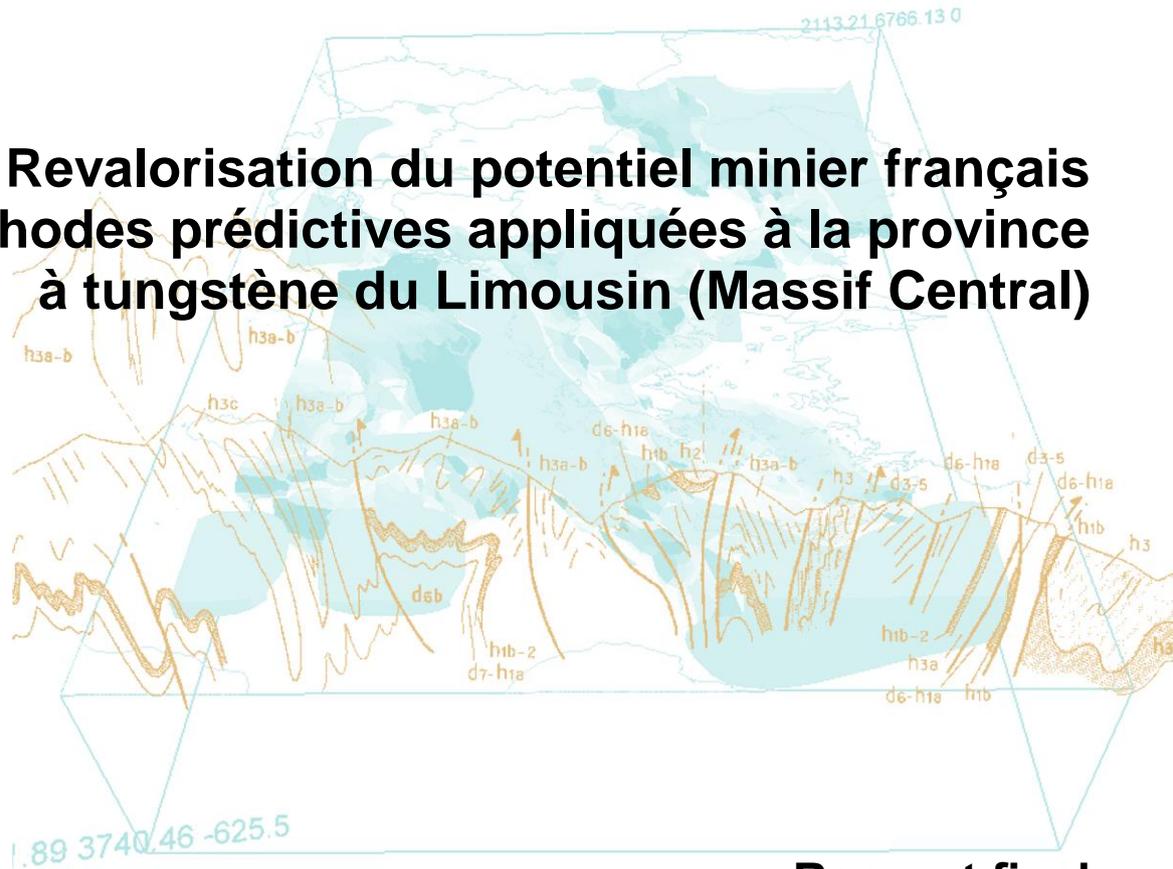




Revalorisation du potentiel minier français Méthodes prédictives appliquées à la province à tungstène du Limousin (Massif Central)



Rapport final

BRGM/RP-65729-FR

Avril 2017

 <p>Liberté • Égalité • Fraternité RÉPUBLIQUE FRANÇAISE</p>
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER
MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DE L'INDUSTRIE ET DU NUMÉRIQUE



Revalorisation du potentiel minier français Méthodes prédictives appliquées à la province à tungstène du Limousin (Massif Central)

Rapport final

BRGM/RP-65729-FR

Avril 2017

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

J. Melleton, B. Tourlière, J.M. Angel (auteurs)

Avec la collaboration de

E. Gloaguen

Vérificateur :

Nom : G. Bertrand

Fonction : Ingénieur

Date : 15/06/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : JC. Guillaneau

Fonction : Directeur

Date : 03/07/2017

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 : Tungstène, Prédicativité, Limousin, Massif Central.

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

Melleton J., Tourlière B., Angel J.M., Gloaguen E. (2017) - Revalorisation du potentiel minier français. Méthodes prédictives appliquées à la province à tungstène du Limousin (Massif Central). Rapport final. BRGM/RP-65729-FR, 104 p., 37 fig., 11 tabl., 2 ann.

Synthèse

Depuis 2012, différentes actions ont été réalisées dans le cadre du thème 1 « ressources minérales » de la Convention entre le BRGM et la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM), sous le terme générique de « réévaluation du potentiel français en ressources minérales ».

En 2015, dans le cadre de l'action 2.3, la réalisation de synthèses portant sur des districts prometteurs a été initiée, en s'appuyant sur les connaissances géologiques et gîtologiques régionales, l'apport de la géophysique, lorsqu'elle est disponible, ainsi que les évolutions des concepts métallogéniques.

Afin de bénéficier d'un jeu de données d'apprentissage suffisant, nous avons choisi de travailler à l'échelle de la province. Ainsi, la partie nord-ouest du Massif Central, correspondant globalement au Limousin, a fait l'objet d'une étude de favorabilité pour la présence de gisements de tungstène. Cette province contient en effet de nombreux gîtes et indices et l'objectif de ce projet est d'identifier des districts présentant un potentiel élevé de découverte de gîtes susceptibles de constituer des gisements économiques.

La mise en œuvre d'une étude prédictive est généralement réalisée sur un ensemble géologique continu. L'idée est ensuite de décliner les résultats sur les districts d'intérêt. Cependant, le Limousin correspond à une entité géologique diversifiée, et l'application d'une étude de favorabilité s'est révélée complexe. Nous avons donc choisi de conserver les résultats de cette approche dans un rapport dédié à la province complète.

À partir des données disponibles (cartes géologiques, gîtes et indices, géochimie et prospection alluvionnaire ; la géophysique n'étant pas disponible), les différentes approches de prédictivité mises en œuvre ont permis de sélectionner 15 zones favorables à la présence de gîtes à W. La prise en compte des données géochimiques permet d'ajouter 4 zones situées en périphérie des zones précédentes.

Les zones favorables qui ne sont pas associées à des indices connus présentent toutefois des marqueurs de minéralisation à W, en géochimie, et/ou en alluvionnaire, sachant que les échantillonnages ne couvrent pas toute la zone d'étude.

Ces zones favorables se répartissent en couronne autour du grand massif granitique de Guéret et couvrent les principales unités métamorphiques du Limousin qui ne semblent donc pas jouer de rôle préférentiel. La plupart sont associées à la présence d'intrusions granitiques dans des environnements métamorphiques variés. L'observation de la répartition entre indices et grands décrochements semble montrer qu'il existe une relation spatiale entre ces deux types d'objets. Cela permet alors de focaliser des zones d'intérêt prioritaires sur les intersections entre les zones issues des traitements de prédictivité et ces grands accidents.

Les zones ainsi définies sont souvent de grande taille et nous pouvons estimer qu'elles ne sont pas très focalisées. Cette imprécision est certainement due au fait que les seuls paramètres géologiques de surface à l'échelle de 1/50 000 ne sont pas suffisants pour obtenir des résultats plus précis pour la recherche d'objets de petite taille. La conséquence de ces observations est que des efforts de prospection importants seront nécessaires pour mieux cibler les zones d'intérêt dans les domaines favorables identifiés.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Le tungstène dans le Limousin	11
2.1. GÉNÉRALITÉS.....	11
2.2. PORTEURS MINÉRALOGIQUES DU TUNGSTÈNE	12
2.3. GÎTOLOGIE ET MÉTALLOGÉNIE DU TUNGSTÈNE	14
2.3.1. Les minéralisations filoniennes à quartz-wolframite associées aux granites	14
2.3.2. Les minéralisations de type pipe bréchique	15
2.3.3. Les minéralisations disséminées.....	16
2.4. LES DISTRICTS À TUNGSTÈNE DU LIMOUSIN.....	17
2.4.1. District des Montmins-Échassières	17
2.4.2. District du Confolendais : prospects de Pinardeau-Pierre Bergère et de Périssac.....	18
2.4.3. District des Monts-de-Blond : Vaulry-Cieux.....	20
2.4.4. Puy-les-Vignes.....	21
2.4.5. Neufs-Jours	23
3. Étude de favorabilité à partir des formations géologiques	27
3.1. CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL	27
3.2. CARTE GÉOLOGIQUE SYNTHÉTISÉE	30
3.2.1. Codage lithologique	30
3.2.2. Codage stratigraphique.....	31
3.3. WEIGHT OF EVIDENCE (WOE).....	35
3.4. CBA (CELL BASED ASSOCIATION)	37
3.4.1. Principes de la CBA	37
3.4.2. CBA par CAH.....	38
3.4.3. CBA par signature exacte	41
3.4.4. Comparaison entre CBA par CAH et CBA par signature exacte.....	44
3.4.5. CBA par hiérarchisation (Ranking).....	45
4. Sélection de zones favorables.....	49
5. CBA – Ranking sur géochimie.....	51
6. Rôle des failles	55
7. Bilan des zones favorables.....	57

8. Conclusions	71
9. Bibliographie	73

Liste des figures

Figure 1 : Production et réserves mondiales de tungstène (d'après USGS).	11
Figure 2 : Coupe idéalisée d'une intrusion granitique avec des minéralisations filoniennes à W-Sn situées au sommet. Les deux exemples de profondeurs différentes illustrent les différentes morphologies et disséminations qui peuvent en résulter. Modifié d'après Sinclair (1996).	14
Figure 3 : Carte de localisation des pipes bréchiques à Cu-Mo-W du district de Washington (Sonora, Mexique) et coupe schématique des pipes de Washington et Bolivar (extrait de Simmons & Sawkins, 1983).	15
Figure 4 : Coupe synthétique du district à greisens de Krásno, République Tchèque (extrait de Jarchofský, 2006).	16
Figure 5 : Carte et coupe géologique simplifiée du secteur d'Échassières (D'après Aubert, 1969 et Cuney et al., 1992).	17
Figure 6 : Carte géologique simplifiée du district à W du Confolendais (réalisée à partir des cartes géologiques au 1/50 000 de Confolens et l'Isle-Jourdain).	19
Figure 7 : Carte géologique simplifiée du district de Vaulry-Cieux (d'après les cartes géologiques au 1/50 000 d'Oradour-sur-Glane et Ambazac). Le gîte exploité de Cieux (non représenté) se localise à 4,5 km au sud-ouest de Vaulry.	20
Figure 8 : Carte géologique du district de Puy-les-Vignes (modifiée d'après les cartes géologiques au 1/50 000 harmonisées de la Haute-Vienne et de la Creuse) - légende page suivante (Figure 9).	21
Figure 9 : suite de la Figure 8.	22
Figure 10 : Carte géologique simplifiée des environs du gîte de Neuf-Jours (d'après la carte géologique au 1/50 000 d'Ussel).	23
Figure 11 : Coupes interprétatives du gîte de Neuf-Jours (d'après Béziat & Coulomb, 1990).	24
Figure 12 : Carte lithostructurale du Massif Central (D'après Faure et al., 2005).	27
Figure 13 : Coupe synthétique à l'échelle lithosphérique du Limousin (D'après Faure et al., 2005).	28
Figure 14 : Cartographie des grandes unités métamorphiques du Limousin.	32
Figure 15 : Carte géologique du Limousin réalisée à partir d'une synthèse des cartes au 1/50 000.	33
Figure 16 : Zoom sur la carte géologique synthétisée.	34
Figure 17 : Carte de résultat du calcul du WoE pour W dans le district du Limousin.	36
Figure 18 : sélection de cellules présentant des signatures similaires à celles contenant au moins un gîte par CBA/CAH.	38
Figure 19 : Cellules du même groupe de CAH que celles contenant un ou plusieurs gîtes.	39
Figure 20 : Report cartographique des cellules présentant les mêmes associations lithologiques que celles contenant au moins un gîte à W.	43
Figure 21 : Image du ranking pour W en Limousin et report des cellules de signatures exactes....	47

Figure 22 : Contourage de zones favorables à la présence de minéralisation en W à partir du ranking sur CBA.	49
Figure 23 : Cellules présentant la même signature qu'une cellule contenant au moins un échantillon de géochimie à une teneur de plus de 100 ppm de W.	51
Figure 24 : Report des zones favorables contourées à partir des indices sur fond du ranking calculé à partir des échantillons de géochimie à plus de 100ppm W et report des échantillons à plus de 20 ppm W.	53
Figure 25 : Relation entre failles majeures du Limousin et des zones favorables à W.	55
Figure 26 : Intersection entre zones favorables et un buffer de 3 000 m autour des décrochements majeurs.	56
Figure 27 : Paramètres associés aux zones favorables du Confolendais, de S-Confolens, de Glane et des Monts de Blond (Limousin ouest).	59
Figure 28 : Paramètres associés à la zone favorable de la Marche (Limousin nord).	60
Figure 29 : Paramètres associés à la zone favorable d'Aigurande (Limousin nord).	61
Figure 30 : Paramètres associés aux zones favorables Montluçon et N-Sillon houiller (Limousin nord-est).	62
Figure 31 : Paramètres associés aux zones favorables d'Echassières et des Bajaris (Limousin est).	63
Figure 32 : Paramètres associés à la zone favorable de Montagne limousine (Limousin centre-est).	64
Figure 33 : Paramètres associés à la zone favorable de Laroquebrou (Limousin sud).	65
Figure 34 : Paramètres associés aux zones favorables de Neuf-Jours/Les Chèzes et E-Millevalches (Limousin centre-sud).	66
Figure 35 : Paramètres associés à la zone favorable de Meuzac (Limousin sud).	67
Figure 36 : Paramètres associés à la zone favorable de Noblat (Limousin centre-ouest).	68
Figure 37 : Paramètres associés aux zones favorables de Saint-Saud-Lacoussière, Cheronac et N-Nexon (Limousin sud-ouest).	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Minéraux contenant plus de 10 % de tungstène (d'après webmineral.com). Les principaux minéraux actuellement exploités sont en gras.	13
Tableau 2 : Liste des codes lithologiques.	30
Tableau 3 : Résultats du calcul du WoE pour W en Limousin.	37
Tableau 4 : Composition lithologique principale constituant les groupes de CAH contenant un ou plusieurs gîtes.	40
Tableau 5 : Associations présentes pour les cellules contenant au moins un gîte (14 cellules pour 16 gîtes).	41
Tableau 6 : Synthèse des formations constitutives des associations.	42
Tableau 7 : Comparaison entre les associations lithologiques issues de la CBA par CAH et de la CBA par recherche de signature exacte.	45
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des zones anormales majeures.	50
Tableau 9 : Compositions lithologiques des cellules contenant au moins un point de géochimie à plus de 100 ppm W.	52
Tableau 10 : Description des zones favorables issues du ranking sur géochimie.	54
Tableau 11 : Récapitulatif et priorisation des zones favorables de la province à W du Limousin. GIT = zone déterminée par le ranking sur la présence de gîte. GCH = zone déterminée par la présence de point de géochimie W > 100 ppm. NECH= non échantillonné.	58

Liste des annexes

Annexe 1 - Extrait de la convention DEB-BRGM faisant référence au travaux présentés dans ce rapport.	77
Annexe 2 - Fiches descriptives des sujets miniers correspondant à des gîtes de tungstène du Limousin (Action 2.1 de la convention DEB-BRGM)	87

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans un contexte général marqué par la prise de conscience, il y a quelques années, de la dépendance et de la vulnérabilité de la France dans le domaine des substances minérales.

Cette prise de conscience des pouvoirs publics a amené, depuis 2012, la réalisation de différentes actions dans le cadre du thème 1 « ressources minérales » de la Convention entre le BRGM et la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM), sous le terme générique de «réévaluation du potentiel français en ressources minérales ». Ces actions sont en 2015 au nombre de trois, toutes progressant en synergie les unes avec les autres :

- Action 2.1 : caractérisation des cibles minières ;
- Action 2.2 : catalogue hiérarchisé des anomalies polymétalliques ;
- Action 2.3 : promotion des districts miniers métropolitains.

Le détail de chacune de ces actions est présenté dans l'annexe 1. L'action 2.3, dans laquelle s'inscrit ce travail, a pour objet de s'appuyer sur les deux actions précédentes en les mettant en perspective dans une approche « district » :

- (i) en prenant en compte la géologie et la métallogénie régionale et l'apport de la géophysique lorsqu'elle est disponible,
- (ii) en développant une réflexion sur le potentiel, et
- (iii) en établissant une comparaison avec les autres gisements/districts mondiaux du même type.

Le Limousin étant une entité géologique complexe, avec de nombreuses minéralisations et indices de tungstène connus, l'application d'une étude de favorabilité s'est révélée ardue et a produit un grand nombre de résultats, que nous avons décidés de thésauriser au sein d'un rapport dédié à la province complète.

Le chapitre 2 de ce rapport résume les éléments connus sur la gîtologie et la métallogénie du tungstène dans le Limousin. Les chapitres 3 à 6 synthétisent l'étude de favorabilité réalisée sur cette province par différentes approches.

2. Le tungstène dans le Limousin

2.1. GÉNÉRALITÉS

Le tungstène (W) est un métal de transition de la même famille que le chrome et le molybdène, de numéro atomique 74 et de masse atomique 183,84 u. Le tungstène est un métal très dur (7,5 sur l'échelle de Mohs) et très dense (similaire à l'or, à 19,25). De tous les métaux, il est celui qui a le point de fusion le plus élevé (3 422 °C) des métaux purs, il a le coefficient d'expansion le plus faible et la plus forte résistance à la traction pour des températures supérieures à 1 650 °C. Sa résistance à la corrosion est aussi très importante.

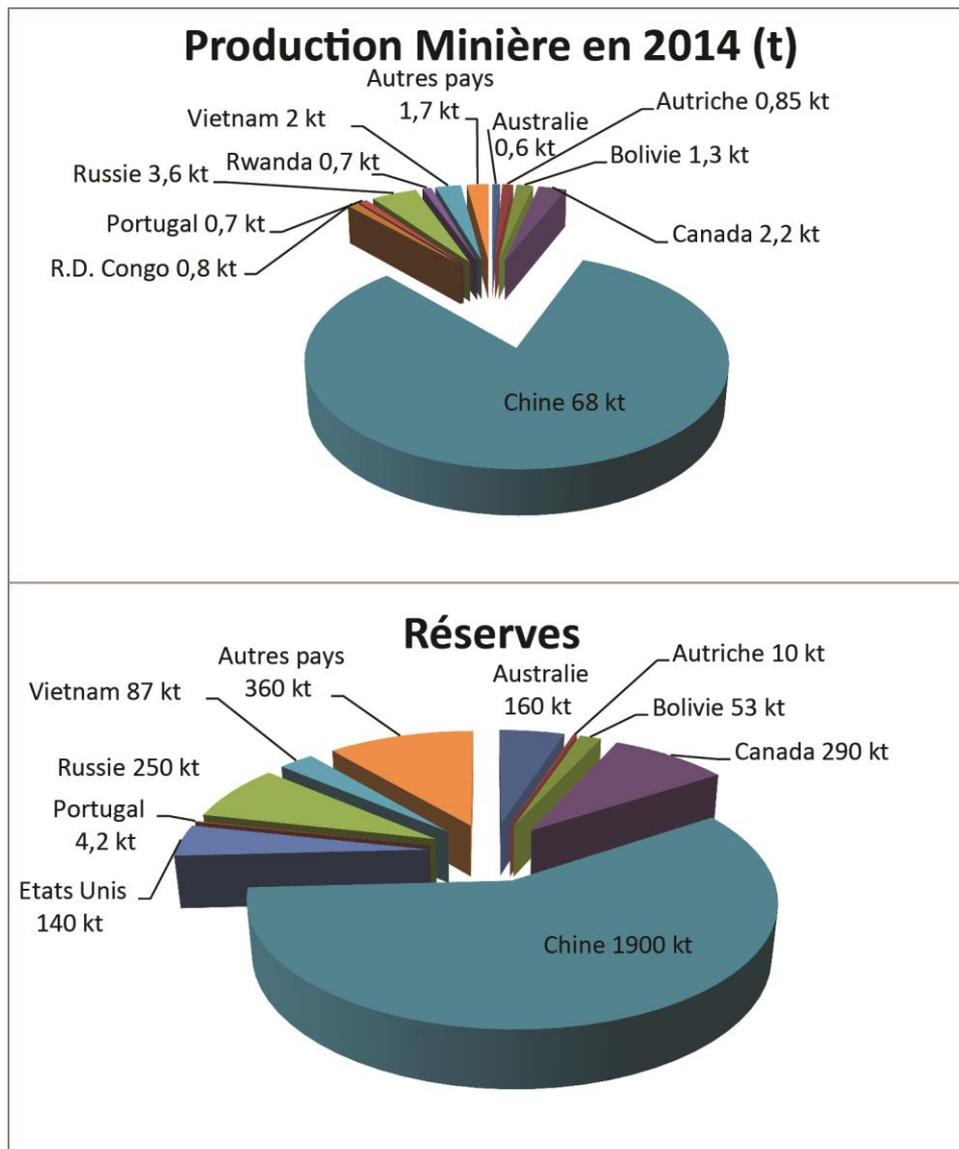


Figure 1 : Production et réserves mondiales de tungstène (d'après USGS).

