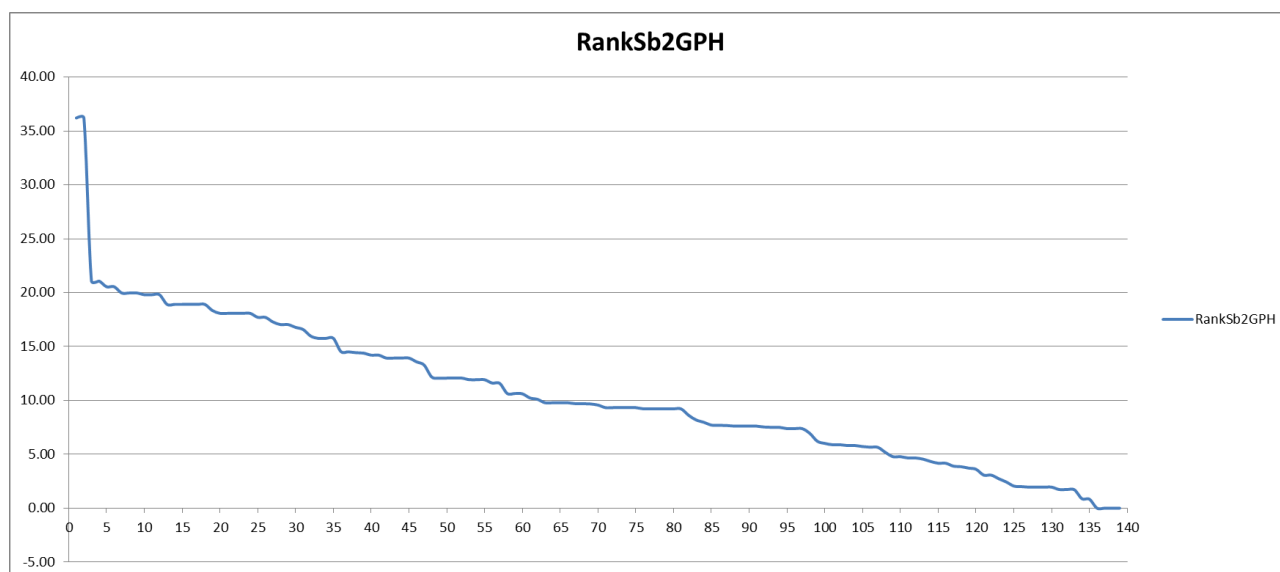


Figure 17 : valeurs décroissantes du ramnking pour les cellules contenant au moins un indice.

En sélectionnant les cellules dont le classement est supérieur à 10 (correspondant à un palier sur la courbe de la figure 17, 995 cellules sont extraites et en éliminant les cellules isolées, on sélectionne 78 zones favorables dont la surface varie de 9 km² à 1450 km² (zone de Rosnoën). 41 zones couvrent plus de 25km² et constituent des zones à prospector de premier intérêt (figure 16).

3. Intersection entre zones favorables et CBA/CAH

3.1. 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. 413 cellules sélectionnées en CAH sont superposées aux zones favorables définies par classement (sur les 672 cellules avec CAH favorable).

L'intégration de la géophysique dans le classement, ce qui n'est pas le cas pour la CAH, a tendance à augmenter un peu la divergence entre les 2 méthodes.

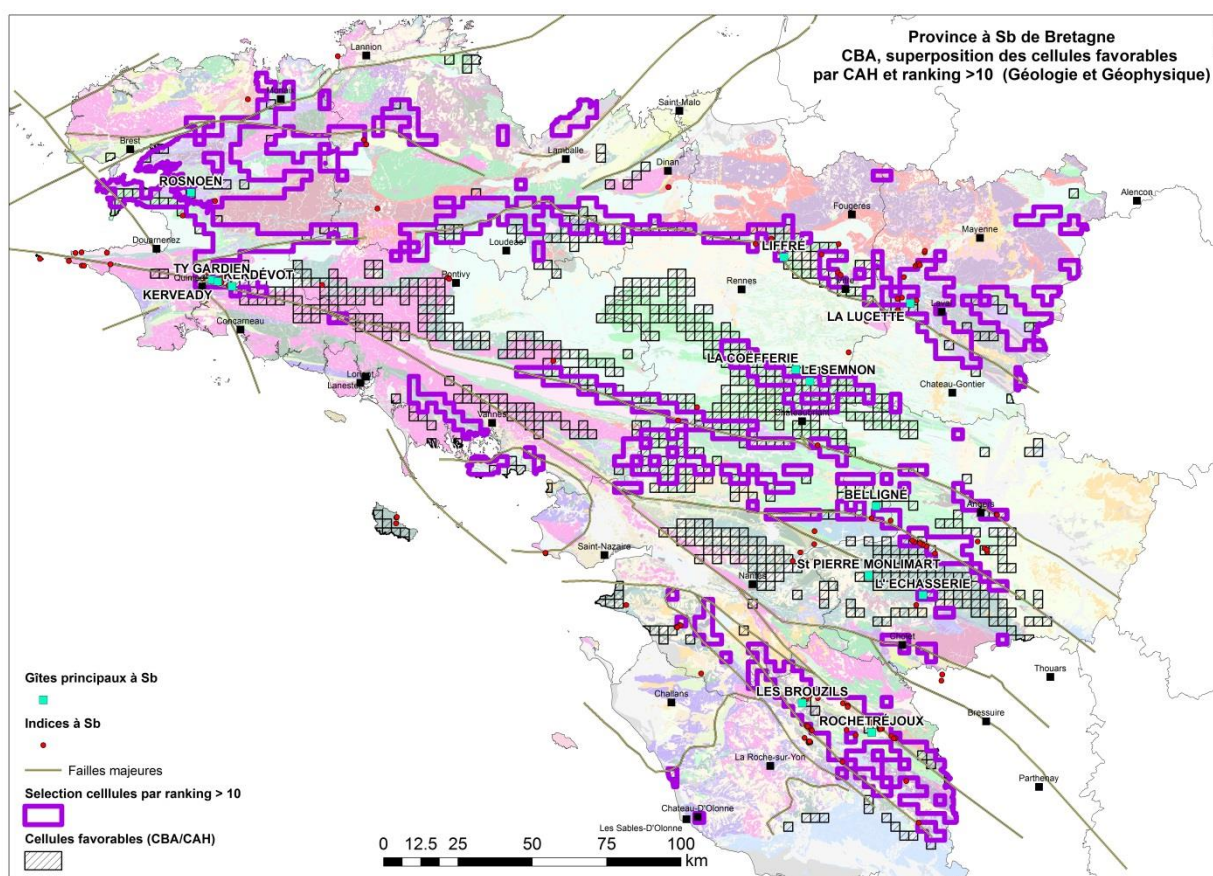


Figure 18 : Intersection entre les zones favorables définies par classement et les cellules issues de la CBA par CAH.

Avec ce traitement (figure 18), la zone du Semnon reste la plus cohérente en surface dans la partie centrale de la Bretagne. L'environnement immédiat du cisaillement nord armoricain et de la branche nord du cisaillement sud armoricain définissent aussi une anomalie quasi continue depuis la terminaison du bassin de Châteaulin en direction de l'est, au-delà de la Lucette.

L'intersection des cellules CBA/CAH et CBA par classement pour les gîtes de type Rosnoën, Liffré et La Lucette sont plus rares et dispersées mais, à quelques exceptions près,

cantonnées dans le bloc nord du Massif armoricain. Les quelques cellules de type Belligné restent à proximité de la branche nord du cisaillement sud armoricain et celles de type Kervéady-Kerdévot sont superposées aux grands accidents, dans la région de Quimper et sur le cisaillement nord armoricain.

Le district de Vendée est mal valorisé (6 cellules communes) mais reste cohérent en classement. Les gîtes de Saint-Pierre-Montlimart et l'Échasserie ressortent mal après intersection, ce qui est en phase avec leur faible potentiel économique.