Le tungstène est ainsi principalement utilisé dans des applications associées à l'utilisation de métaux durs (par exemple l'outillage pour la découpe ou le forage), ainsi que pour accroître la dureté et la résistance des alliages. Une des principales utilisations, sous forme de tungstène métal, est dans la conception des éclairages électriques dans lesquels il constitue

les filaments des lampes à incandescences classiques ou halogènes. Le détail des utilisations est présenté dans Audion & Labbé (2012).

La Chine est actuellement le premier producteur mais aussi consommateur de tungstène (Figure 1 ; USGS, 2017), avec plus de 80 % de la production mondiale. Il s'agit aussi du pays qui présente le plus de réserves connues (plus de la moitié des réserves mondiales).

La teneur moyenne en tungstène de la croûte continentale est estimée à 1 ppm (Rudnick & Gao, 2003). La différenciation crustale (principalement contrôlée par le magmatisme granitique) permet l'enrichissement de la croûte continentale supérieure (1,9 ppm de tungstène), alors que les croûtes moyennes et inférieures contiendraient 0,6 ppm. Dans les océans, l'abondance du tungstène est estimée à 0,1 ppb. En revanche, la concentration moyenne en trioxyde de tungstène (WO_3) des gisements exploitables est comprise entre 0,1 et 1 % (Brown & Pitfield, 2014).

D'un point de vue géochimique, le tungstène est un élément lithophile, c'est-à-dire qu'il a tendance à se lier préférentiellement à l'oxygène. Il montre de plus un comportement très incompatible durant la fusion du manteau (affinité avec le liquide silicaté). Il aura donc tendance à se concentrer dans les termes magmatiques différenciés.

2.2. PORTEURS MINÉRALOGIQUES DU TUNGSTÈNE

Le tungstène n'existe pas dans la nature sous forme de métal pur. De nombreuses espèces minérales contiennent du tungstène. La plupart sont très rares et seules deux espèces sont suffisamment répandues pour être considérées comme du minerai et trois espèces sont plus rarement valorisées (Tableau 1). La scheelite est un tungstate de calcium ($CaWO_4$), qui a la particularité d'être fluorescent aux rayons ultraviolets (propriété utilisée en exploration) et peut contenir plus de 80 % de WO_3 . La wolframite, $(Fe,Mn)WO_4$, constitue un terme général correspondant à un tungstate oscillant entre pôle purement ferrifère, la ferbérîte et un pôle purment manganésifère, l'hubnérite.

Teneur en W (%)	Minéral	Formule chimique
93.45	Qusongite	WC
79.3	Krasnogorite	WO_3
76.68	Elsmoreite	$WO_3 \cdot 0.5(H_2O)$
76.48	Alumotungstite	$(W,Al)(O,OH)_3(?)$
74.14	Tungstenite	WS_2
73.58	Tungstite	$WO_3 \cdot (H_2O)$
68.63	Hydrotungstite	$H_2WO_4 \cdot (H_2O)$
68.63	Meymacite	$WO_3 \cdot 2(H_2O)$
67.78	Pittongite	$Na_{0.22}[(W,Fe^{3+})(O,OH)_3 \cdot 0.44H_2O]$
66.23	Ferritungstite	$(K,Ca,Na)(W^{6+},Fe^{3+})_2(O,OH)_6 \cdot (H_2O)$
63.85	Scheelite	$CaWO_4$

60.72	Hubnérite	MnWO ₄
60.63	Wolframite	(Fe,Mn)WO ₄
60.54	Ferbérite	Fe ²⁺ WO ₄
59.93	Krasnoselskite	CoWO ₄
59.33	Anthoinite	AlWO ₃ (OH) ₃
59.14	Sanmartinite	(Zn,Fe ²⁺)WO ₄
58.8	Phyllotungstite	CaFe ³⁺ ₃ H(WO ₄) ₆ •10(H ₂ O)
57.39	Rankachite	CaFe ²⁺ V ⁵⁺ 4W ⁶⁺ ₈ O ₃₆ •12(H ₂ O)
57.18	Yttrotungstite-(Ce)	(Ce,Nd,Y)W ₂ O ₆ (OH) ₃
56.84	Yttrotungstite-(Y)	YW ₂ O ₆ (OH) ₃
56.07	Cerotungstite-(Ce)	(Ce,REE)W ₂ O ₆ (OH) ₃
53.15	Mpororoite	Al(WO ₃)(OH) ₃ •2(H ₂ O)
51.04	Cuprotungstite	Cu ²⁺ 3(WO ₄) ₂ (OH) ₂
45.75	Paraniite-(Y)	Ca ₂ Y(AsO ₄)(WO ₄) ₂
44.13	Jixianite	Pb(W,Fe ³⁺) ₂ (O,OH) ₇
40.4	Raspite	PbWO ₄
40.4	Stolzite	PbWO ₄
35.13	Tungstibite	Sb ₂ O ₃ •WO ₃
30.65	Welinite-III	Mn ²⁺ ₆ (W ⁶⁺ ,Mg) ₂ Si ₂ (O,OH) ₁₄
28.67	Qitianlingite	Fe ²⁺ ₂ Nb ₂ W ⁶⁺ O ₁₀
26.35	Russellite	Bi ₂ WO ₆
22.83	Welinite-VIII	(Mn ²⁺ ,Mg) ₃ (W ⁶⁺ ,Mn ³⁺) _{1-x} (SiO ₄)(O,OH) ₃ (x=1/3)
22.7	Wolframoixiolite	(Fe,Mn,Nb)(Nb,W,Ta)O ₄
22.21	Koragoite	(Mn ²⁺ ,Fe ³⁺) ₃ (Nb,Ta,Ti) ₂ (Nb,Mn) ₂ (W,Ta) ₂ O ₂₀
20.99	Catamarcaite	Cu ₆ GeWS ₈
19.55	Kiddcreekite	Cu ₆ SnWS ₈
19.22	Pinalite	Pb ₃ (WO ₄)OCl ₂
15.75	Uranotungstite	(Fe ²⁺ ,Ba,Pb)(UO ₂) ₂ WO ₄ (OH) ₄ •12(H ₂ O)

Tableau 1 : Minéraux contenant plus de 10 % de tungstène (d'après webmineral.com).
Les principaux minéraux actuellement exploités sont en gras.

2.3. GÎTOLOGIE ET MÉTALLOGÉNIE DU TUNGSTÈNE

Les gisements de tungstène sont localisés le plus souvent dans des environnements orogéniques associés à la convergence puis à la collision entre plusieurs plaques lithosphériques et sont associés au magmatisme contemporain de ces événements. D'après Romer & Kroner (2014), la formation des minéralisations magmatiques à Sn-W de la chaîne varisque serait liée à la présence de sources sédimentaires enrichies, ces sédiments provenant du démantèlement de l'arc magmatique cadomien (formé entre 640 et 540 Ma).

Plusieurs types gîtologiques et metallogéniques de minéralisations peuvent être rencontrés. Nous ne décrivons ici que les types connus dans le Limousin. Il est important de noter que les gisements associés aux skarns, qui représentent une grande partie des gisements économiques dans le monde, n'y sont pas décrits.

2.3.1. Les minéralisations filoniennes à quartz-wolframite associées aux granites

Ces minéralisations se localisent aux sommets d'intrusions de granites fractionnés¹ hyperalumineux mis en place à des profondeurs de l'ordre de 2 à 10 km (Figure 2).

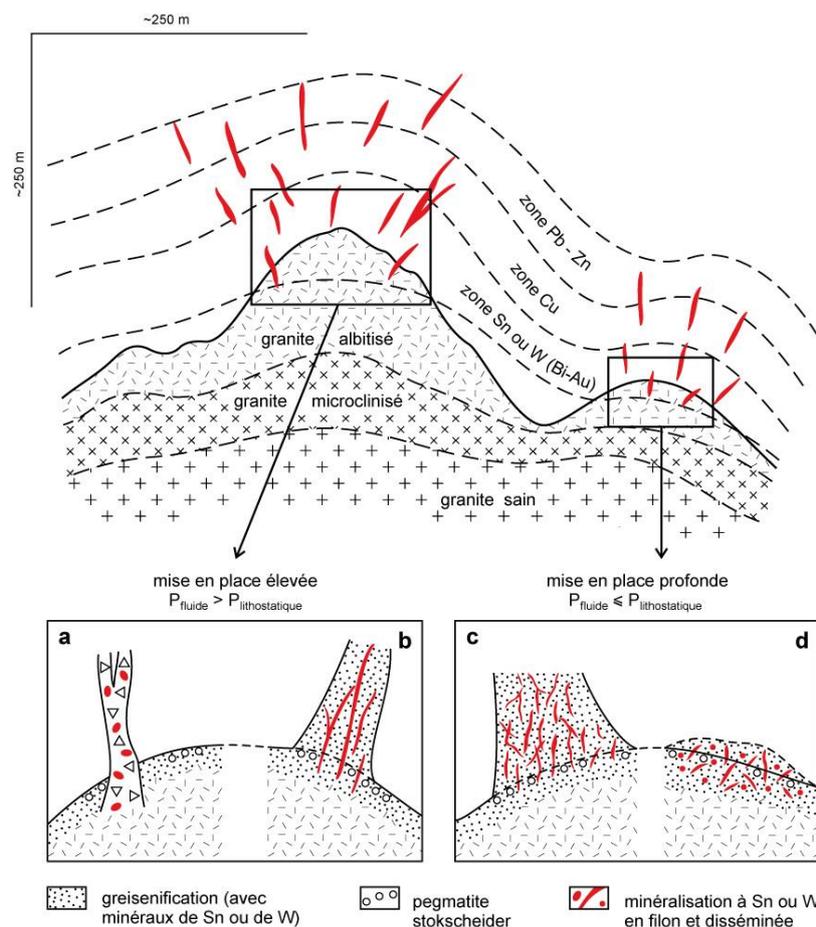


Figure 2 : Coupe idéalisée d'une intrusion granitique avec des minéralisations filoniennes à W-Sn situées au sommet. Les deux exemples de profondeurs différentes illustrent les différentes morphologies et disséminations qui peuvent en résulter. Modifié d'après Sinclair (1996).

¹ Se dit de granite correspondant à des magmas différenciés par la cristallisation fractionnée des minéraux

Ces granites sont issus principalement de la fusion partielle d'anciens sédiments ce qui explique leur concentrations significatives en éléments lithophiles Si, Al, P, Li, Be, Sn, W, Nb et Ta notamment. Les morphologies sont variées (filons, réseaux de filonnets, brèches) et dépendent des conditions de perméabilités et du rapport entre la pression des fluides de fin de cristallisation du magma et la pression lithostatique ainsi que des contraintes tectoniques régionales. Les fluides de fin de cristallisation des magmas, très siliceux, vont cristalliser sous la forme de veines de quartz à wolframite (W) et sont fréquemment accompagnés de proportions variables de cassitérite (Sn), béryl (Be), tourmaline (B) et d'arsénopyrite (As).

La dimension des gisements filoniens dépend de l'étendue des champs ou des districts et de la densité des filons, à l'intérieur de ces champs ou districts. Leur superficie varie de quelques dizaines ou quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés (Chine méridionale, Portugal) et le tonnage de minerai tout-venant de ces grands districts est de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de tonnes ; dans les corps filoniens isolés ou dans les petits champs, ce tonnage varie de quelques centaines de milliers à quelques millions de tonnes. La teneur des filons de quartz peut être relativement élevée, mais la teneur moyenne du minerai tout-venant dépend de la sélectivité de l'exploitation. Compte tenu de la minceur des filons, elle atteint rarement 1 % WO₃ et est en moyenne de l'ordre de 0,4 % WO₃. Les grands gisements ou districts mondiaux de ce type sont la Cornouaille, le nord du Portugal (Panasqueira), Mactung au Yukon, Kholtsan dans l'Altaï sibérien et surtout la Chine du sud-est qui comprend plusieurs champs dépassant 100 000 t de WO₃ contenu.

2.3.2. Les minéralisations de type pipe bréchique

Les gisements de types pipe bréchique sont composés de fragments anguleux et de tailles très variables de roche localisés dans, au-dessous ou en position marginale de l'apex d'une intrusion granitique. La forme générale du gisement tend généralement vers une forme cylindrique pouvant être quasi-parfaite, et leur taille est relativement limitée, en faisant des gisements de faibles envergures (Werner *et al.*, 2014). Cependant, plusieurs pipes peuvent être localisés dans des zones assez restreintes, comme dans le district de Washington (Figure 3, Sonora, Mexique) où 13 pipes sont connus (Simmons & Sawkins, 1983). Les teneurs sont très variables et le tungstène peut aussi être associé au cuivre et/ou au molybdène.

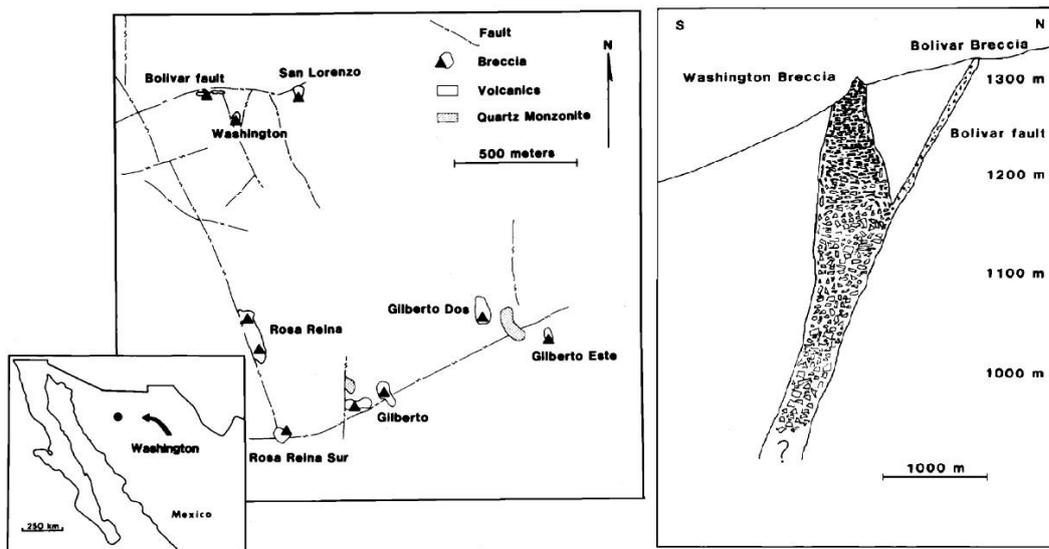


Figure 3 : Carte de localisation des pipes bréchiques à Cu-Mo-W du district de Washington (Sonora, Mexique) et coupe schématique des pipes de Washington et Bolivar (extrait de Simmons & Sawkins, 1983).

Ils seraient formés par une fracturation hydraulique magmatique et/ou hydrothermale ou par des interactions explosives entre eau et magma. Des zones bréchiques sont très souvent décrites dans les porphyres ou les systèmes filoniens mais certains gisements de ce type, comme celui de Puy-les-Vignes (cf. plus loin) dans le Limousin semblent complètement déconnectés des autres types de gisements. Le gisement d'Ilkwang (Cu-W, Corée du Sud) ou celui de Washington (Cu-Mo-W, Mexique) sont des exemples mondiaux, mais Werner *et al.* (2014) n'en distinguent que quatre dans le Monde. Pour la formation du gisement d'Ilkwang, Yang & Bodnar (2004) insistent sur l'importance du rôle des eaux magmatiques.

2.3.3. Les minéralisations disséminées

Ce type de gisement consiste en la présence de minéraux de tungstène (wolframite ou scheelite) au sein d'un granite greisenifié. Un greisen correspond à une altération d'un granite, généralement par des fluides tardi-magmatiques, principalement marquée par le remplacement des feldspaths par une association quartz-muscovite (mais une altération feldspathique marquée notamment par l'albite et/ou le feldspath potassique est aussi fréquente). Le tungstène y est très souvent associé à l'étain (présent dans la cassitérite, SnO_2). Des minéraux secondaires comme la topaze, la tourmaline, la fluorite ou le béryl sont aussi fréquents. Les teneurs sont de l'ordre de 0,1 à 0,5 % WO_3 , pour des tonnages pouvant atteindre les 10^8 tonnes. Les greisens se forment généralement à l'apex d'intrusions mises en place à faible profondeur (entre 0,5 et 5 km), et pour des magmas felsiques déjà relativement fractionnés (Cerny *et al.*, 2005). Les greisens peuvent aussi être associés à des veines ou pipes bréchiques. Les greisens du district de Krásno (République Tchèque) constituent un bon exemple (Figure 4).

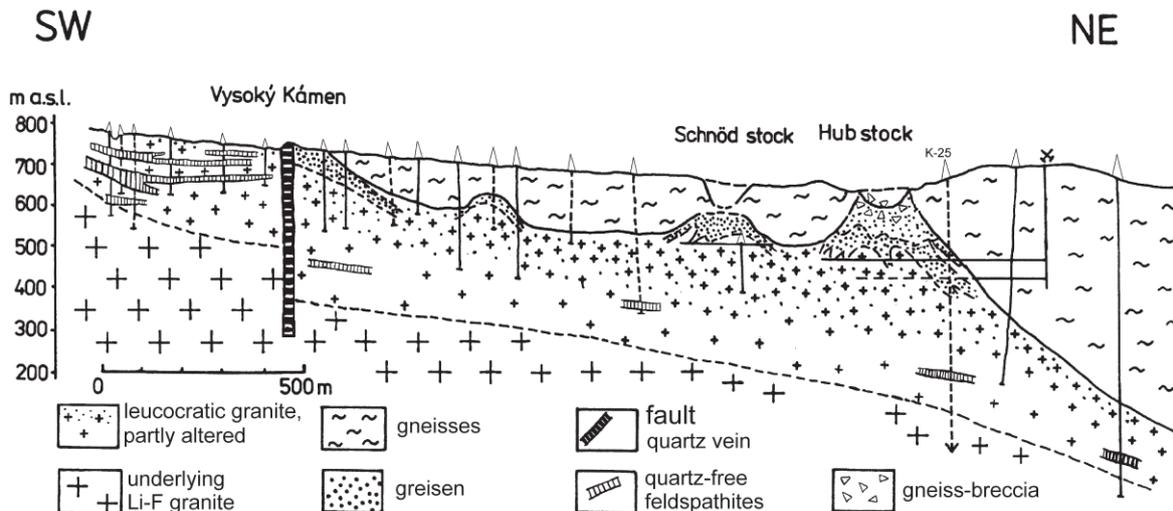


Figure 4 : Coupe synthétique du district à greisens de Krásno, République Tchèque (extrait de Jarchovský, 2006).

2.4. LES DISTRICTS À TUNGSTÈNE DU LIMOUSIN

2.4.1. District des Montmins-Échassières

Localisé dans l'Allier, ce district se situe à environ 25 km de Gannat et 30 km de Montluçon. Il s'étend sur le massif des Colettes, qui correspond principalement à un massif granitique intrusif dans un dôme anticlinal formé de micaschistes appartenant à la série de la Sioule (Figure 5 : Carte et coupe géologique simplifiée du secteur d'Échassières (D'après Aubert, 1969 et Cuney *et al.*, 1992). Ce granite est porphyroïde à deux micas. Le granite à métaux rares (Li-Ta-Nb-Be) de Beauvoir s'est mis en place à la bordure sud de ce granite vers 315 Ma (Cheilletz *et al.*, 1992 ; Melleton *et al.*, 2015). Il s'agit d'un granite très leucocrate, à un seul mica (*lépidolite*), et portant une minéralisation disséminée en Li, Be, Ta, Nb et Sn, ces trois dernières substances étant actuellement valorisées sous forme de concentrés par IMERYS (comme sous-produits du kaolin).

Les deux granites ont subi un intense événement de kaolinisation. La kaolinite a ainsi fait l'objet de nombreuses exploitations, mais seule la carrière d'IMERYS CERAMICS France reste en activité.