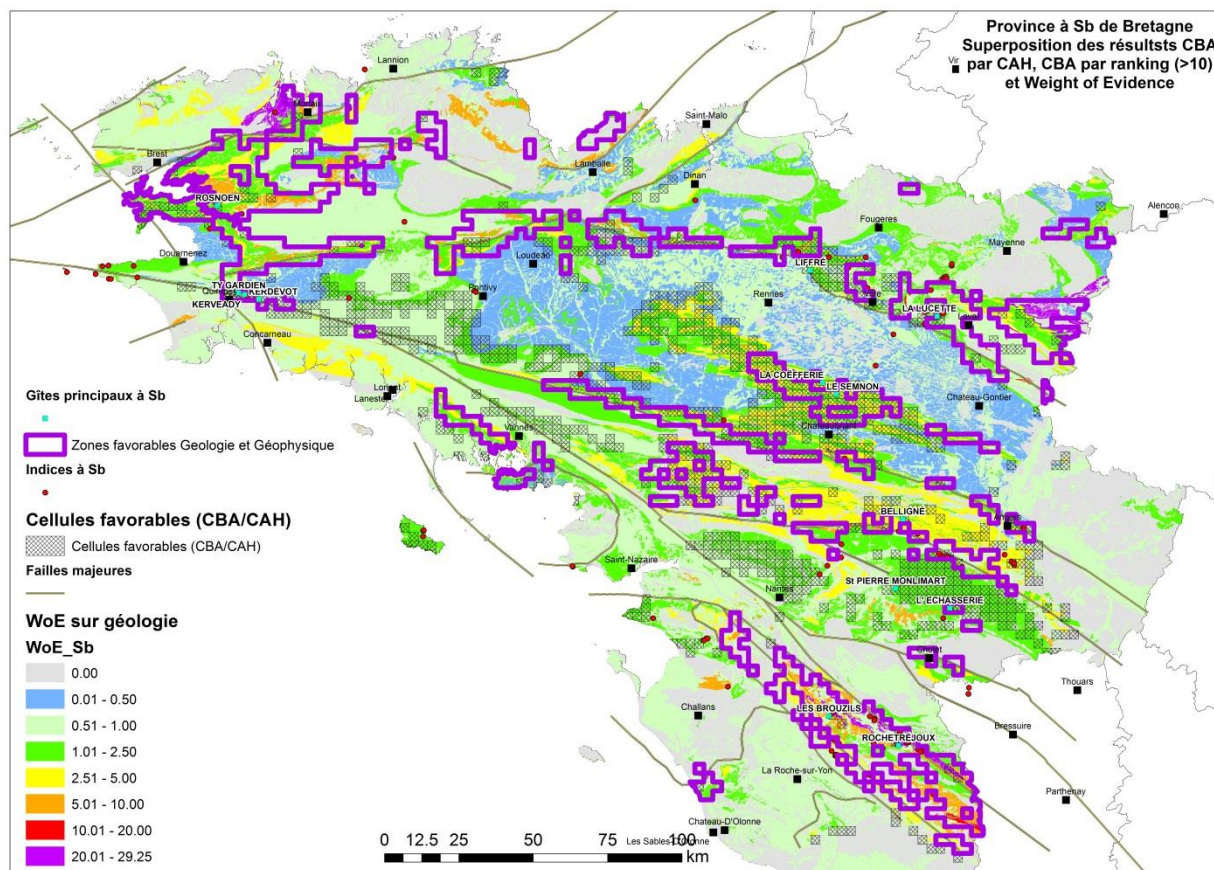


Figure 19 : Weight of Evidence et intersection entre les zones favorables définies par classement et les cellules issues de la CBA par CAH.

La figure 19 représente le cumul de toutes les méthodes de favorabilité employées dans cette étude, les scores du Weight of Evidence et l'intersection entre la CBA par CAH et la CBA par classement. Cette superposition valorise un peu plus le pourtour du Bassin de Châteaulin et surtout, le district vendéen qui répond bien au WoE. Par contre, pas de changement pour les indices de Saint-Pierre-Montlimart, Belligné et de l'Échasserie qui demeurent mal ciblés.

3.2. À L'ÉCHELLE DU DISTRICT

Si on détaille la figure 16 à une échelle correspondant à celles des principaux districts on voit que le district du Semnon (figure 20) ne répond pas très bien au WoE mais que sa partie centrale est bien ciblée par les deux méthodes de CBA. Par contre, le gîte de la Coëfferie ne ressort pas en classement pour des valeurs de score > 10, ce qui est surtout dû à la grande « banalité » des formations qui en constituent l'environnement. L'ensemble de la zone justifierait une prospection ciblée sur l'antimoine.