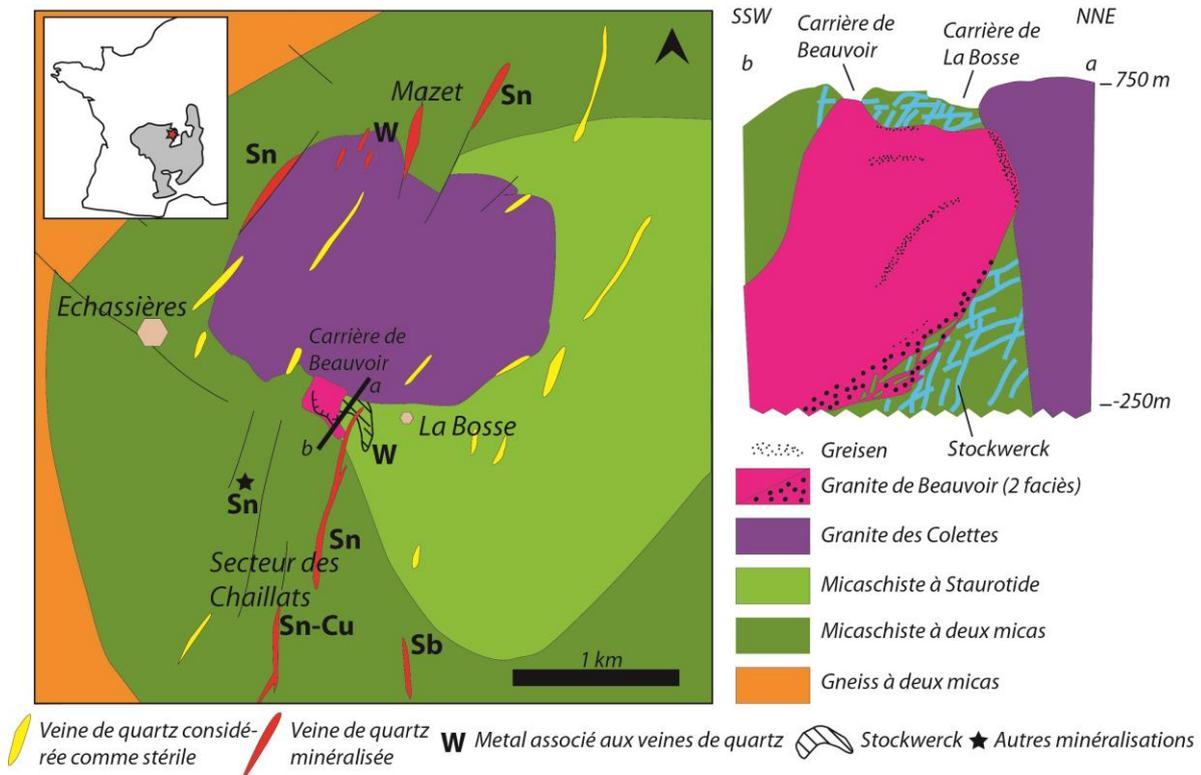


Figure 5 : Carte et coupe géologique simplifiée du secteur d'Échassières (D'après Aubert, 1969 et Cuney *et al.*, 1992)

Les minéralisations en tungstène sont réparties en différents gîtes, l'ensemble du district aurait produit environ 3 900 t de WO_3 . Au nord du granite des Colettes, les filons de quartz à wolframite du Mazet ont été l'objet des premières exploitations souterraines (entre 1915 et 1919, puis 1936-1939). Les teneurs rencontrées ont pu atteindre 1,5 % de WO_3 , mais les tonnages exploitables étaient faibles. Les filons y sont peu nombreux, verticaux et recoupent à la fois le granite des Colettes et les micaschistes. Leur puissance est comprise entre 0,10 et 1,30 m, en moyenne de 0,50 m. Un greisen se développe parfois aux dépens du granite encaissant. La répartition des minéralisations est hétérogène et lenticulaire. Ces filons

auraient été épuisés au début des années 1950 et donné lieu à une production de l'ordre de quelques centaines de tonnes de concentrés de WO_3 . Au sud du granite des Colettes, le stockwerk de la Bosse représente des ressources plus importantes. Localisé dans les micaschistes et recoupés par l'intrusion de Beauvoir (on le retrouve dessous à une profondeur de 700 m), il correspond à un ensemble de filons de quartz très pur à wolframite, concordant par rapport à la schistosité des micaschistes encaissants (nord-sud et subhorizontaux), et d'une puissance généralement inférieure au décimètre. D'autres filons à tendance feldspathique y ont aussi été reconnus. La production, qui s'est étendue de 1945 à 1954 en travaux souterrains puis de 1954 à 1962 en mine à ciel ouvert, y aurait été de 5 940 t de concentrés à 65 % de WO_3 à partir de tout venant à 0,20-0,25 % de WO_3 . Au sud-ouest du granite de Beauvoir, les micaschistes montrent sur une surface importante le développement d'un réseau filonien fin à quartz, topaze et cassitérite, qui a fait l'objet d'une exploitation probablement gallo-romaine. Un filon particulièrement développé, au-dessus du hameau des Chaillats, a fait l'objet de recherches à la fin des années 1950. La wolframite y a ainsi été mise en évidence en accompagnement de la cassitérite. D'après Aubert (1969), l'ensemble de ces minéralisations serait associées au granite de Beauvoir, celles-ci se trouvant dans une zone d'anomalie géochimique à Li-Be forte. Ce modèle est cependant encore largement discuté. Des données géochronologiques très récentes (U-Pb) sur wolframite conduisent à un âge de mise en place du stockwerk à environ 335 Ma (Harlaux *et al.*, 2017).

Ce district est actuellement entièrement couvert par le permis exclusif de recherche pour Li, Sn, Ta, Nb, W, Be attribué à IMERYS CERAMICS France (depuis le 23 mai 2015).

2.4.2. District du Confolendais : prospects de Pinardeau-Pierre Bergère et de Périssac

Ce district est localisé à l'extrémité occidentale du Massif Central (Figure 6), où les formations du socle disparaissent à l'ouest sous la couverture jurassique. Cette zone est principalement constituée par des séries métamorphiques de degrés moyens, recoupées par de nombreuses intrusions plutoniques. Des massifs granitiques à dioritiques forment deux générations, l'une correspondant à la « lignée tonalitique limousine », datée du Dévonien Supérieur (380-360 Ma), l'autre appartenant à un ensemble calco-alcalin s'étant mis en place entre 330 et 310 Ma. À l'est de la zone, le massif leucogranitique des Monts-de-Blond présente des teneurs élevées en F, Li, Be et Sn et appartient donc à la famille des « granites spécialisés », souvent à l'origine de minéralisation stannifère ou wolframifère.

Les principaux gîtes connus dans la zone et qui ont fait l'objet de travaux sont localisés au Nord de Confolens, sur la rive droite de la Vienne pour le prospect de Périssac et en rive gauche pour Pinardeau-Pierre Bergère. Le premier prospect a fait l'objet de travaux de recherche puis d'une brève exploitation par la Société des Mines de Garrot entre 1949 et 1952, puis d'une nouvelle phase de sondages en 1977-1978 et 1985. Les indices de Pinardeau-Pierre Bergère ont été découverts lors de la prospection stratégique de l'Inventaire Minier (anomalie géochimique). Quelques sondages ont été réalisés par le BRGM, toujours dans le cadre de l'Inventaire, avant que le sujet ne soit proposé à la profession en 1983. Un PER a ainsi été accordé à un syndicat Société Gagneraud-BRGM en 1985 mais la chute contemporaine des cours du tungstène ont entraîné l'abandon des travaux et la déchéance du permis en 1988.

Dans le secteur de Pinardeau-Pierre Bergère, des zones greisenisées affectent localement le granite porphyroïde à biotite d'Hiesse, témoignant probablement de l'existence d'une coupole leucogranitique sous-jacente. Ces greisens sont parfois associés à des silicifications en stockwerk ou franchement filoniennes. Une des structures recoupées en sondages et tranchées montrent une puissance maximale de 8 m, avec une teneur de surface de 0,8 % WO_3 . Le tungstène y est principalement porté par la scheelite. À ce jour, les sondages n'ont

pas confirmé les teneurs de surface, seules des minéralisations à des teneurs d'environ 0,2 à 0,3 % WO_3 ont été mises en évidence. Ce prospect reste cependant largement sous-exploré.

Le gîte de Périssac correspond à des structures filoniennes subverticales d'orientation nord-sud, d'extension discontinue sur 1 km et de puissance inframétrique. Les sondages ont ainsi recoupés trois bandes minéralisées parallèles. La paragenèse est principalement constituée par de la scheelite, de la wolframite (porteurs de W) et de la cassitérite. Ce gîte a fourni une modeste production de 60 t de minerai à 5 % WO_3 et 1 % Sn. Le potentiel reconnu, très mal contraint, serait d'environ 100 000 t à 0,52 % WO_3 et 0,28 % Sn sur 200 m de longueur et 50 m d'aval-pendage.

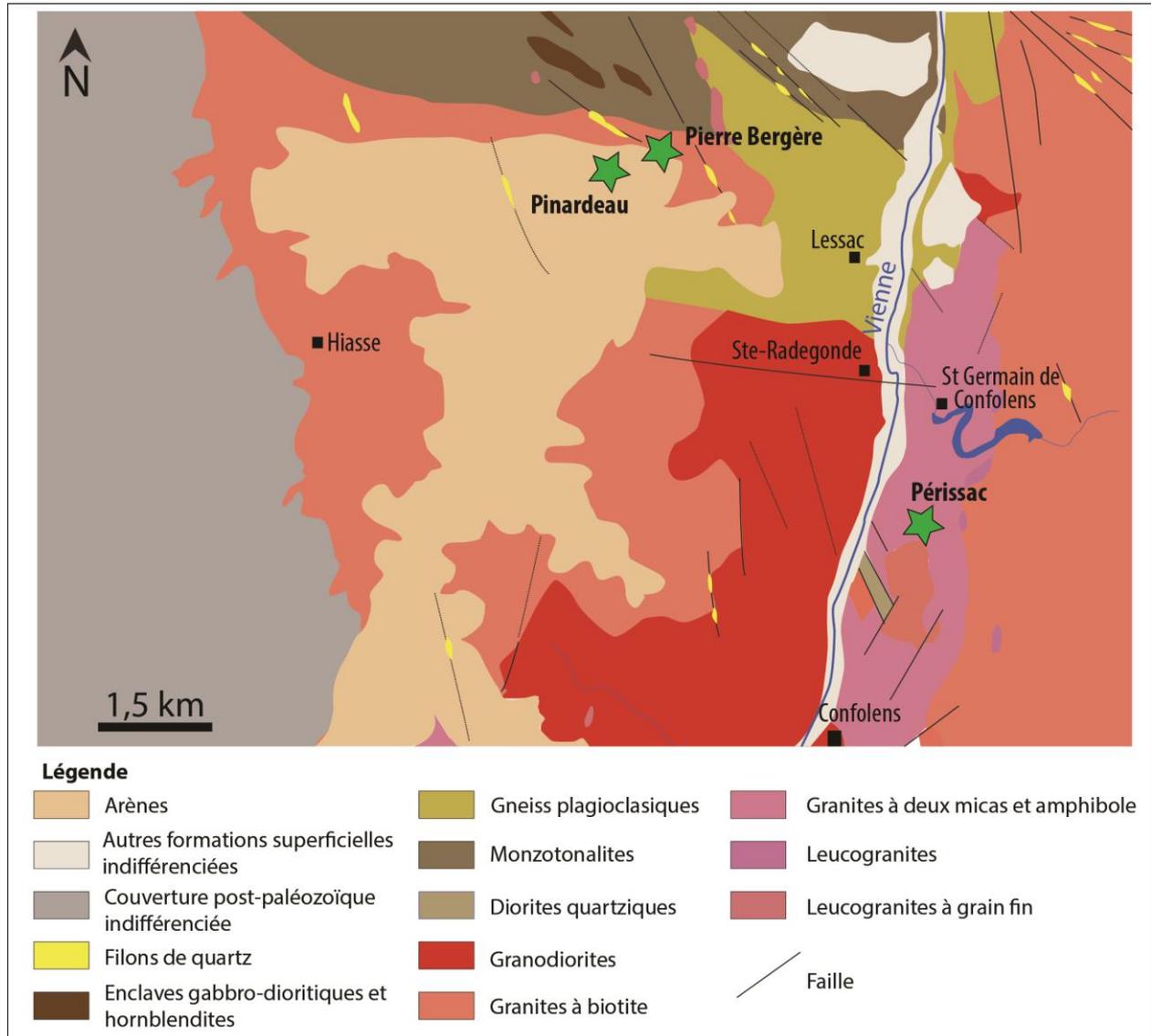


Figure 6 : Carte géologique simplifiée du district à W du Confolendais (réalisée à partir des cartes géologiques au 1/50 000 de Confolens et l'Isle-Jourdain).

2.4.3. District des Monts-de-Blond : Vaulry-Cieux

Les gîtes du district des Monts-de-Blond (Figure 7) sont localisés sur la commune de Nantiat (87), à environ 35 km au nord-ouest de Limoges. Ces minéralisations sont localisées sur la bordure orientale du leucogranite spécialisé des Monts-de-Blond. Ce granite daté à 319 ± 7 Ma (U-Pb sur zircon, Alexandre *et al.*, 2000) recoupe au sud le granite de Vaulry qui serait plutôt d'âge viséo-tournaisien (Béziat & Coulomb, 1990). Le dyke de rhyolite de Richemont, d'orientation globalement nord-sud et qui s'étend sur presque 3 km au nord du massif des Monts-de-Blond, montre des teneurs élevées en Li, Ta, Be, Sn qui le placerait comme un équivalent subvolcanique du granite à métaux rares de Beauvoir (Raimbault & Burnol, 1998). De nombreux filons de microgranite d'orientation similaire sont de plus connus dans la zone.

L'activité minière est très ancienne dans ce district avec des exploitations alluvionnaires pour l'étain remontant vraisemblablement à l'époque gallo-romaine. Une exploitation au cours du Moyen Âge a aussi pu être mise en évidence au lieu-dit Le Repaire, à Vaulry (Mairecolas, 2008). Plus récemment, l'exploitation du tungstène a débuté au début du XIX^{ème} siècle avec l'exploitation du gisement de la Fosse Profonde et de Jouhe entre 1812 et 1826, puis de la Fosse Profonde et de Cieux entre 1856 et 1863, puis de 1911 à 1928, du filon Lagarde par la Société Française des Mines de Vaulry et Cieux puis la Société des Mines de Bellac (1924-1928). Le BRGGM (précurseur du BRGM) a repris en 1956 et 1957 l'étude du district par une prospection alluvionnaire et localement un levé tactique en géochimie sol. La COMIREN a par ailleurs réalisé l'évaluation des flats de Cieux et Vaulry pour Sn, en 1962-1963.

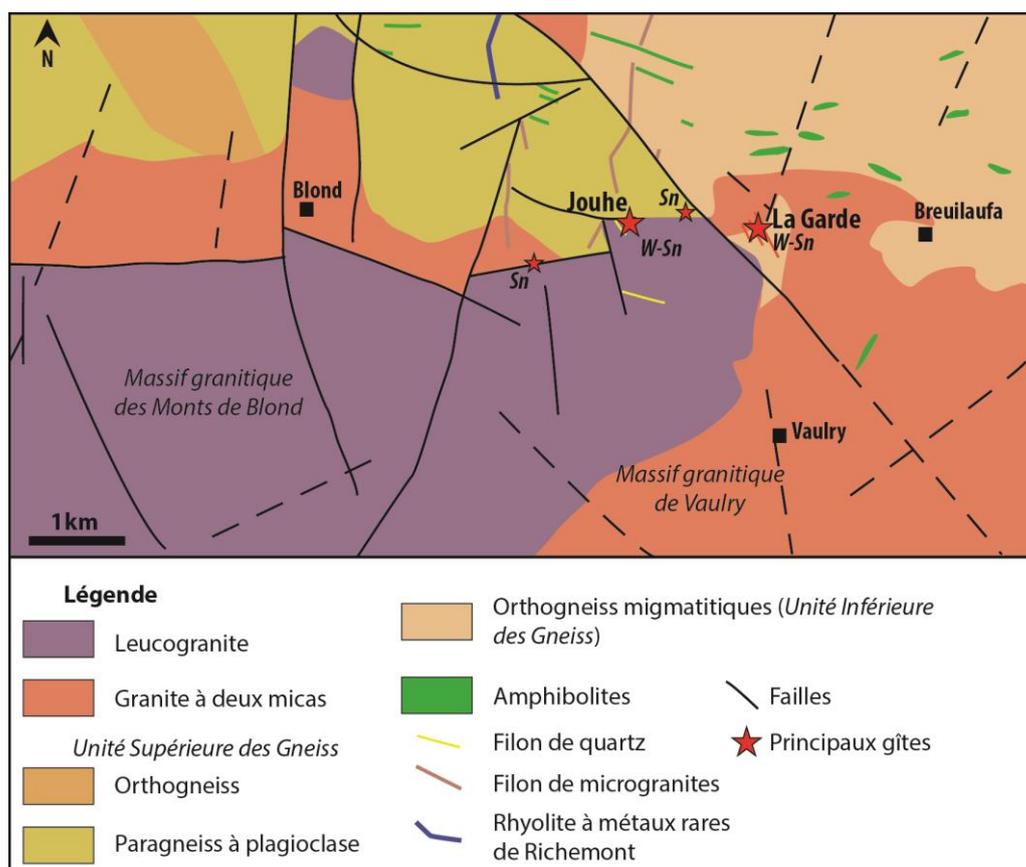


Figure 7 : Carte géologique simplifiée du district de Vaulry-Cieux (d'après les cartes géologiques au 1/50 000 d'Oradour-sur-Glane et Ambazac). Le gîte exploité de Cieux (non représenté) se localise à 4,5 km au sud-ouest de Vaulry.

La production d'une lentille (45 m d'extension et 0,2 m de puissance) exploitée dans le filon de Jouhe aurait été d'environ 250 t d'un minerai à 13 % WO_3 . La mine de Lagarde aurait produit 26 t de WO_3 et 62 t de Sn, principalement à partir d'un filon régulier de 0,6 m de puissance en moyenne et présentant des teneurs moyennes de 2,12 % Sn et 0,9 % WO_3 . Quatre filons parallèles ont été reconnus à Lagarde.

Le potentiel actuellement connu dans le district est négligeable (Béziat & Coulomb, 1990).

Trois principaux types de minéralisations filoniennes, de direction principalement NNW, et principalement subverticaux pour les filons les plus importants, ont pu être distingués et exploités dans la zone (Béziat & Coulomb, 1990 ; Vallance *et al.*, 2001) :

- des filons quartzeux à W dominant, sous forme de wolframite, mise en place au sein (gîte de Jouhe) ou en bordure du massif granitique (indices d'Arnac-Cinturat et de Cieux), et présentant des épontes greisenifiées ;
- des filons quartzeux inframétriques à Sn-W (Sn dominant) et sulfures abondants, mis en place à l'extérieur du massif granitique au sein des gneiss de l'Unité Supérieure des Gneiss (filon de Lagarde) ;
- des filonnets et stockwerck quartzeux à Sn-W et intragranitique (gîte de la Fosse Profonde).

La mise en place des veines et de la minéralisation serait datée au Pennsylvanien moyen à supérieur (315-299 Ma) (Vallance *et al.*, 2001 ; Cuney *et al.*, 2002 ; Harlaux *et al.*, 2017).

2.4.4. Puy-les-Vignes

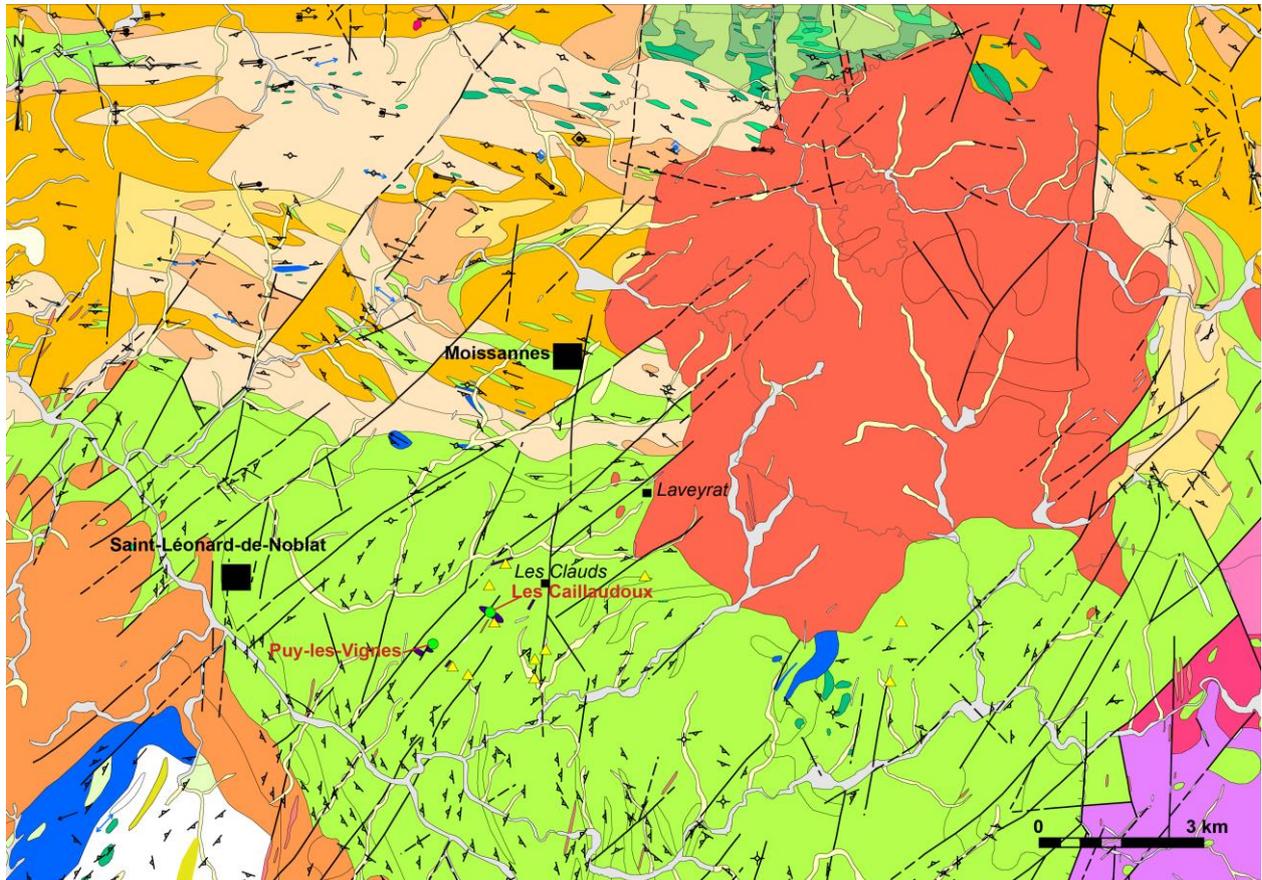


Figure 8 : Carte géologique du district de Puy-les-Vignes (modifiée d'après les cartes géologiques au 1/50 000 harmonisées de la Haute-Vienne et de la Creuse) - légende page suivante (Figure 9).

Le gîte de Puy-les-Vignes est situé sur la commune de Saint-Léonard-de-Noblat (Figure 8, Haute-Vienne). Le gisement, qui a été exploité depuis la seconde moitié du XIX^{ème} siècle est localisé dans l'unité gneissique de Saint-Léonard-de-Noblat. Le grade métamorphique est élevé, marqué par la présence de sillimanite et localement des faciès d'anatexie² et la présence de cordiérite. Cette unité est recoupée au nord-est par le granite d'Auriat et au sud-ouest par celui d'Aureil.

Le gisement, de type pipe bréchique, forme une cheminée à remplissage bréchique affleurant selon une ellipse de 340 x 80 m (Weppe, 1958). La structure est décrochée de 120 m dans sa partie médiane par la présence d'une faille senestre sud-ouest - nord-est, ce qui donne l'existence de deux compartiments dont seule la partie orientale a été exploitée et explorée.

Selon Weppe (1958), la brèche est composée d'éléments gneissiques dont les tailles varient du centimètre à plusieurs mètres et cimentés par du quartz. Plusieurs filons recoupent aussi la structure. La minéralisation est essentiellement à wolframite avec scheelite et localement arsénopyrite, pyrite, bismuth natif et chalcopyrite. La minéralisation a été récemment datée à 318 Ma environ (Harlaux *et al.*, 2017).



Figure 9 : suite de la Figure 8.

² L'anatexie correspond à la fusion des roches crustales au cours du métamorphisme

L'exploitation s'est réalisée en plusieurs étapes. D'abord artisanale, la véritable phase industrielle débute en 1905 et s'achève en 1957, avec une interruption entre 1920 et 1938.

La production cumulée serait de l'ordre de 4000 tonnes de WO_3 , ce qui correspondrait à la deuxième production française, derrière Salau (12 415 t de WO_3). Les réserves envisagées seraient de 192 000 tonnes pour la colonne est et de 194 000 tonnes pour la colonne ouest d'un minerai à 0,3 % WO_3 , soit environ 1150 t de WO_3 . L'exploitation a montré que les teneurs en WO_3 diminuaient en profondeur, avec des teneurs de l'ordre de 2 % en surface jusqu'à 0,3 % au 16^{ième} niveau (côte -300 m).

Le potentiel du district de Puy-les-Vignes est assez important, car un second pipe est connu dans le secteur des Caillaudoux et d'autres anomalies géochimiques ont été mises en évidence dans le secteur durant l'Inventaire.

2.4.5. Neufs-Jours

Le prospect de Neuf-Jours est localisé sur la commune de Chaveroche (Figure 10), à 8 km environ au nord-ouest d'Ussel (Corrèze). Sa découverte remonte à la découverte d'une forte anomalie en wolframite en prospection alluvionnaire au cours de l'Inventaire Minier. Le gîte, qui correspond à une coupole leucogranitique cachée, est encaissé dans des gneiss à biotite-sillimanite bordés au sud par le granite à deux micas de Meymac, au nord-est par un domaine anatectique à cordiérite et au nord-ouest par des micaschistes. Le granite de Meymac montre localement la présence de greisen et tourmaline ainsi que de fortes teneurs en béryllium qui pourraient témoigner de la mise en place de leucogranites différenciés.

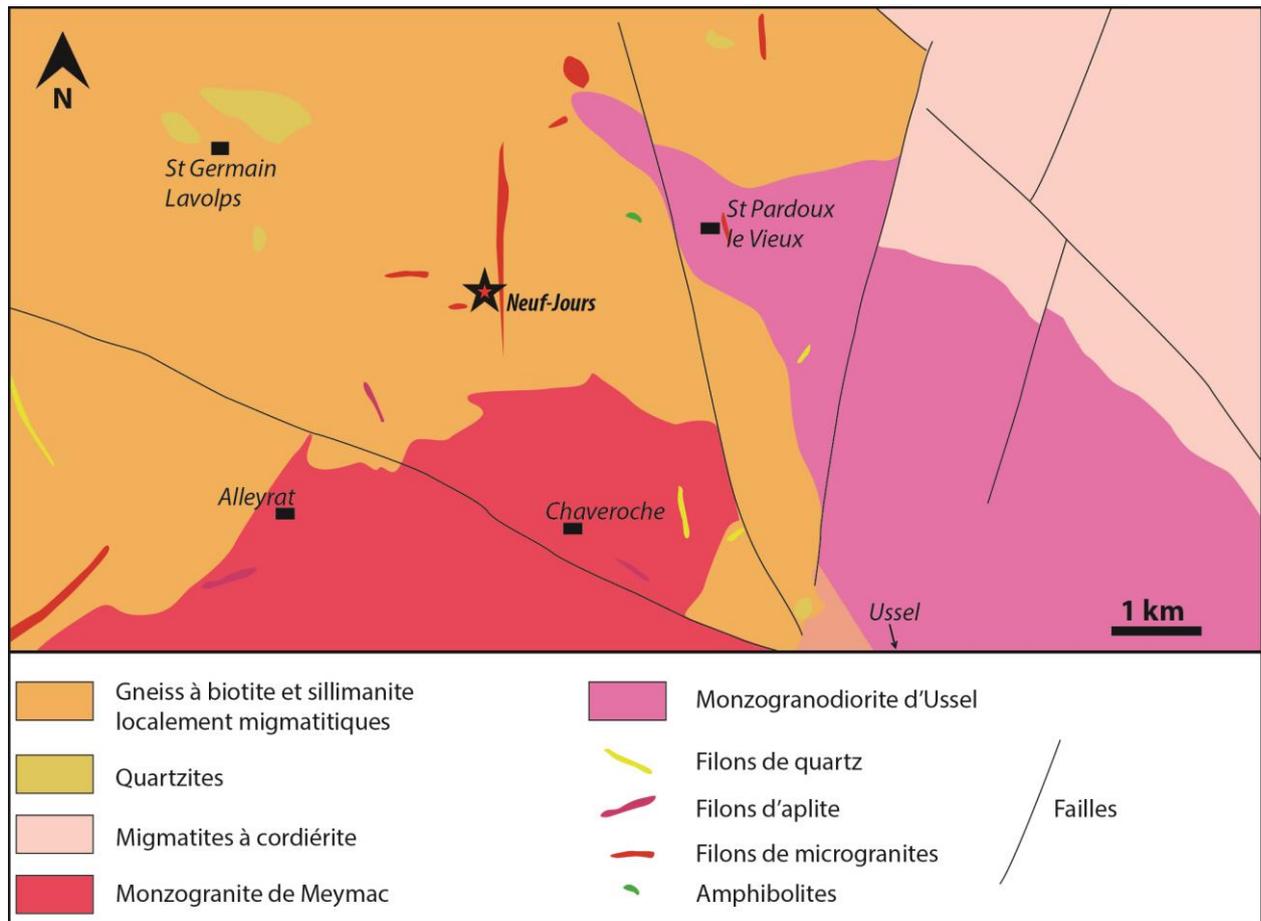


Figure 10 : Carte géologique simplifiée des environs du gîte de Neuf-Jours (d'après la carte géologique au 1/50 000 d'Ussel).

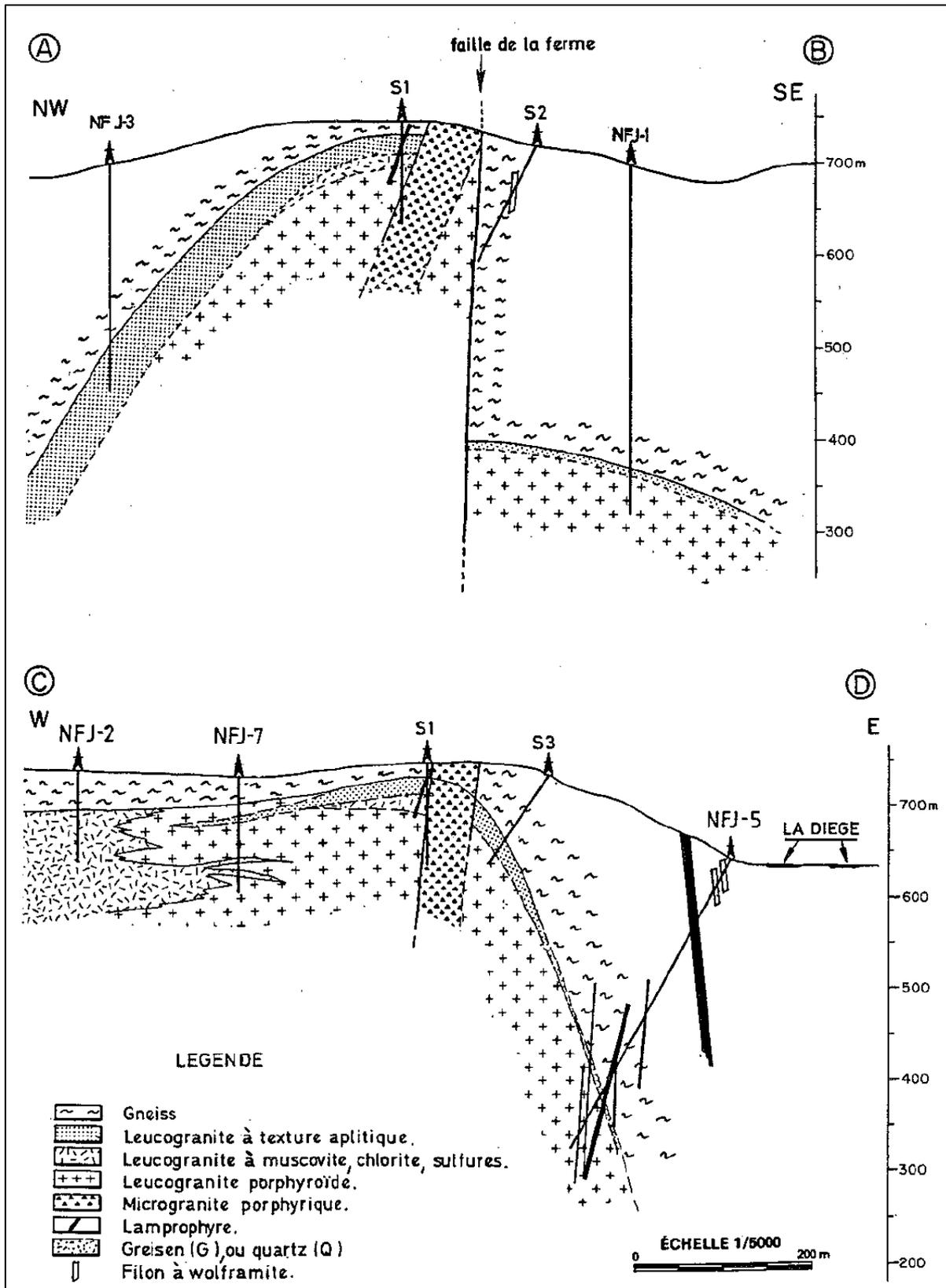


Figure 11 : Coupes interprétatives du gîte de Neuf-Jours (d'après Béziat & Coulomb, 1990).

La minéralisation se présente sous deux formes gîtologiques (Figure 11 ; Burnol *et al.*, 1980) :

- une minéralisation disséminée dans des structures « en pelures d'oignon » dans le toit de l'apex leucogranitique, avec des teneurs de l'ordre de 0,28 % WO_3 recoupées sur 11 mètres en sondage ;
- des filons de quartz distaux de puissance métrique, localisés dans la vallée de la Dièze, montrant des teneurs de 0,88 % WO_3 .

La minéralisation est composée de wolframite, accompagnée de scheelite. Le greisen à tourmaline montre aussi une dissémination en sulfures (pyrrhotite, arsénopyrite, pyrite, etc.).

La coupole est interrompue au sud-est par une structure verticale (Figure 11).

Le potentiel envisagé pour ce prospect, basé sur des données d'exploration limitées, serait de 500 000 t de minerai à une teneur voisine de 0,5 % WO_3 soit 2 500 t de WO_3 .

3. Étude de favorabilité à partir des formations géologiques

3.1. CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

La structure du Massif Central est considérée comme un empilement de nappes crustales syn-métamorphiques recoupées par de nombreux granitoïdes (Ledru *et al.*, 1989 ; Faure *et al.*, 2005 et les références incluses) (Figure 12 et Figure 13).

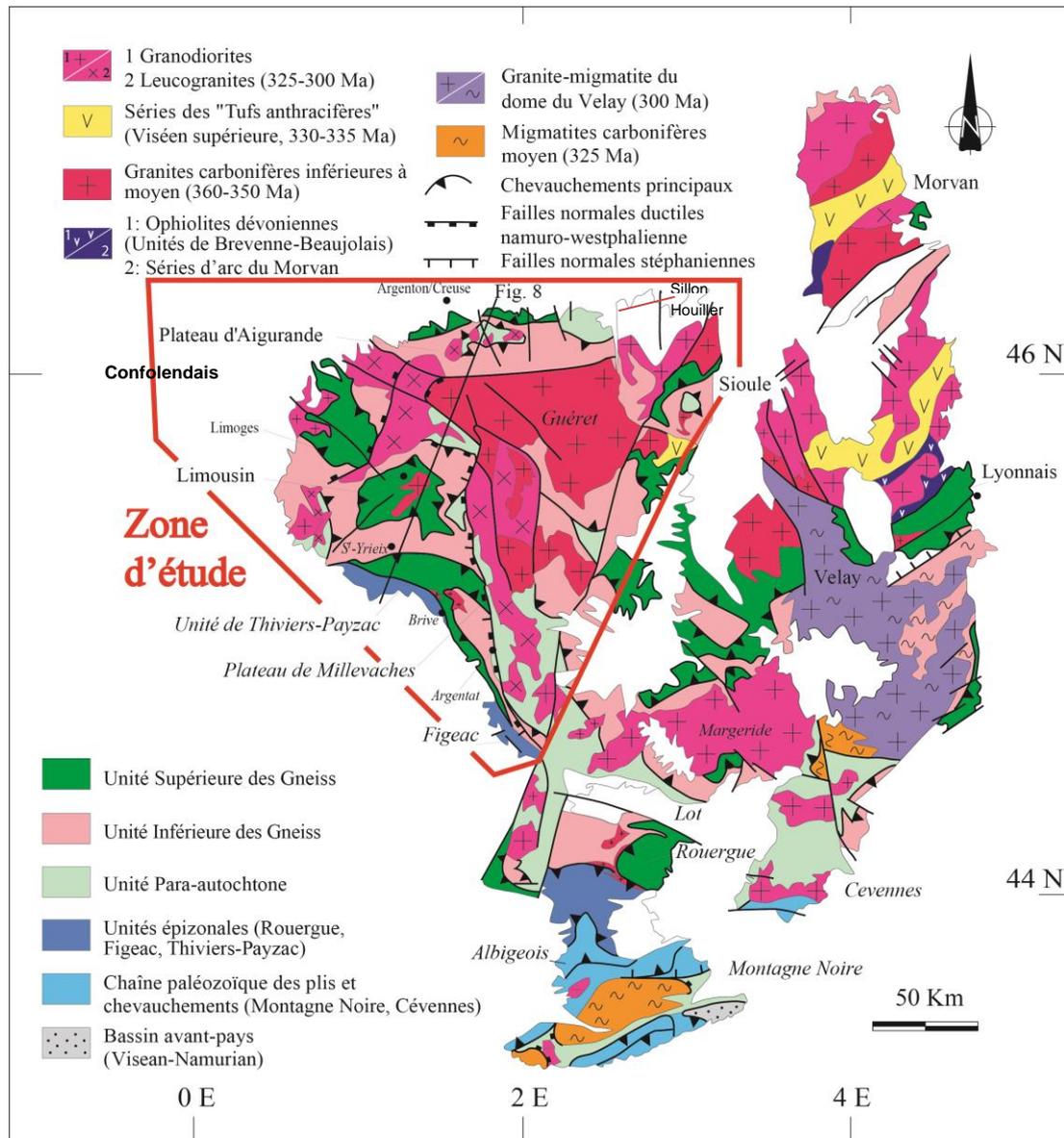


Figure 12 : Carte lithostructurale du Massif Central (D'après Faure et al., 2005).

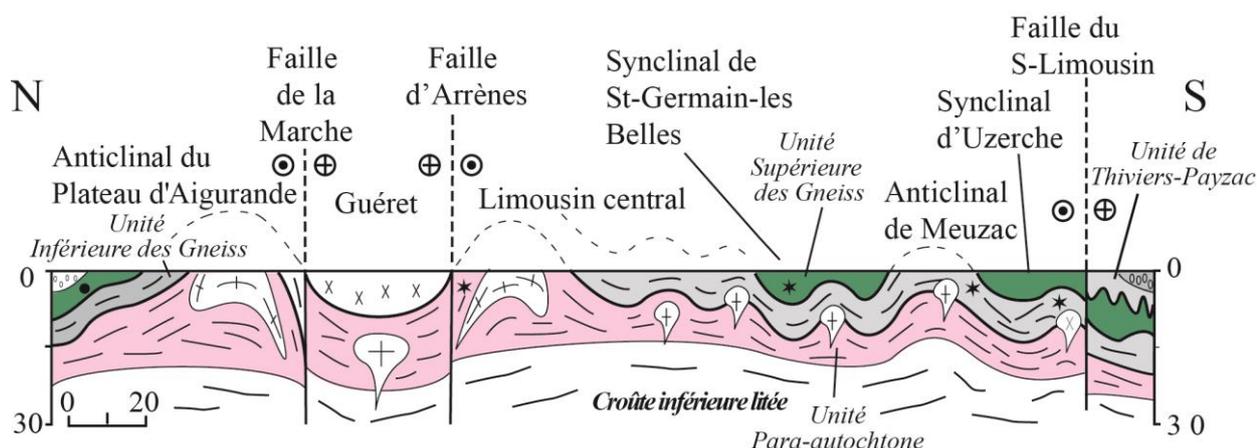


Figure 13 : Coupe synthétique à l'échelle lithosphérique du Limousin (D'après Faure et al., 2005).