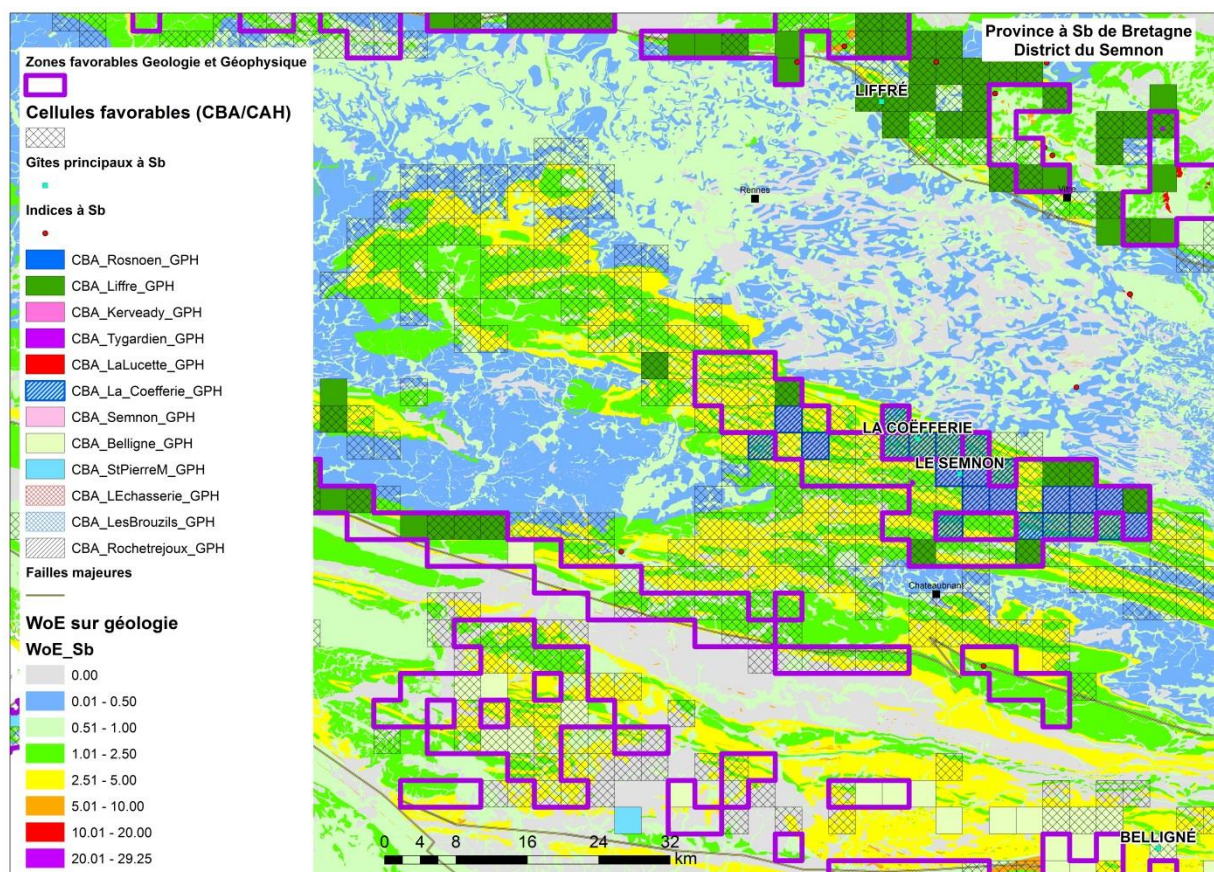


Figure 20 : Zones favorables du secteur du Semnon.

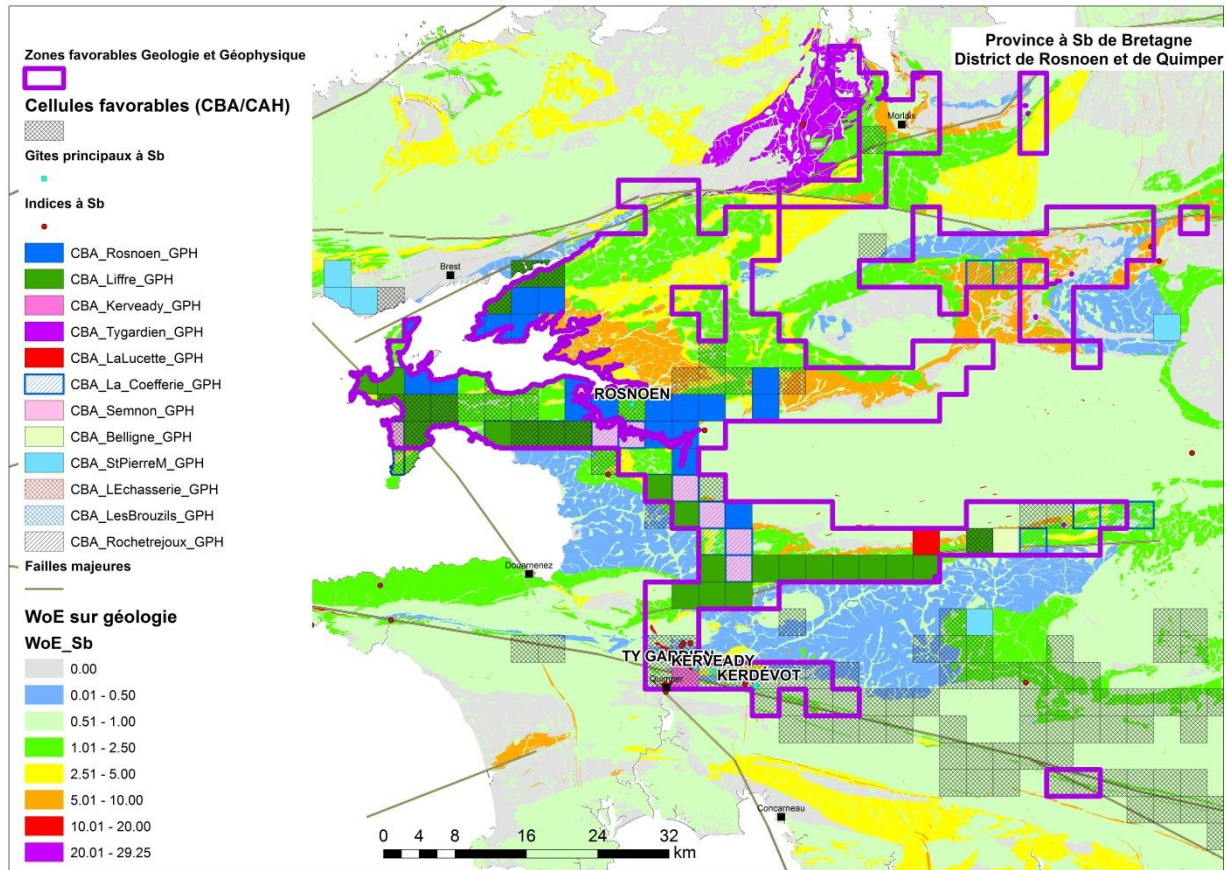


Figure 21 : Zone favorable du secteur Rosnoën-Quimper.

Les zones favorables de Rosnoën et celles contenant le district de Quimper (figure 21) sont en continuité (elles sont en fait séparées en 2 anomalies par l'estuaire de l'Aulne) mais elles correspondent à deux typologies très différentes, Rosnoën étant associé aux formations périphériques du nord du bassin de Châteaulin et le district de Quimper, beaucoup plus restreint, étant associé au cisaillement sud armoricain et la présence d'intrusifs basiques à intermédiaires. On notera aussi que les indices de la pointe ouest de Douarnenez ne génèrent pas de zone favorable, quelle que soit la méthode de ciblage. La bordure sud du bassin de Châteaulin, le long d'un grand linéament montre des signatures de type Liffre et Semnon-La Coëfferie qui sont associés à des associations lithologiques très banales en Bretagne.