Dans le Limousin, sont reconnus du bas vers le haut (Figure 13) :

- l'Unité Para-autochtone (UP) est formée d'une épaisse série de métapélites, de métagrauwackes, de quartzites et, en plus faible proportion, d'argilites et d'amphibolites. Ces formations sont métamorphosées dans les faciès schistes verts et amphibolites et sont recoupées par des granitoïdes alcalins d'âge cambrien inférieur et ordovicien inférieur. Dans le Limousin, l'UP affleure principalement dans le Plateau des Millevaches, autour du granite de Saint Goussaud, au cœur de l'anticlinal du Plateau d'Aigurande, dans la Sioule et sur la bordure sud-ouest du Limousin. Bien que les datations stratigraphiques manquent, un âge néoprotérozoïque à ordovicien est généralement accepté. Dans le Massif Central, une foliation horizontale S1, contemporaine du métamorphisme régional, est issue d'un cisaillement plat synchrone à la tectonique de nappe. Elle est associée à une linéation d'étirement d'orientation nord-est - sud-ouest. Des datations $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur amphibole, biotite et muscovite ont apporté des âges compris entre 340 et 330 Ma ;
- l'Unité Inférieure des Gneiss (UIG) est lithologiquement similaire à l'UP. Les granitoïdes alcalins d'âge Paléozoïque inférieur sont aussi très répandus. Ces formations ont subi un métamorphisme Moyennes Pressions/Moyennes Températures. Cette unité montre de plus localement une anatexie datée aux environs de 380 Ma. Dans le massif de Sauviat (Limousin), des reliques de haute pression ont été décrites. Les conditions de pression et températures ont été estimées à un minimum de 1,5 GPa et 700-750 °C (Santallier, 1981) ;
- l'Unité Supérieure des Gneiss (USG) se caractérise par la présence de reliques de hautes pressions sous forme de boudins d'éclogites et de granulites incluses dans des paragneiss migmatitiques, des métasédiments et des orthogneiss (Santallier, 1981 ; Floc'h, 1983 ; Lardeaux *et al.*, 2001). Les éclogites qui montrent localement la présence de coésite comme dans les Monts du Lyonnais ont pu être portées jusqu'à une profondeur de 60 kilomètres ($\approx 2.0\text{-}3.0$ GPa) (Lardeaux *et al.*, 2001). Le métamorphisme de haute pression a été daté entre 430 et 415 Ma. L'USG contient de plus une association magmatique bimodale connue sous le nom de « complexe leptyno-amphibolique » interprété comme témoin de la phase de rifting ordovicienne. Dans le Massif Central, les rares métagabbros et roches ultramafiques serpentinisées sont considérées comme les restes de l'océan Médio-européen, ces roches étant notamment bien représentées dans le Limousin dans l'ophiolite de La Flotte (Dubuisson *et al.*, 1989 ; Matte, 1991) ;
- l'Unité de Thiviers-Payzac (UTP), qui affleure dans le sud du Limousin constitue l'unité structurale la plus élevée dans le Massif Central. Elle est essentiellement composée de métagrauwackes cambriens, de rhyolites et de quartzites et présente un gradient

métamorphique croissant du toit de l'unité vers sa base, passant progressivement d'un métamorphisme dans le faciès des schistes verts au Nord vers le faciès amphibolite au Sud. Son allochtonie a été établie sur la base d'observations structurales et métamorphiques. Cette unité est, de plus, similaire lithologiquement à l'unité Para-autochtone. L'UTP est séparée au nord de l'USG par le décrochement polyphasé d'Estivaux dont le fonctionnement précoce sénestre contemporain d'un métamorphisme prograde a été daté à 346 ± 4 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur biotite). Un fonctionnement en décrochement dextre dans les conditions rétro-morphiques du faciès des schistes verts est documenté. Selon Roig (1997), ces décrochements sont postérieurs à une tectonique de nappe à vergence nord-ouest permettant la mise en place de l'UTP sur l'USG et l'UIG dans des conditions de métamorphisme de type barrovien ;

- les reliques ophiolitiques de l'unité de Génis (sud du Limousin) d'âge probablement Dévonien.

Le Limousin, comme l'ensemble de la chaîne varisque, se caractérise par un magmatisme volumineux (Rossi & Pin, 2008 ; Melleton, 2008 et références incluses), principalement dérivé de la fusion de la croûte continentale, comme le démontrent les études de géochimie isotopique. Compte tenu du degré d'érosion de la chaîne, les témoins de ce magmatisme correspondent principalement à des systèmes plutoniques.

Dans le Limousin, le magmatisme associé à la tectonique de nappes de l'évènement D1 (Dévonien moyen) est caractérisé par des plutons plurikilométriques typiques d'un environnement d'arc comme des diorites, des tonalites et des gabbros. De type laccolithes, ces plutons portent la même linéation nord-ouest - sud-est que leurs encaissants, ce qui indique que cet épisode est antérieur à l'évènement D2. Ces formations, qui forment la « ligne tonalitique du Limousin » ont été datées entre 380 et 370 Ma (U-Pb sur zircons) en Vendée, dans le Rouergue et dans le Limousin. Ces formations ont été interprétées comme la racine d'un arc magmatique lié à la subduction vers le sud, ou vers le nord.

Dans le nord du Limousin, le batholite de Guéret principalement formé de monzogranodiorites à biotite et cordiérite a été daté aux environs de 360-350 Ma par méthode Rb/Sr et U-Th-Pb sur monazite. Cet âge Viséen inférieur est de plus validé par les « tufs anthracifères », d'âge Viséen supérieur (330 Ma) qui recouvrent le massif de Guéret. Les granitoïdes de Guéret présentent en outre une fabrique magmatique à sub-solidus portant une linéation nord-ouest - sud-est. Cette déformation a été datée à 346 ± 4 Ma. Cet évènement magmatique est donc synchrone de l'évènement tectono-métamorphique D2. Une origine crustale à mixte (croûte et manteau) est généralement acceptée pour ces granitoïdes.

Dans le Massif Central, le Carbonifère moyen (335-315 Ma) se caractérise par plusieurs types de magmatisme :

- les séries volcano-sédimentaires ou « tufs anthracifères » sont constitués de produits aériens comme des ignimbrites, des coulées, des dépôts pyroclastiques ainsi que des dykes de composition rhyolitique à dacitique, des microgranites et des granites rouges. Les données géochimiques suggèrent que ces matériaux dérivent de la fusion de la croûte continentale. Dans la zone d'étude, ils sont principalement connus dans la Haute-Sioule ;
- de nombreuses migmatites d'âge viséen moyen ont été mises en évidence dans le Massif Central. Dans le nord des Cévennes, l'Unité Para-autochtone surmonte des gneiss migmatitiques datés entre 333 et 324 Ma ;
- les granitoïdes per-alumineux de type Limousin (ou leucogranites à deux micas) se mettent en place le long de grands accidents crustaux (Millevaches, Saint-Sylvestre, etc.) entre 340 et 310 Ma. Les données isotopiques et les éléments en trace montrent que ces

granitoïdes proviennent de la fusion partielle de roches métasédimentaires de la croûte inférieure, l'anatexie pouvant avoir été déclenchée par le sous-placage de magma mantellique ;

- des granitoïdes calco-alcalins potassiques, essentiellement des monzogranites, se mettent en place principalement à l'est du Sillon Houiller (Figure 12), ou dans le Confolentais.

3.2. CARTE GÉOLOGIQUE SYNTHÉTISÉE

Pour atteindre un niveau de détail suffisant pour réaliser cette étude, il a été nécessaire de produire une carte géologique spécifique par synthèse des cartes géologiques harmonisées départementales et des cartes géologiques au 1/50 000. L'objectif était de conserver un niveau de détail incluant de petits éléments comme les filons tout en homogénéisant les descriptions des différentes plages de formations majeures du socle anté-mésozoïque.

Pour réaliser cette opération, un codage de type litho-stratigraphique adapté à la thématique de recherche de gîtes à tungstène a été généré. Ensuite, les contours des polygones constitutifs des cartes ont été regroupés par leur nouveau codage synthétique (fonction "Dissolve")

3.2.1. Codage lithologique

Clé de lecture des codes lithologiques :

Granitoïdes	Filons	Roches métamorphiques
GDIO: Granodiorite GRAN : Granite LTNL : Lignée tonalitique du Limousin MZGR: Monzogranites SYEN: Syénite UBAS: Ultra basites	FAPLI : Filon d'aprites FBAR: Filon de Barytine FDOLE : Filon de dolérite FMCGR : Filon de microgranite FPEGM : Filon de pegmatie FQTZ : Filon de quartz FURA: Filon d'uranium	AMPH : Amphibolites GNEI: Gneiss LEPT: Leptynites LPAM : Complexe leptyno-amphibolique MARB : Marbres MCSH : Micaschistes MIGM: Migmatites ORTG: Orthogneiss SCSH: Schistes
Formations diverses du socle	Formations sédimentaires et quaternaires	
CALC : Calcaires GRES : Grès GRWK : Greywackes IMPACT : impactites de Rochechouart VACI: Volcanites acides VBAS: Volcanites basiques VOLC: Volcanites VSED: Volcano-sédimentaire	ALLU : Alluvions COLL : Colluvions CRET : Formations créacées EOC : Formations éocènes LIAS : Formations liasiques MIOC: Formations miocènes OLIGO: Formations oligocènes TRIAS: Formations triasiques VOLCIII : Volcanisme tertiaire X : Formations anthropiques HYDRO : Lacs, rivières	

Tableau 2 : Liste des codes lithologiques.

3.2.2. Codage stratigraphique

Pour ce codage numérique, il a été choisi de respecter au mieux les indications des cartes géologiques, notamment pour l'attribution des formations métamorphiques à leurs unités respectives (Figure 14). Au sens strict, les grandes unités métamorphiques du Massif Central ne sont pas stratigraphiques mais nous avons choisi d'en garder la signature dans le codage.

Voici la clé de lecture des codes stratigraphique numériques :

- 7** : Permien
- 6** : Carbonifère
- 5** : Dévonien
- 4** : USG (Unité Supérieure des Gneiss)
- 3** : UIG (Unité Inférieure des Gneiss)
- 2** : UTP (Unité de Thiviers-Payzac)
- 1** : UPM (Unité Parautochtone des Micaschistes)

Pour les granitoïdes carbonifères, quand cela était possible, l'âge de mise en place a été précisé avec le codage suivant :

- NS - Namurien-Stephanien: 325-300Ma – **65**
- NW - Namurien Westphalien: 325-306Ma - **64**
- VN - Viséen Namurien ; 345-310Ma- **63**
- VS - Viséen: 345-326Ma - **62**
- DSUP-TV – Dévonien supérieur-Tournaisien: 385-325Ma – **61**

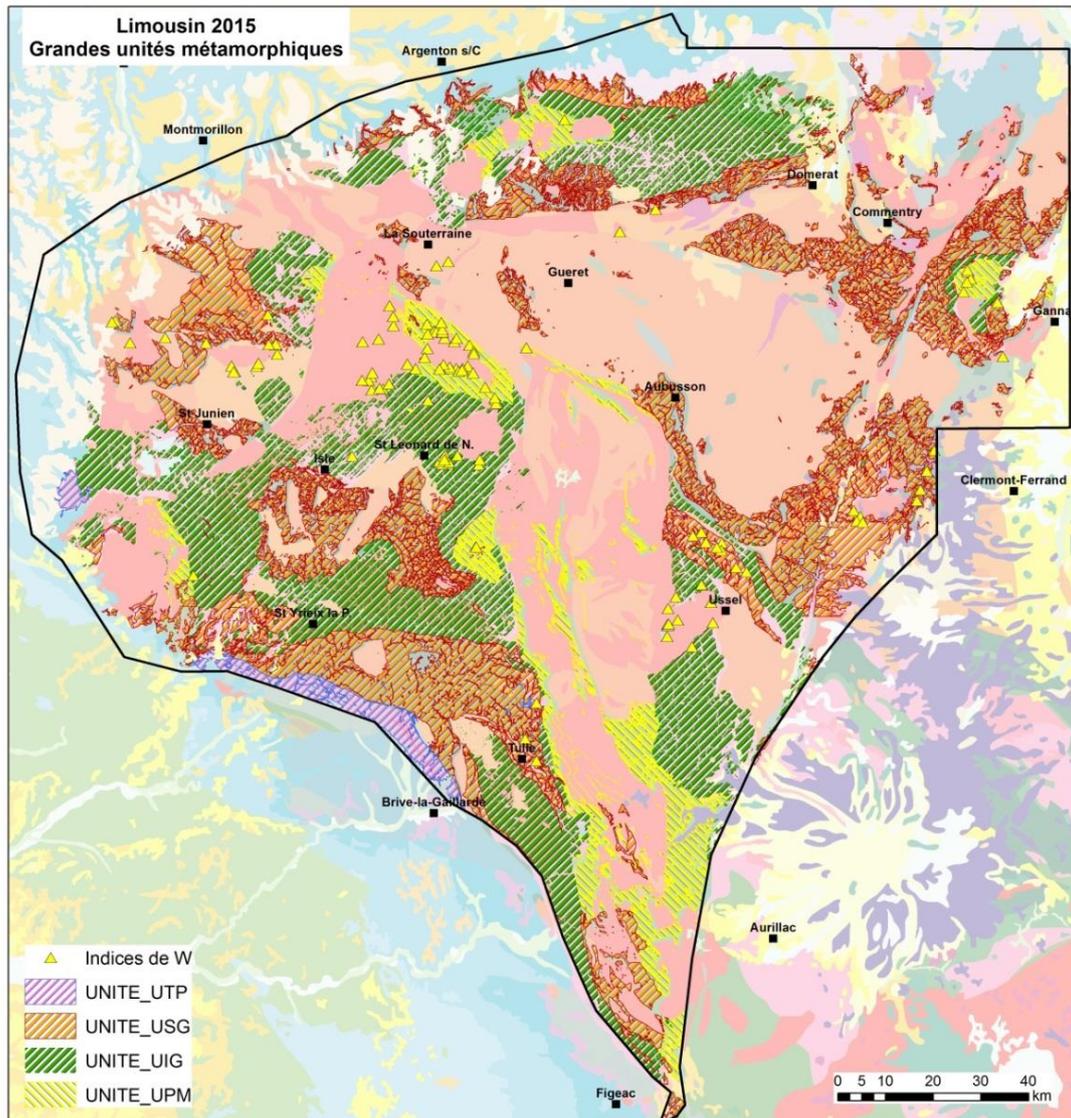


Figure 14 : Cartographie des grandes unités métamorphiques du Limousin.

Pour mémoire, voici les intervalles d'âges des étages du Carbonifère :

- Stéphalien : 306-299
- Westphalien : 310-306
- Namurien : 325-315
- Viséen : 345-326
- Tournaisien : 359-345

Ainsi, MZGR61 se traduit en « monzogranite d'âge Dévonien supérieur-Tournaisien ».

Le codage des formations « hors socle » (Mésozoïque, Cénozoïque et Quaternaire) a été très simplifié car ces formations n'ont pas de rôle dans cette étude.

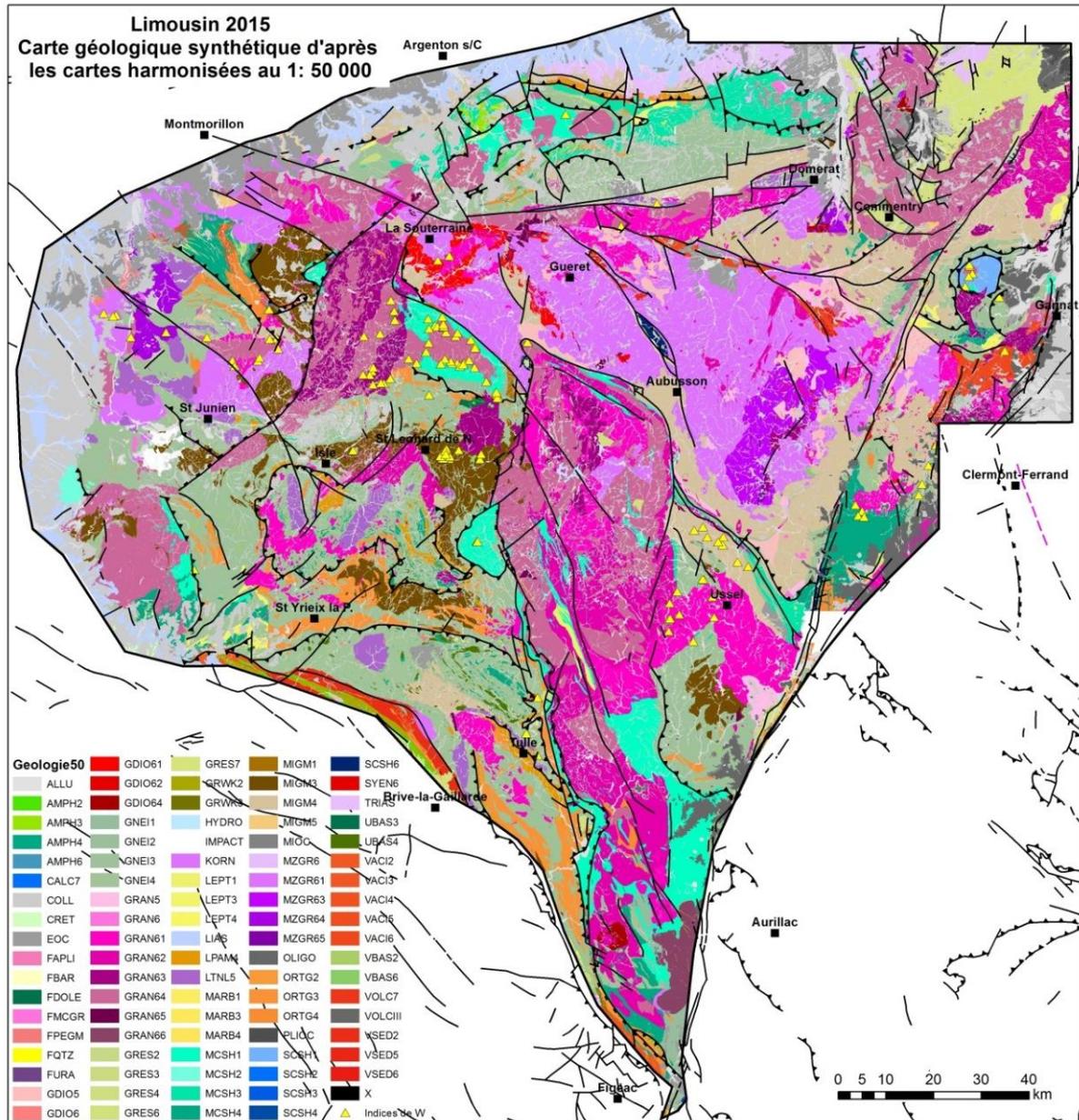


Figure 15 : Carte géologique du Limousin réalisée à partir d'une synthèse des cartes au 1/50 000.

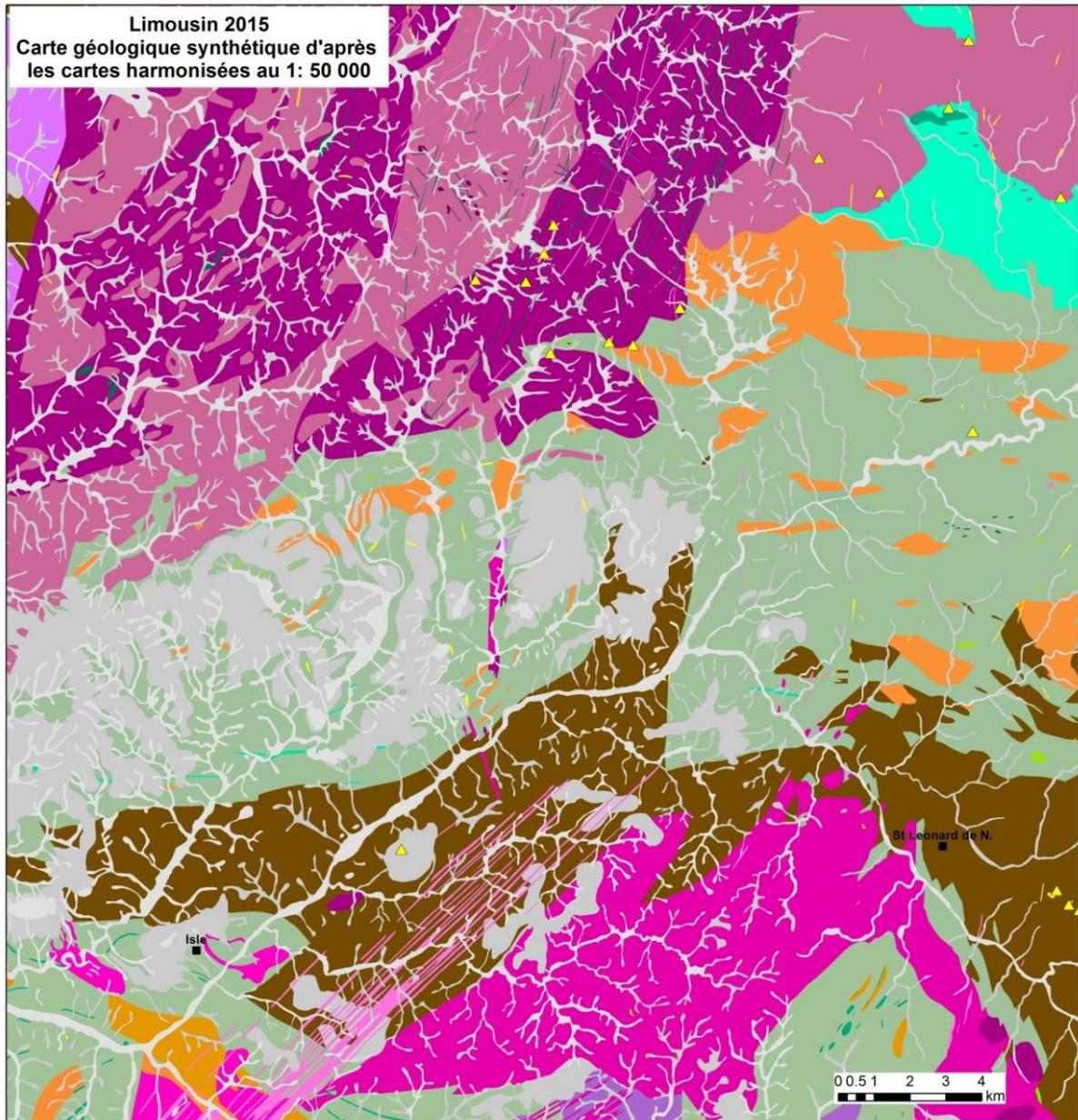


Figure 16 : Zoom sur la carte géologique synthétisée.

Au final, on obtient 93 codes litho-stratigraphiques pour décrire l'ensemble des formations géologiques du Limousin, dont 82 pour les seules formations du socle.

À partir des données de cette carte géologique synthétisée (Figure 15 et Figure 16) et des indices et gisements, les techniques de recherche de favorabilité vont permettre de sélectionner les zones à plus fort potentiel de présence d'indices de tungstène.

3.3. WEIGHT OF EVIDENCE (WOE)

Le Weight of Evidence (WoE) est une approche statistique (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'indice contenu dans une formation sur le pourcentage de surface couvert par cette même formation, ce qu'on peut symboliser ainsi:

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

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

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

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

Dans le cas présent, les données utilisées sont les suivantes :

- des données géologiques synthétisées à partir des cartes au 1/50 000 ;
- les 111 indices de W connus (mines et indices) superposés à des formations du socle, auxquels une pondération de 1 a été appliquée (tous les indices sont considérés comme équivalents malgré un potentiel très inégal).

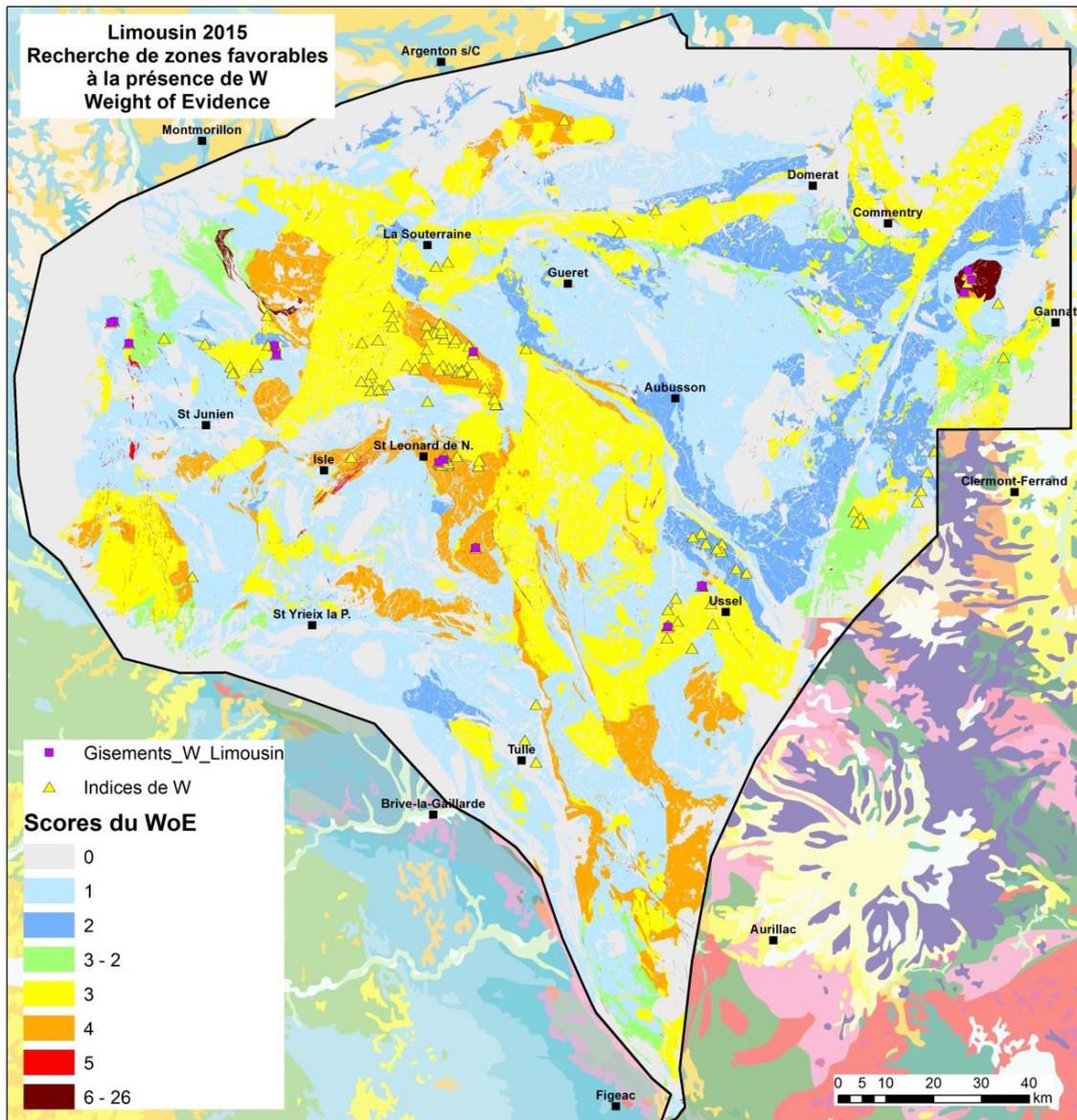


Figure 17 : Carte de résultat du calcul du WoE pour W dans le district du Limousin.

Le Tableau 3 et la Figure 17 montrent que les formations les plus favorables (celles qui ont le WoE le plus élevé) sont les filons de quartz et les volcanites acides de l'Unité Supérieure des Gneiss (VACI4) uniquement présentes sur une petite partie nord-ouest de la zone d'étude. Ce résultat, même s'il paraît cohérent pour les filons de quartz (qui sont souvent les porteurs de la minéralisation) est surtout dû à la faible surface relative couverte par ces formations. De plus, les filons de quartz sont des éléments correspondant à des événements très variés et ne sont donc pas discriminants; au vu de ce qu'on connaît des minéralisations à W du Limousin, ils peuvent être une condition nécessaire mais pas suffisante. Le même phénomène peut être attribué aux formations SCHS1 et FMCGR qui elles aussi couvrent des faibles surfaces à l'échelle de la province. Si on s'intéresse aux formations qui présentent le plus d'indices associés, on trouve, par ordre décroissant, GRAN64, MCSH1, GRAN61, MIGM3 et MIGM4 et, dans une moindre mesure, GRAN63, GNEI3 et GNEI4.

Code géologique	Nbre Indices	% Indices	% Formations géologiques	WoE	Code géologique	Nbre Indices	% Indices	% Formations géologiques	WoE
FQTZ	3	2.63	0.10	26.34	GDIO61	1	0.88	0.43	2.06
VACI4	1	0.88	0.07	12.51	MZGR64	1	0.88	0.44	1.99
SCSH1	2	1.75	0.19	9.38	VACI6	1	0.88	0.52	1.69
FMCGR	1	0.88	0.20	4.34	MCSH4	3	2.63	1.62	1.63
MCSH1	15	13.16	3.29	4.00	MIGM4	9	7.89	6.23	1.27
MIGM3	10	8.77	2.77	3.17	GDIO5	1	0.88	0.83	1.06
GRAN64	30	26.32	9.80	2.69	GNEI4	7	6.14	6.56	0.94
GNEI1	1	0.88	0.38	2.33	GNEI3	5	4.39	7.90	0.55
GRAN61	14	12.28	5.51	2.23	MZGR61	3	2.63	8.67	0.30
GRAN63	5	4.39	1.98	2.22	GRAN62	1	0.88	4.78	0.18

Tableau 3 : Résultats du calcul du WoE pour W en Limousin.

Il ressort du WoE que les plus fortes chances de trouver un indice de W se rencontrent dans un environnement de type GRAN64, MCSH1, GRAN61, MIGM3 ou MIGM4. La présence de filon de quartz peut être un paramètre positif supplémentaire. Le haut score de la formation SCSH1 est dû à sa faible surface relative et à son association locale avec les indices de l'environnement du granite d'Échassières.

3.4. CBA (CELL BASED ASSOCIATION)

3.4.1. Principes de la CBA

Comme le WoE est très sensible à la précision du positionnement des indices et à la surface relative des formations, on a développé une méthode dite CBA (Cell Based Association) qui permet de s'affranchir en partie de ce problème en considérant non pas une relation point/formation mais une relation point/cellule pluri-lithologique (carrée de 3000m x 3000m dans cette étude). Dans ce cas, ce qu'on va donc rechercher, c'est un environnement géologique favorable plutôt qu'une formation unique (Tourlière *et al.*, 2015).

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

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

Pour obtenir une réponse plus ciblée, on a choisi de ne sélectionner que les 16 gîtes estimés les plus représentatifs de la zone pour appliquer la CBA afin de limiter la trop grande dispersion des résultats.

Trois méthodes différentes ont été utilisées pour extraire les cellules favorables : par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), une utilisant les associations exactes présentes dans les cellules contenant un gîte (cellule étalon) et une autre par "ranking", c'est-à-dire à partir des associations présentes dans les cellules étalons contenant un ou plusieurs gîtes.

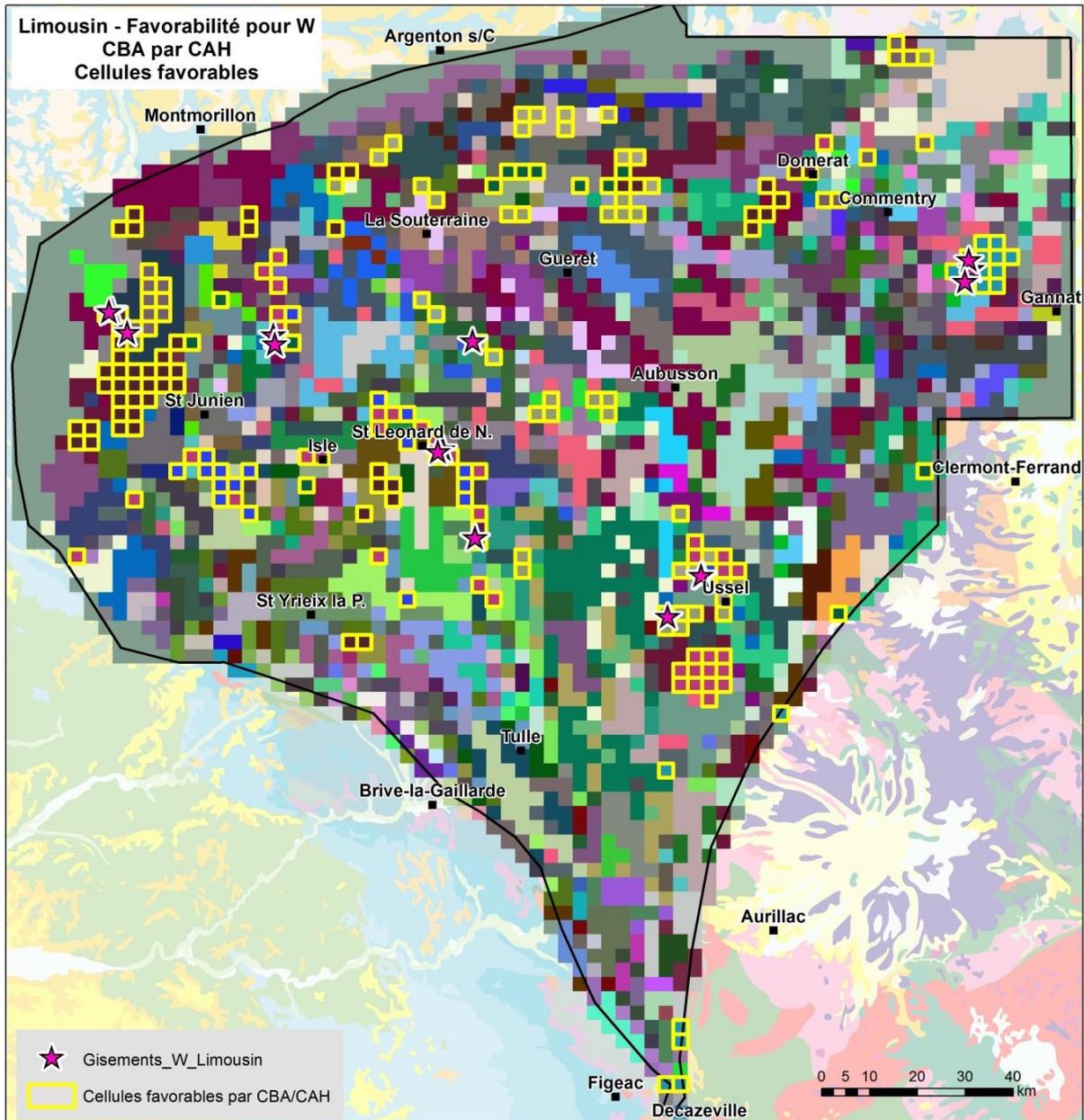


Figure 18 : sélection de cellules présentant des signatures similaires à celles contenant au moins un gîte par CBA/CAH.

3.4.2. CBA par CAH

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

La recherche de zones favorable se fait alors par une simple démarche analogique en partant de l'hypothèse que les cellules contenant des minéralisations connues sont représentatives. Il suffit alors de rechercher sur toute la zone d'étude les cellules appartenant au même groupe que celles contenant une minéralisation (Figure 18 et Figure 19).

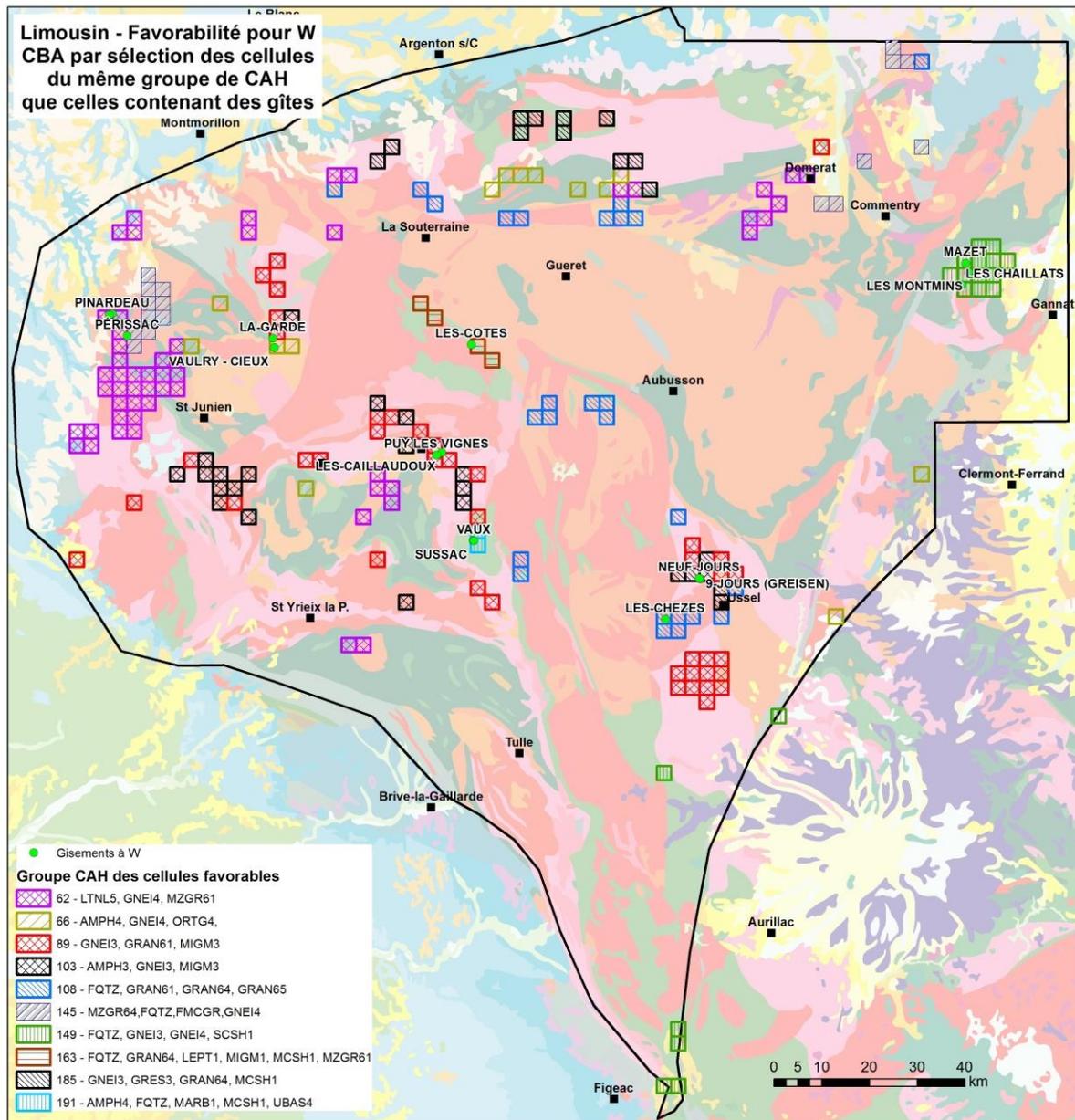


Figure 19 : Cellules du même groupe de CAH que celles contenant un ou plusieurs gîtes.

Comme la CAH que nous avons utilisée comprend 250 groupes, ce qui se traduit par des classes d'effectifs réduits, cette sélection ressort peu de cellules (211 sur 3 309). Pour chaque classe, on peut établir la liste des formations majoritairement présentes et donc, préciser l'environnement géologique favorable à la présence de gîtes à W (Tableau 4).

CAH250	Nombre de cellules	Association	Gîte de référence
62	54	LTNL5, GNEI4, MZGR61	Pinardeau
66	14	ORTG4, GNEI4, AMPH4	Vaulry - Cieux
89	41	MIGM3, GNEI3, GRAN61	La Garde, Puy les Vignes, Les Caillaudoux
103	18	MIGM3, GNEI3, AMPH3	9 jours-greisen
108	26	GRAN65, GRAN64, GRAN61, FQTZ	Les Chèzes
145	17	MZGR64, FQTZ, FMCGR, GNEI4	Périssac
149	19	SCSH1, GNEI3, GNEI4, FQTZ	Échassières
163	4	MCSSH1, MZGR61, LEPT1, MIGM1, FQTZ, GRAN64	Les Côtes
185	16	GRES3, GNEI3, GRAN64, MCSH1	9 jours
191	2	MCSH1, MARB1, FQTZ, AMPH4, UBAS4	Sussac-Vaux

Tableau 4 : Composition lithologique principale constituant les groupes de CAH contenant un ou plusieurs gîtes.

La composition lithologique des groupes de CAH ne fait ressortir que les formations majoritairement présentes dans chaque groupe.

Sur les 10 classes de CAH associées à des gîtes à W, 6 contiennent au moins une intrusion granitique (MZGR61, GRAN61, MZGR64, GRAN64, GRAN65), GNEI4 (Unité Supérieure de Gneiss) ou GNEI3 (Unité Inférieure) sont présents 7 fois, souvent associés à des migmatites. L'environnement des gîtes de Pinardeau est caractérisé par la présence d'intrusions de la lignée tonalitique du Limousin (LTNL5 + GNEI4 + MZGR61) dont la grande extension au nord génère 54 cellules favorables; cette répartition au nord et à l'ouest de la zone se retrouve aussi dans l'environnement de Périssac (17 cellules) associant MZGR64 à GNEI4 mais sans LTNL5 et celui de Vaulry-Cieux qui associe GNEI4 avec AMPH4 et MIGM4. Ces 3 environnements sont clairement associés à l'Unité Supérieure des Gneiss.