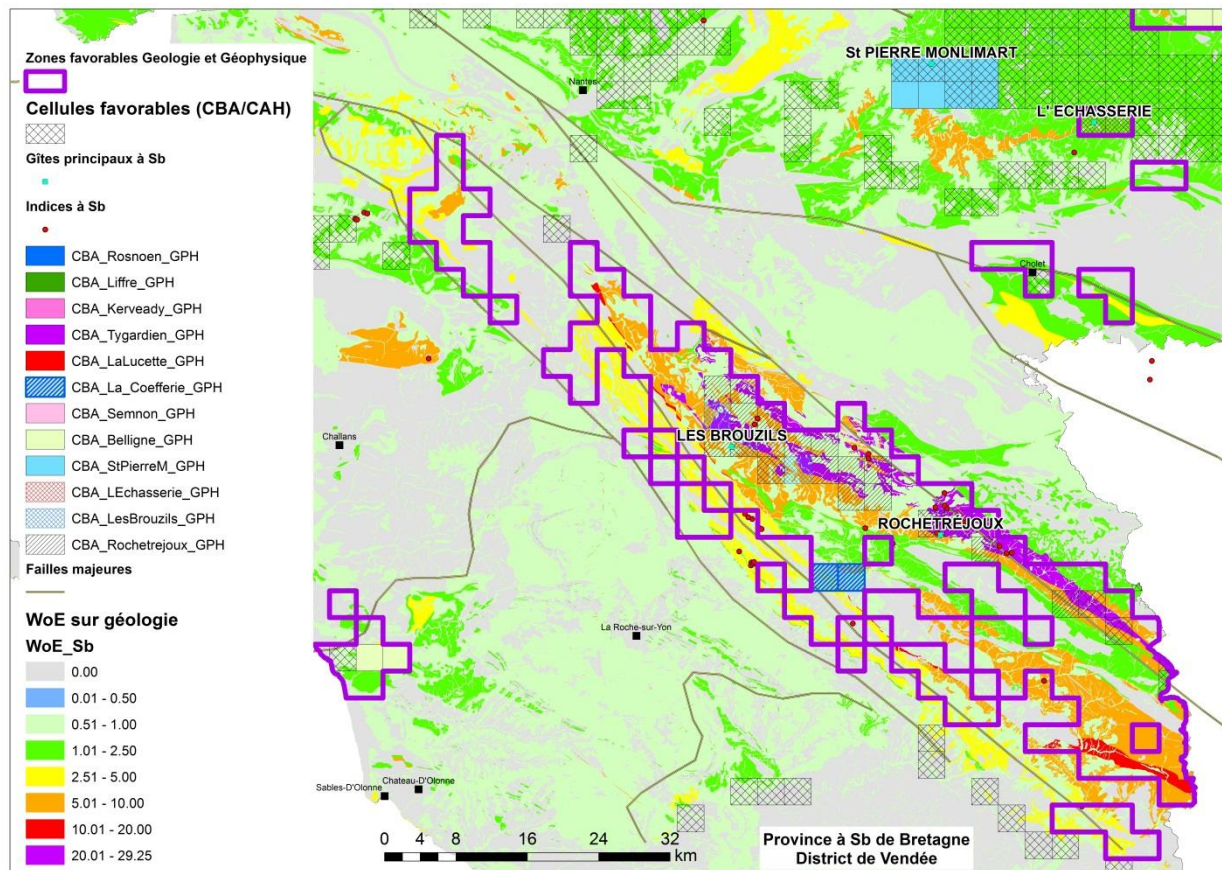


Figure 22 : zones favorables dans le district de Vendée.

Le district vendéen (figure 22) est mal défini par la CBA par CAH qui reste centrée sur les indices de référence. Par contre, la CBA par classement définit une vaste zone favorable bien corroborée par le WoE avec les bons scores attribués aux formations méta-sédimentaires ou volcano-sédimentaires cambriennes qui étendent la zone favorable en directions du sud-est. L'environnement des gîtes de Saint-Pierre-Montlimart et de l'Échasserie ressort sous forme d'une vaste zone en CBA par CAH grâce à un environnement très banal (MCSH2 et Filons de quartz), mais logiquement pas en CBA par rapport de fréquence. Ce sont donc des gîtes à faible priorité.