Les associations correspondant aux gîtes de La Garde, Puy les Vignes, Les Caillaudoux et de 9 Jours et de 9 Jours-Greisen (75 cellules en tout) sont localisées dans l'Unité Inférieure des Gneiss avec des associations impliquant GNEI3 avec d'autres formations de la même unité (amphibolites, migmatites, grès) et des intrusifs granitiques (GRAN61 ou GRAN64). Ces associations sont présentes dans tout le Limousin, à l'exception de sa partie centrale et orientale.

L'association correspondant au gîte des Chèzes (26 cellules), impliquant essentiellement des granites, est localisée en bordure interne des précédentes.

Les associations restantes correspondent à des environnements spécifiques qui génèrent peu de cellules, que ce soit pour Sussac et Vaux (2 cellules) à environnement de micaschistes avec des niveaux de carbonates et de roches basiques. Les Côtes (4 cellules avec MZGR61, LEPT1 et GRAN64) ou Échassières (19 cellules) ont comme point commun d'inclure des formations de l'Unité Parautochtone des Micaschistes (MCSH1 ou SCSH1). A part les cellules de type Échassières qui montrent une répartition très localisée et apparaissent aussi dans la partie sud de la zone d'étude, les autres cellules restent à proximité immédiate des gîtes ayant servi à définir les cellules étalon.

3.4.3. CBA par signature exacte

La CAH produit des classes qui regroupent des cellules autour d'un « noyau » de base (association lithologique principale - Tableau 5) mais qui agrègent aussi d'autres lithologies moins représentées dans la classe.

Gîte de référence	Association lithologique présente dans la cellule
9 Jours	AMPH3-FMCGR-GNEI3-GRAN61-MIGM3
Vaulry La Garde	AMPH4-FMCGR-FQTZ-GRAN61-GRAN64-MIGM3-MIGM4
Vaulry Cieux	AMPH4-FQTZ-GRAN61-GRAN64-MIGM4-MZGR61-ORTG4
Sussac	AMPH4-MARB1-MCSH1-UBAS4
9 Jours	FMCGR-FQTZ-GNEI3-GRES3-MIGM3
Puy les Vignes	FMCGR-FQTZ-GNEI3-MIGM3
Perissac	FMCGR-FQTZ-GRAN64-MZGR64
Les Côtes	FQTZ-GNEI1-GRAN64-LEPT1-MCSH1-MIGM1-MZGR61
Mazet	FQTZ-GNEI3-GNEI4-GRAN64-SCSH1
Les Caillaudoux	FQTZ-GNEI3-MIGM3
Pinardeau	FQTZ-GNEI4-LTNL5-MZGR61
Les Chezes	FQTZ-GRAN61-GRAN62-GRAN64-GRAN65
Les Chaillats	FQTZ-GRAN63-MCSH1-SCSH1
Les Montmins	FQTZ-GRAN64-SCSH1

Tableau 5 : Associations présentes pour les cellules contenant au moins un gîte (14 cellules pour 16 gîtes).

Nous avons un effet de « flou » sur la composition lithologique de chaque famille de cellules, effet de flou qui peut être intéressant car il augmente le nombre de cellules favorables en associant des cellules un peu différentes autour du noyau.

À l'inverse, si l'on veut éviter cet effet de flou, 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 105 cellules au lieu de 211 par la méthode CAH.

Code Géol.	9 Jours	Vaulry La Garde	Les Chezes	Vaulry Cieux	Les Côtes	Mazet	Les Montmins	Les Chaillats	Pinardeau	Les Caillaudoux	9 Jours (greisen)	Puy les Vignes	Sus-sac
AMPH3	x												
AMPH4		x		x									x
FMCGR	x	x									x	x	
FQTZ		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
GNEI1					x								
GNEI3	x					x				x	x	x	
GNEI4						x			x				
GRAN61	x	x	x	x									
GRAN62			x										
GRAN63								x					
GRAN64		x	x	x	x	x	x						
GRAN65			x										
LEPT1					x								
LTNL5									x				
MARB1													x
MCSH1					x			x					x
MIGM1					x								
MIGM3	x	x								x	x	x	
MIGM4		x		x									
MZGR61				x	x				x				
ORTG4				x									
SCSH1						x	x	x					
UBAS4													x

Tableau 6 : Synthèse des formations constitutives des associations.

Le Tableau 6 regroupe les formations impliquées dans ces associations.

Il faut noter que la sélection se fait sur la présence **d'au moins** une des lithologies mentionnées dans la signature, ainsi d'autres lithologies peuvent être présentes; on voit bien dans ce cas que plus l'association sera simple (peu de formations) et banale, plus on aura de chance de la trouver dans la zone d'étude. C'est le cas par exemple de la signature « les Caillaudoux » (FQTZ+GNEI3+MIGM3).

En analysant le tableau 6, on remarque la présence quasi systématique des filons de quartz (souvent identifiés comme porteurs de la minéralisation) ainsi que celle des granites (soit GRAN61 et/ou GRAN64 en majorité + MZGR61) présents dans 9 cellules sur 13. L'environnement associé au granite d'Échassières (GRAN64) est spécifique avec la présence de SCSH1.

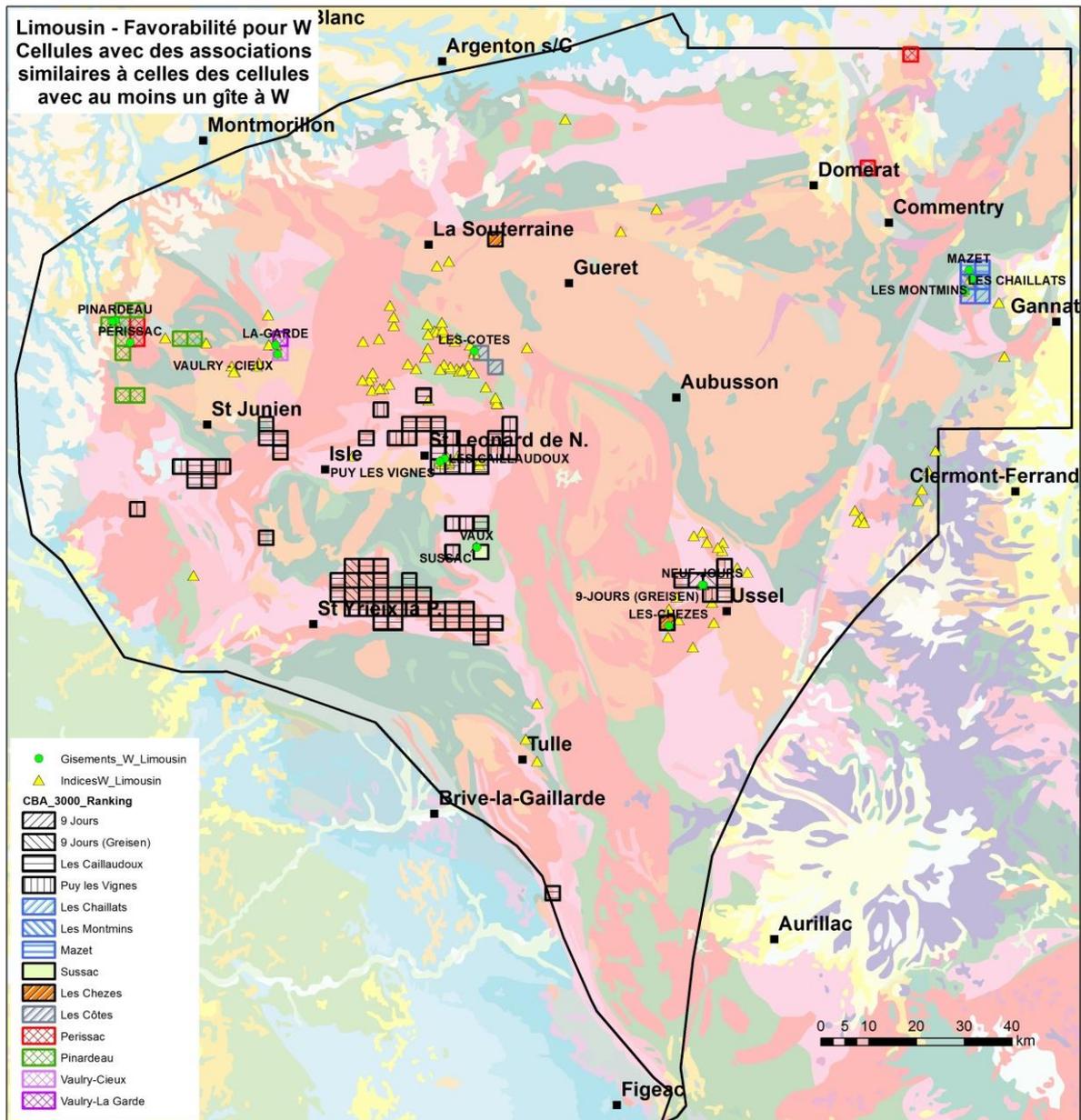


Figure 20 : Report cartographique des cellules présentant les mêmes associations lithologiques que celles contenant au moins un gîte à W.

Les associations sans granite sont soit très spécifiques, comme Sussac avec présence de marbres, micaschistes et amphibolites, soit très « banales » quand elles associent GNEI3 et/ou MIGM3, ce qui pourrait conduire à penser qu'un phénomène supplémentaire non reporté sur les cartes géologiques doit intervenir pour favoriser la présence de minéralisation en W.

Le report cartographique des cellules présentant ces associations lithologiques (Figure 20) confirme l'existence de plusieurs familles contraintes spatialement :

- la famille 9 Jours, Les Caillaudoux, Puy les Vignes marquée par l'association GNEI3 et MIGM3 et FMCGR et/ou FQTZ. C'est l'association qui présente la répartition géographique la plus large mais qui n'est pas très discriminante car plutôt banale dans ce contexte. Cette association définit une large bande au nord-est de Saint-Yrieix-la-Perche sans indice connu ;

- La famille des gîtes Le Chaillat, Les Montmins et Mazet qui sont regroupés autour du granite d'Échassières et qui se marquent par la présence de FQTZ, SCSH1 et de GRAN64 ;
- Les cellules de type Pinardeau à FQTZ-GNEI4-LTNL5-MZGR61 s'étendent sur quelques cellules à l'ouest de la zone d'étude ;
- Deux cellules de type Perissac à FMCGR-FQTZ-GRAN64-MZGR64 se trouvent autour du gîte et deux sont dispersées dans la partie nord-est de la zone d'étude ;
- La cellule associée au gîte Les Chèzes (à l'ouest d'Ussel) à FQTZ-GRAN61-GRAN62-GRAN64-GRAN65 a un équivalent au nord de la zone, à côté de La-Souterraine ;
- La famille Vaulry qui reste cantonnée aux 2 cellules contenant les 2 gîtes avec un noyau à AMPH4-FQTZ-GRAN61-GRAN64-MIGM4 ;
- Le gîte Les Côtes à FQTZ-GNEI1-GRAN64-LEPT1-MCSH1-MIGM1-MZGR61 définit deux cellules mitoyennes du gîte ;
- Le gîte de Sussac est localisé dans une cellule unique à AMPH4-MARB1-MCSH1-UBAS4.

Comme on peut le voir sur la Figure 20, cette méthode de recherche de signatures exactes est rigoureuse mais assez restrictive - 105 cellules sont sélectionnées sur les 3 309 de la zone d'étude. Les cellules présentant les associations contenant peu de lithologies les plus « banales » sont favorisées car elles sont souvent plus nombreuses que les associations plus complexes. Par exemple, une association étalon A-D est présente dans les cellules A-B-C-D-E mais aussi dans A-B-D, A-D-E, A-C-D, etc., alors que l'association étalon complète A-B-C-D-E sera plus rare. C'est ainsi que les cellules de la famille 9 Jours-Caillaudoux sont les plus nombreuses car l'association FQTZ-GNEI3-MIGM3 est assez peu spécifique.

3.4.4. Comparaison entre CBA par CAH et CBA par signature exacte

Comme on peut le voir dans le Tableau 7, les associations présentes dans les cellules obtenues par CAH sont plus « floues » et peuvent correspondre à plusieurs associations exactes autour de lithologies communes. Cette notion de flou peut être intéressante mais elle peut aussi élargir de façon peu souhaitable le champ des cellules estimées favorables. C'est le cas par exemple des cellules du groupe 62 créé autour de la formation LNTL5 (Groupe de la Lignée Tonalitique) qui est présente dans tout le nord du Limousin et dont le rôle dans les minéralisations à W est peu évident. Dans ce cas, la CBA par association exacte est beaucoup plus ciblée. Par contre, cette dernière peut devenir peu discriminante dans le cas d'associations de formations « banales » comme celle des Caillaudoux (FQTZ-GNEI3-MIGM3).

Si les cellules sélectionnées par l'une ou l'autre méthode sont cohérentes au niveau des gîtes, on s'aperçoit toutefois qu'il y a des divergences de résultat pour les cellules sélectionnées par similitude de signature lithologique, soit par CAH, soit par association exacte.

CAH250	Association majeure du groupe de CAH	Gîte de référence (CAH)	Gîte de référence (composition exacte)	Association lithologique présente dans la cellule
103	MIGM3-GNEI3-AMPH3	9 jours (Greisen)	9 jours (Greisen)	AMPH3-FMCGR-GNEI3-GRAN61-MIGM3
185	GRES3-GNEI3-GRAN64-MCSH1	9 jours	9 Jours	FMCGR-FQTZ-GNEI3-GRES3-MIGM3
149	SCSH1-GNEI3-GNEI4-FQTZ	Échassières	Les Chaillats	FQTZ-GRAN63-MCSH1-SCSH1
			Les Montmins	FQTZ-GRAN64-SCSH1
			Mazet	FQTZ-GNEI3-GNEI4-GRAN64-SCSH1
108	GRAN65-GRAN64-GRAN61-FQTZ	Les Chèzes	Les Chezes	FQTZ-GRAN61-GRAN62-GRAN64-GRAN65
163	MCSSH1-MZGR1-LEPT1-MIGM1-FQTZ-GRAN64	Les Côtes	Les Côtes	FQTZ-GNEI1-GRAN64-LEPT1-MCSH1-MIGM1-MZGR61
145	MZGR64-FQTZ-FMCGR-GNEI4	Perissac	Perissac	FMCGR-FQTZ-GRAN64-MZGR64
62	LTNL5-GNEI4-MZGR61	Pinardeau	Pinardeau	FQTZ-GNEI4-LTNL5-MZGR61
191	MCSH1-MARB1-FQTZ-AMPH4-UBAS4	Sussac	Sussac	AMPH4-MARB1-MCSH1-UBAS4
66	ORTG4-GNEI4-AMPH4	Vaulry	Vaulry Cieux	AMPH4-FQTZ-GRAN61-GRAN64-MIGM4-MZGR61-ORTG4
89	MIGM3-GNEI3-GRAN61	La Garde-Caillaudoux-Puy les Vignes	Vaulry La Garde	AMPH4-FMCGR-FQTZ-GRAN61-GRAN64-MIGM3-MIGM4
			Les Caillaudoux	FQTZ-GNEI3-MIGM3
			Puy les Vignes	FMCGR-FQTZ-GNEI3-MIGM3

Tableau 7 : Comparaison entre les associations lithologiques issues de la CBA par CAH et de la CBA par recherche de signature exacte.

3.4.5. CBA par hiérarchisation (Ranking)

Pour généraliser les résultats obtenus à partir de la CBA par signature exacte, nous avons cherché à élaborer une méthode permettant une hiérarchisation (= ranking) des cellules à partir des associations présentes dans les cellules étalon.

Si on fait le compte des formations impliquées dans des cellules avec un ou plusieurs gîtes, on n'obtient que 24 formations sur les 82 formations attribuées au socle (c'est-à-dire hors Mésozoïque, Tertiaire et Quaternaire). On peut penser que l'association de chacune de ces 24 lithologies avec une autre du même ensemble est significative (association favorable) sans qu'on puisse a priori dire quelle est la meilleure.

La méthode de ranking choisie (parmi d'autres) va comptabiliser la présence de toutes les combinaisons possibles à partir des cellules étalons, partant de l'hypothèse que plus nombreuses seront les associations favorables, meilleur sera le contexte lithologique contenu dans la cellule.

Chaque association « étalon » est décomposée en autant d'associations de 4, 3 puis de 2 lithologies que possible et, un compteur s'incrémente de 1 pour la cellule chaque fois qu'une de ces association unitaire y est trouvée.

Par exemple, si la cellule étalon contient les formations FMCGR-FQTZ-GNEI3-MIGM3, les combinaisons possibles sont :

- pour 4 formations, 1 combinaison : FMCGR-FQTZ-GNEI3-MIGM3 ;
- pour 3 formations, 4 combinaisons : FMCGR-FQTZ-GNEI3, FMCGR-FQTZ-MIGM3, FQTZ-GNEI3-MIGM3, FMCGR-GNEI3-MIGM3 ;
- pour 2 formations, 6 combinaisons: FMCGR-FQTZ, FMCGR-GNEI3, FMCGR- MIGM3, FQTZ-GNEI3, FQTZ-MIGM3, GNEI3-MIGM3.

Soit un score de 11 pour la cellule étalon

En généralisant ce calcul pour les 14 types d'associations présentes dans les cellules étalon, on va donner un score à chaque cellule en fonction du nombre de combinaisons favorables qu'elle contient. La cartographie de cette valeur va nous permettre de sélectionner les zones contenant les cellules à plus forte présence de combinaisons favorables (Figure 21).

Cette méthode de valorisation de la CBA a tendance à augmenter le score des cellules à nombreuses lithologies (environnement géologique complexe). Elle présente aussi l'avantage de ne pas pénaliser les associations rares car seul le nombre de combinaison présent dans chaque cellule est pris en compte; par contre, une cellule d'association rare pourra être spatialement isolée.

Si on regarde la répartition des 123 indices connus sur la zone d'étude par rapport au ranking des cellules, 9 sont en dehors des cellules notées, 58 ont des scores inférieurs à 11, 35 des scores compris entre 11 et 20 et 21 des scores supérieurs à 20. Donc, plus de 92 % des indices sont superposés à une cellule dont le ranking est supérieur à 0 et plus de 45 % avec un ranking supérieur à 10.

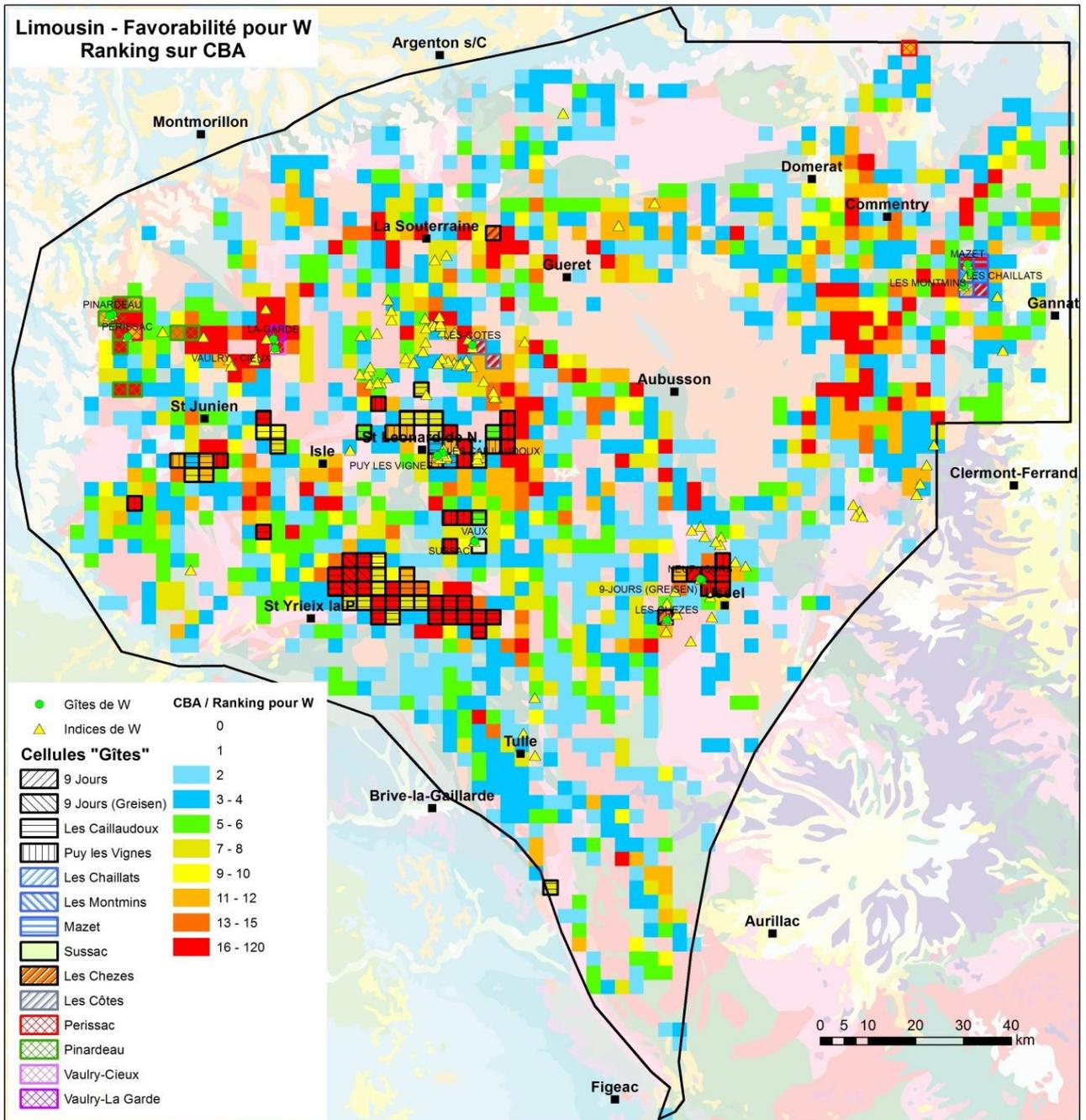


Figure 21 : Image du ranking pour W en Limousin et report des cellules de signatures exactes.

4. Sélection de zones favorables

À partir des cellules dont le ranking est supérieur à 10, des surfaces d'anomalies ont été générées (Figure 22). Elles constituent des zones continues considérées comme anomalies majeures, souvent associées à de nombreux indices à W. Les cellules isolées dont le score est supérieur à 6 ont aussi été sélectionnées, elles constituent des cibles de deuxième priorité.

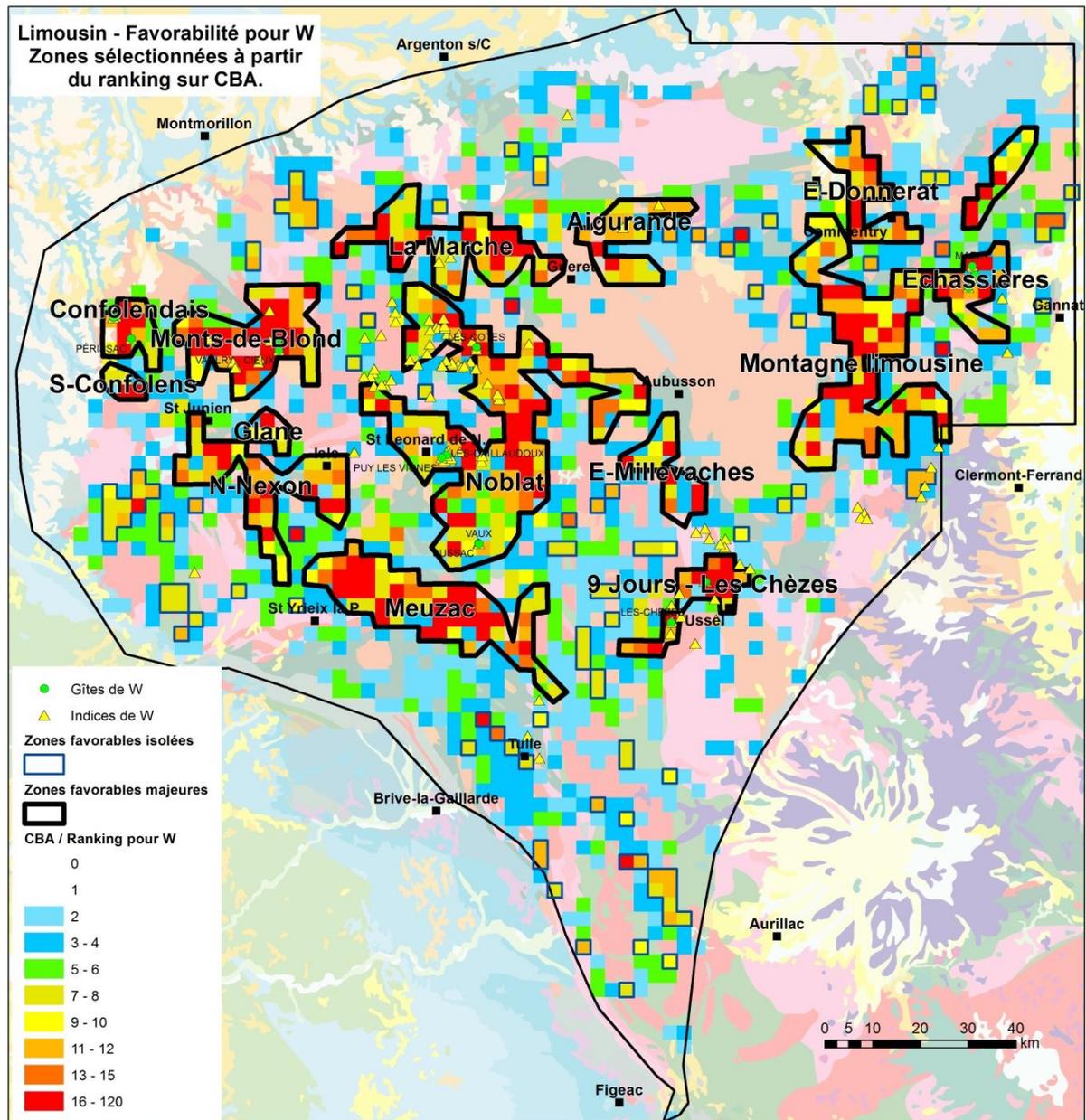


Figure 22 : Contourage de zones favorables à la présence de minéralisation en W à partir du ranking sur CBA.

Ces zones favorables se disposent autour du massif granitique de Guéret avec un élargissement dans la partie ouest. Elles peuvent inclure plusieurs gîtes de référence (Tableau 8) ou être vierges de tout indice. Leur extension vers le sud de la zone d'étude se limite à quelques anomalies isolées.

Nom de la zone favorable	Surface (km2)	Nombre d'indices contenus	Gîtes associés	Géochimie – W> 20ppm	Wolframite (WOL) – Scheelite (SCH)
9 Jours - Les Chèzes	171.55	7	9 Jours, Les Chèzes	Oui	SCH-WOL
Aigurande	218.33	2		Oui	SCH
Confolendais	125.90	3	Pinardeau, Périssac	Oui	SCH
Échassières	183.85	5	Les Montmins, Mazet, Les Chaillats	Oui	SCH-WOL
E-Donnerat	205.25			Non échantillonné	Non échantillonné
E-Millevalches	168.25			éch. partiel	SCH-WOL – éch. partiel
Glane	56.13			Non échantillonné	Non échantillonné
La Marche	429.57	2		Oui	SCH-WOL
Meuzac	603.74			Oui	SCH-WOL
Montagne limousine	769.94			Oui	SCH-WOL
Monts-de-Blond	441.41	11	La Garde, Vaulry-Cieux	Oui	SCH-WOL
N-Nexon	402.57			Oui - éch. partiel	Non - éch. partiel
Noblat	1280.91	46	Les Côtes, Les Caillaudoux, Sussac, Vaux, Puy les Vignes	Oui	SCH-WOL
N-Sillon Houiller	114.31			Non échantillonné	Non échantillonné
S-Confolens	50.62			Non	SCH

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des zones anormales majeures.

Les zones favorables qui ne sont pas associées à des indices connus présentent toutefois des marqueurs de minéralisation à W, en géochimie, et/ou en alluvionnaire, sachant que les échantillonnages ne couvrent pas toute la zone d'étude.

Ces zones constituent des secteurs prioritaires car elles contiennent des combinaisons de contextes géologiques favorables (scores élevés) et même si elles ne présentent pas d'indices connus, des indicateurs complémentaires apportés par la géochimie et/ou l'alluvionnaire viennent souvent corroborer cette favorabilité. Toutefois, ces zones restent très grandes ce qui nécessitera des efforts de prospection importants pour mieux cibler les zones d'intérêt. Cela traduit sans doute le fait que le critère géologique de surface seul n'est pas suffisant pour bien contraindre les paramètres de sélection de zones mieux ciblées.

5. CBA – Ranking sur géochimie

Pour confirmer la pertinence du ranking calculé à partir des gîtes, nous avons utilisé une démarche similaire en prenant comme étalon les échantillons de géochimie de l'Inventaire contenant plus de 100 ppm de W.

Le report des 383 cellules présentant une signature égale à une de celle décrite dans le Tableau 9 définit des ensembles très similaires à ceux définis à partir des gîtes (Figure 23).

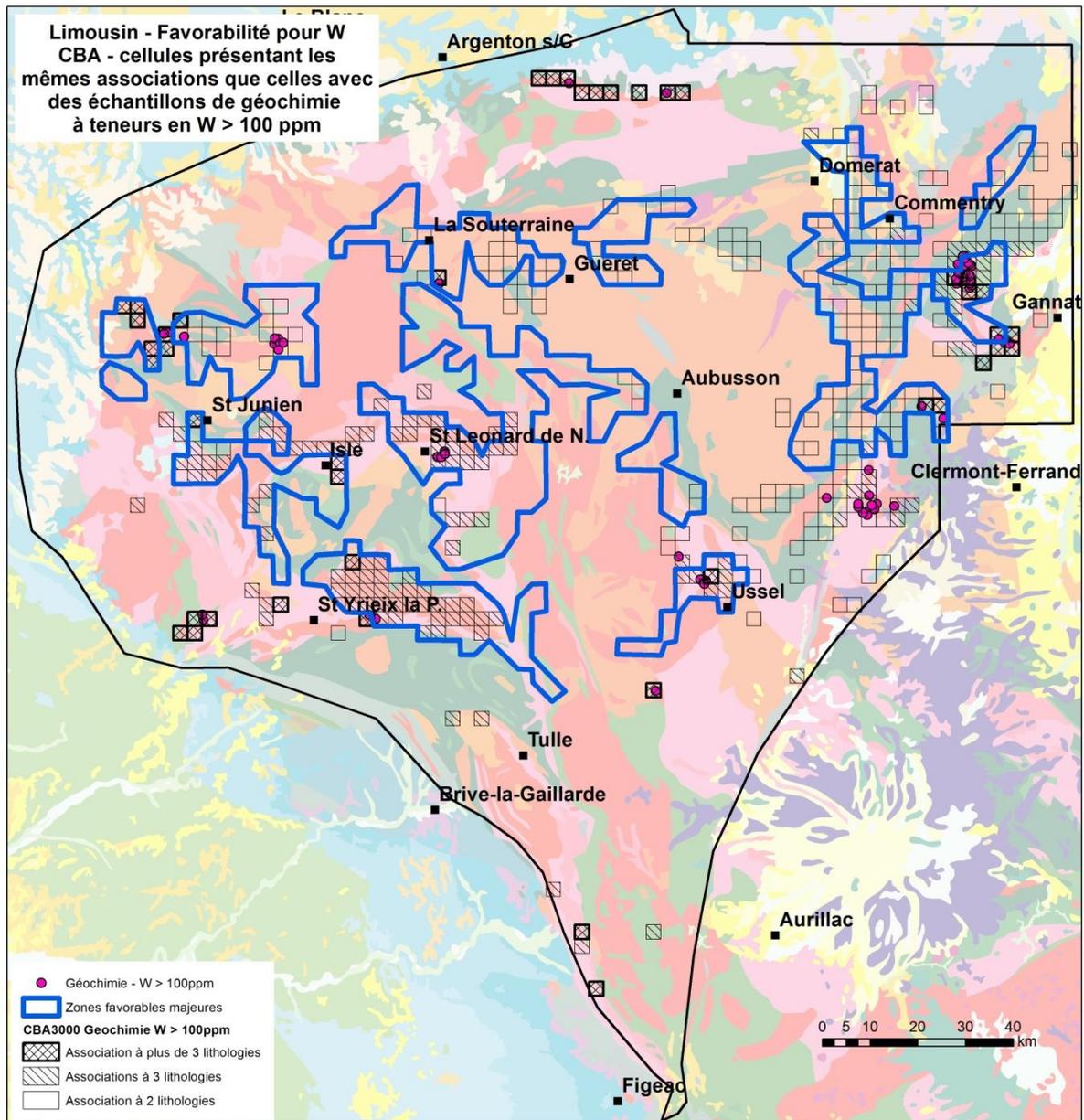


Figure 23 : Cellules présentant la même signature qu'une cellule contenant au moins un échantillon de géochimie à une teneur de plus de 100 ppm de W.

Numéro de cellule	Association lithologique
67--68	AMPH4-FMCGR-FQTZ-GNEI3-GNEI4-GRAN63-LEPT4-MCSH4
67--69	AMPH4-FMCGR-FQTZ-GNEI4-GRAN63-GRES4
67--18	AMPH4-FMCGR-FQTZ-GRAN61-GRAN64-MIGM3-MIGM4
47--25	AMPH4-FPEGM-FQTZ-GNEI3-GNEI4-MIGM3-ORTG3-ORTG4-UBAS4
71--65	AMPH4-FQTZ-GNEI3-GNEI4-SCSH1-UBAS4
66--18	AMPH4-FQTZ-GRAN61-GRAN64-MIGM4-MZGR61-ORTG4
72--65	AMPH4-GNEI3-GNEI4-MARB4-MIGM4-SCSH1
85--38	AMPH4-LEPT3-LEPT4-LPAM4-MIGM4-ORTG4
84--45	AMPH4-LPAM4-MIGM4-ORTG4
42--44	FDOLE-FQTZ-GNEI3-GRAN61-GRAN62
71--29	FMCGR-FQTZ-GDIO61-GRAN5-GRAN61-GRAN62
49--48	FMCGR-FQTZ-GNEI3-GRAN61-GRAN65-MIGM3
50--47	FMCGR-FQTZ-GNEI3-GRES3-MIGM3
58--29	FMCGR-FQTZ-GNEI3-MIGM3
66--69	FMCGR-FQTZ-GNEI4-GRAN63-VACI6-VSED6
62--63	FMCGR-GDIO5-GRAN61-MIGM4-MZGR61-VACI6
50--48	FMCGR-GNEI3-GRAN61-MIGM3
47--24	FPEGM-FQTZ-GNEI3-GNEI4-ORTG3
72--66	FQTZ-GNEI3-GNEI4-GRAN64-SCSH1
47--13	FQTZ-GNEI3-GNEI4-MCSH4-ORTG3
59--29	FQTZ-GNEI3-MIGM3
61--64	FQTZ-GNEI4-GRAN61-GRAN62-GRAN63-MIGM4-MZGR61-VACI6-VSED6
67--11	FQTZ-GNEI4-LTNL5-MIGM4-MZGR61-MZGR64
67--10	FQTZ-GNEI4-LTNL5-MZGR64
70--66	FQTZ-GRAN63-MCSH1-SCSH1
71--66	FQTZ-GRAN64-SCSH1
56--56	FQTZ-MIGM4
57--59	GNEI3-GNEI4-GRAN61-LEPT4-MIGM4-ORTG4
73--66	GNEI3-GNEI4-MIGM4
51--46	GNEI3-MCSH3-MIGM3
56--59	GNEI4-GRAN61-MCSH4
54--59	GRAN61-MCSH4

Tableau 9 : Compositions lithologiques des cellules contenant au moins un point de géochimie à plus de 100 ppm W.

À partir des associations présentes dans le Tableau 9 avec la même méthode que celle utilisée pour les gîtes, nous avons calculé un ranking pour l'ensemble des cellules de la zone d'étude.

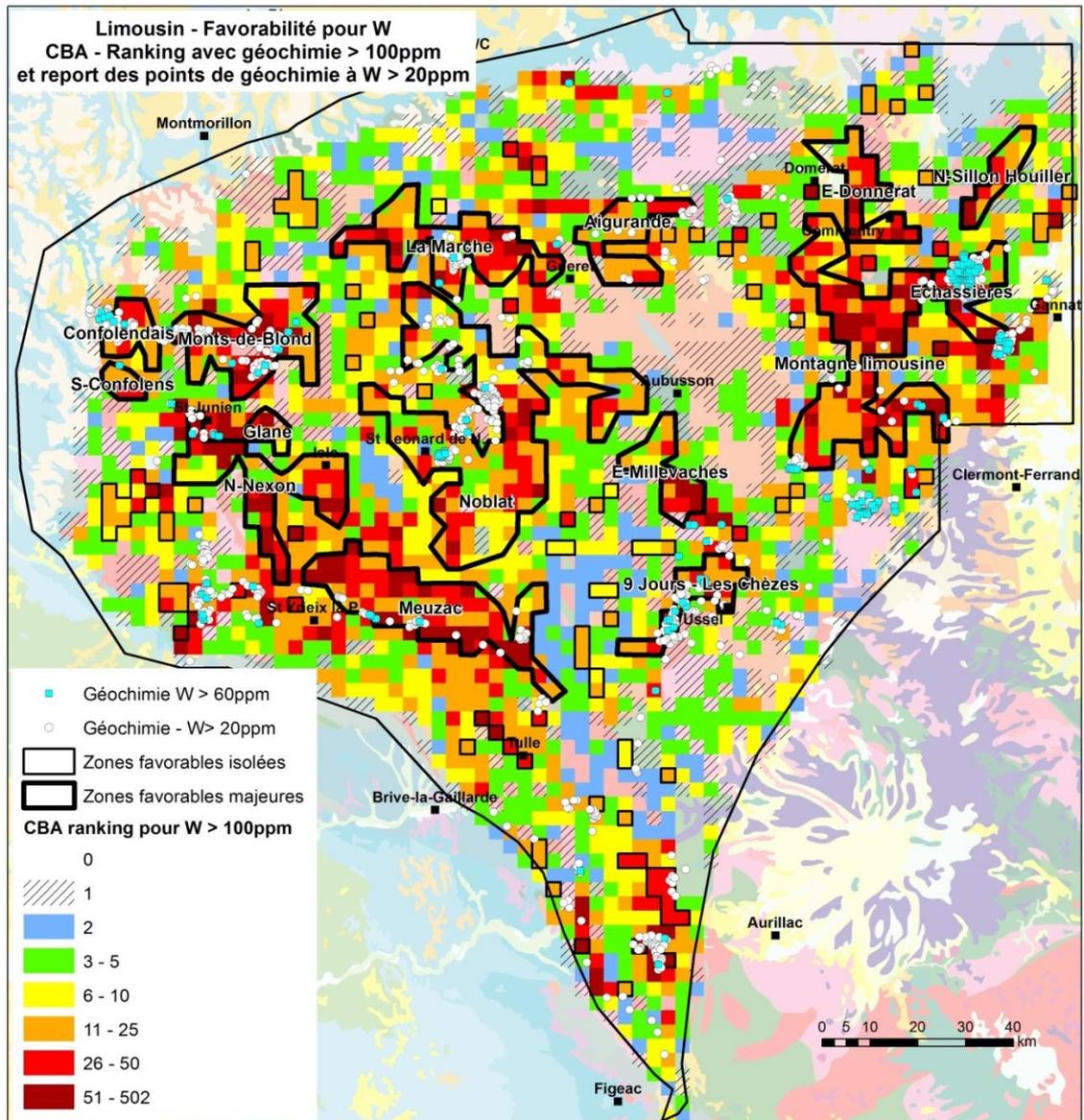


Figure 24 : Report des zones favorables contourées à partir des indices sur fond du ranking calculé à partir des échantillons de géochimie à plus de 100ppm W et report des échantillons à plus de 20 ppm W.

Ce ranking calculé à partir des points de géochimie à plus de 100 ppm (échantillonnage et analyses BRGM) confirme celui calculé à partir des gîtes de références (Figure 24). Toutefois, les cellules à fort score sont plus largement réparties. Cela tend à unifier les zones favorables définies par les seuls gîtes comme par exemple, Meuzac, et nord Nexon ou Montagne limousine avec un plus fort développement vers l'est qui rejoint E-Donnerat.

Le ranking sur la géochimie permet de générer 4 nouvelles zones favorables qui complètent les précédentes. La première se situe à l'ouest de Gannat et inclus l'indice des Bajaris, une à l'extrême sud (Roquebrou) conforte une zone favorable isolée définie par les gîtes; elle n'est pas associée à un indice. Deux autres anomalies sont localisées au sud-ouest du Limousin, à l'ouest de N-Nexon et englobent aussi des anomalies isolées (zones favorables de Saint Saud la Coussière et de Cheronnac).

Nom de la zone anormale	Surface (km ²)	Nombre d'indices contenus	Gîtes associés	Géochimie – W > 20ppm	Wolframite (WOL) – Scheelite (SCH)
Les Bajaris	242	1		Oui	SCH
Laroquebrou	252	0		Oui	SCH-WOL
Saint Saud la Coussières	156	0		Oui	SCH
Chéronnac	63	0		Non	Non

Tableau 10 : Description des zones favorables issues du ranking sur géochimie.

Deux zones présentant de nombreux points de géochimie à W ressortent avec des scores moyens ou faibles à l'issue des traitements de favorabilité : une zone bien circonscrite au