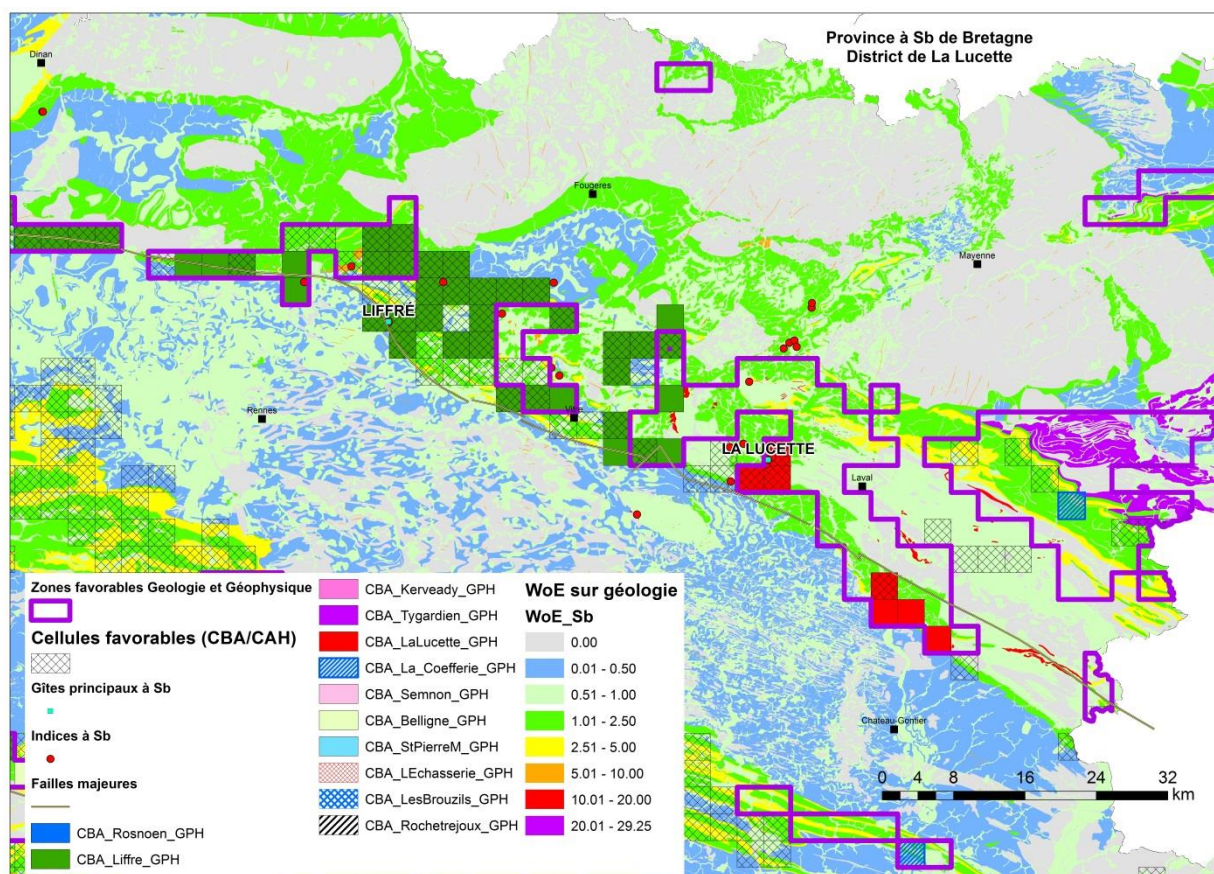


Figure 23 : Zones favorables du secteur de La Lucette.

Dans le secteur de la Lucette (figure 23), plusieurs zones favorables de dimension moyenne sont mises en évidence autour du bassin de Laval avec un important développement en CBA par classement et en WoE (SCSH3) dans la bordure nord-est, sans indice signalé. Les signatures par CAH sont variées dans ce secteur et correspondent soit à des associations de type La Lucette à proximité du gisement, soit du type Lifféré à proximité de cet indice et au nord de Vitré. Toutes ces zones favorables justifieraient des travaux de terrain.

4. Conclusion

Les différentes approches de prédictivité utilisées dans cette étude (Weight of Evidence, CBA par CAH et classement avec un jeu de données comprenant 108 indices à antimoine, 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 découvertes.

Par exemple, les zones favorables définies pour le district du Semnon et celui du district La Lucette-Liffré justifient la reprise de travaux de prospection ciblés sur l'antimoine.

Les zones favorables correspondant à l'environnement du district de Rosnoën couvrent les formations de la périphérie du bassin de Chateaulin, surtout à l'ouest et au sud. Ce district constitue un objectif majeur pour la recherche de gisements stratoïdes (qui constituent les plus grands gisements mondiaux).

Le district de Quimper apparaît très localisé autour des gîtes connus et les quelques cellules favorables ciblées en dehors sont toujours associées aux grands cisaillements et à des intrusifs dioritiques.

Pour le district vendéen, la réponse en CBA définit des zones favorables très limitées. Par contre, les scores issus de la méthode WoE semblent confirmer l'intérêt de ce district avec de potentielles extensions sur tout le synclinal de Chantonay.

Au centre de l'unité de Lanvaux-St Georges, au sud de Redon et au nord de Blain, se localise des zones favorables pour Sb assez étendues avec des signatures variées en CBA mais, sans indice répertorié. Des contrôles de terrain ciblés sont indiqués pour confirmer l'intérêt de ce secteur neuf. Cette zone contient quelques indices à As et/ou Au.

Les autres zones favorables définies par l'une et/ou l'autre méthode semblent moins prometteuses car elles sont rattachées à des environnements géologiques très banals et correspondent à des gîtes n'ayant pas fourni de ressources importantes. Toutefois, on ne doit pas complètement les éliminer et la prise en compte d'autres facteurs pourraient en rétablir l'intérêt.

Il faut aussi souligner l'intérêt d'avoir pu intégrer des données géophysiques qui ont permis d'améliorer les résultats obtenus par classement et de mieux cibler les zones de premier intérêt (Semnon et Rosnoën).

5. Références

- Ballèvre M., Bosse V., Dabard M.P., Ducassou C., Fourcade S, Paquette J.L., Peucat J.J., and 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.
- Bellot J.P., Lerouge C., Bailly L., and Bouchot V. 2003. The Biards Sb-Au–Bearing Shear Zone (Massif Central, France): An Indicator of Crustal-Scale Transcurrent Tectonics Guiding Late Variscan Collapse. *Economic Geology* 98: 1427–1447. doi:10.2113/gsecongeo.98.7.1427.
- Blouin, J.P., 1991. District antimonifère de Vendée. Rappel sur les réserves démontrées à l'intérieur des divers P.E.R. Rapport BRGM DMM/DL/NANTES RVL/FD92-04.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS: Pergamon, Oxford, 398 pp.
- Bonijoly, D., J. Perrin, C. Truffert, and Asfirane F. 1999. Couverture géophysique aéroportée du Massif Armoricain. Magnétisme et radiométrie spectrale. Rapport BRGM, RR-40471-FR, BRGM, Orléans, 75 pp
- BRGM 1987. Plan minier breton, exercice 1985, rapport de fin de travaux, les recherches minières. Rapport BRGM 87-DAM-018-OP4, 12 p.
- BRGM 1988a. Plan minier breton, exercice 1986, rapport de fin de travaux, les recherches minières. Rapport BRGM 88-DAM-019-OP4, 11 p.
- BRGM 1988b. Inventaire du Territoire Métropolitain. Les minéralisations Sb de La Baussonnière (Vendée). Rapport BRGM DAM/DL/NANTES. RVL/FD 91-01., 6 p.
- BRGM 1990. Plan minier breton, convention 1988, rapport de fin de travaux, les recherches minières. Rapport BRGM RR-30413-FR, 10 p.
- Carranza E.J.M., 2011. Geocomputation of mineral exploration targets. *Computers & Geosciences* 37, pp. 1907-1916.
- Casas J. M., Crisostomo G, and Cifuentes L. 2004. Antimony Solubility and Speciation in Aqueous Sulphuric Acid Solutions at 298 K. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 82: 175–183.
- 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.

Deschamps F., Godard M., Guillot S. and Hattori K. 2013. Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review. *Lithos* 178 :96–127. doi:10.1016/j.lithos.2013.05.019.

Ewers G. R. 1977. Experimental hot water-rock interactions and their significance to natural hydrothermal systems in New Zealand. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41: 143–150. doi:10.1016/0016-7037(77)90194-6.

Gentilhomme P., Deschamps Y., Mroz J.P. and Vadala, P., 2001. Synthèse et bilan de l'Inventaire minier métropolitain, volet de réévaluation économique. Rapport BRGM RP-51422-FR, 62p.

Gorichon A. and Kerjean M. 1979., Reconnaissance par travaux miniers des indices d'antimoine de Quimper (PER de l'Odet). Résultats au 31 mai 1979. Rapport BRGM 79-RDM-035-FE, 13 p.

Gregory D. D., Large R.R., Halpin J.A., Baturina E.J., Lyons T.W., Wu S., Danyushevsky L., et al. 2015. Trace Element Content of Sedimentary Pyrite in Black Shales'. *Economic Geology* 110: 1389–1410. doi:10.2113/econgeo.110.6.1389.

Grund S. C., Hanusch K., Breunig H.J., and Wolf H.U. 2006. Antimony and Antimony Compounds. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/14356007.a03_055.pub2/abstract.

Guiollard P.C., 2009. L'industrie minière de l'Antimoine et du Tungstène. Emergence, prospérité et disparition des exploitations de France métropolitaine aux XIXe et XXe siècles. Thèse de l'Université de Haute-Alsace Mulhouse-Colmar, Atlantica éditions, Biarritz, 400 pp.

Henley R. W. and Berger B. R. 2013. 'Nature's refineries — Metals and metalloids in arc volcanoes'. *Earth-Science Reviews* 125: 146–170. doi:10.1016/j.earscirev.2013.07.007.

Jaguin J. 2012. 'Datation et caractérisation de processus minéralisateurs à l'Archéen : Application à l'Antimony Line, Ceinture de roches vertes de Murchinson, Afrique du Sud'. Thèse de l'Université de Rennes 1, 349 p.

Jochum K. P. and Hofmann A. W. 1997. Constraints on earth evolution from antimony in mantle-derived rocks. *Chemical Geology* 139: 39–49. doi:10.1016/S0009-2541(97)00032-6.

Li Y.H. 2000. *A compendium of geochemistry: From solar nebula to the human brain*. Princeton University Press, 440 p.

Martelet G., Pajot G. and 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.

- McCammon R.B., Botbol J.M., Sinding-Larsen R., Bowen R.W., 1983 Characteristic Analysis-1981: Final Program and a Possible Discovery. *Mathematical Geology* 15(1), pp. 59-83.
- Moyroud B., Féraud, J., Bornuat, M. and Ziserman, A., 1979. Ressources minières françaises. Tome 6, les gisements d'Antimoine (Situation en 1979). Rapport BRGM RR-41430-FR-06, 121 p.
- Obolensky A.A., Gushchina L.V., Borisenko A.S., Borovikov A.A. et G.G. Pavlova, 2007. Antimony in hydrothermal processes: solubility, conditions of transfer, and metal-bearing capacity of solutions. *Russian Geol. Geophy.*, 48, p. 992–1001. doi:10.1016/j.rgg.2007.11.006
- Peng J.T., Hu R.Z., and Burnard P. G. 2003. Samarium–neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): the potential of calcite as a geochronometer. *Chemical Geology* 200: 129–136. doi:10.1016/S0009-2541(03)00187-6.
- Pitcairn I. K., Craw D., and Teagle D.A.H.. 2015. Metabasalts as sources of metals in orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita* 50: 373–390. doi:10.1007/s00126-014-0547-y.
- Pitcairn I. K., Olivo G.R., Teagle D.A.H. and Craw D. 2010. Sulfide Evolution During Prograde Metamorphism of the Otago and Alpine Schists, New Zealand. *The Canadian Mineralogist* 48: 1267–1295. doi:10.3749/canmin.48.5.1267.
- Pochon A., Gapais D., Gumiaux C., Branquet Y., Gloaguen E., Cagnard F., Martelet G. 2015. Sb-deposits in the Variscan Armorican belt (France) - potential relationships with basic intrusions and high-density magnetic lithologies at depth. SGA 2015 Nancy.
- Pochon A., Gapais D., Gloaguen E., Gumiaux C., Branquet Y., Cagnard F., Martelet G. 2016. Antimony deposits in the Variscan Armorican belt, a link with mafic intrusives ?. *Terra Nova*, 28: 138-145. doi: 10.1111/ter.12201
- Robb L. 2005. *Introduction to ore-forming processes*. Wiley-Blackwell, 384 p.
- Rudnick R.L. and Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3:1–64. Elsevier Ltd.
- Schwarz-Schampera U. 2014. Antimony. In: Gunn, G. (Ed): *Critical Metals Handbook*, American Geophysical Union - John Wiley & Sons, Ltd, pp. 70–98.
- Tourlière B., Pakyuz-Charrier E., Cassard D., Barbanson L., and 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.

- White D.E. 1981. Active geothermal systems and hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 75th Anniversary volume: 392–423.
- Yang D.S., Shimizu M., Shimazaki H., Li X.H., and Xie Q.L.. 2006. Sulfur Isotope Geochemistry of the Supergiant Xikuangshan Sb Deposit, Central Hunan, China: Constraints on Sources of Ore Constituents. *Resource Geology* 5: 385–396. doi:10.1111/j.1751-3928.2006.tb00291.x.
- Zotov A. V., Shikina N. D. and Akinfiyev N. N. 2003. Thermodynamic properties of the Sb^(III) hydroxide complex Sb(OH)_{3(aq)} at hydrothermal conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67 (10): 1821-1836. doi:10.1016/S0016-7037(02)01281-4.

Annexe 1

Liste des fichiers numériques sur le CD

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
Anomalies_gravi.shp	Contours des anomalies denses (issues de la gravimétrie) en profondeur issues de l'analyse de Pochon et al., 2016	Polygones
Anomalies_mag.shp	Contours des anomalies magnétiques (signal analytique) en profondeur issues de l'analyse de Pochon et al., 2016	Polygones
CBA_par_CAH.shp	Classification des cellules de CBA par CAH à 250 classes	Polygones
CBA_par_CAH_Symbo_Gites.lyr (CBA_par_CAH.shp)	Classification des cellules de CBA par CAH avec symbologie par gîte.	Fichier de couche
CBA_geol_signatures.shp	CBA par signature exacte à partir de la géologie	Polygones
CBA_geol_geophy_signatures.shp	CBA par signature exacte à partir de la géologie et de la géophysique (gravimétrie et magnétisme)	Polygones
CBA_classement_Geol.shp	CBA par classement sur les formations géologiques (sans géophysique)	Polygones
CBA_classement_FRQ_Geol_Geophy.shp	CBA par fréquences sur les formations géologiques et les anomalies géophysique	Polygones
Classement_sup_10.shp	Classement par rapport de fréquences sur les formations géologiques et la géophysique. Sélection des cellules supérieures à 10.	Polygones
WoE.shp	Polygones des formations géologiques classés par scores de la méthode du Weight of Evidence	Polygones



Centre scientifique et technique
Direction des Georessources
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr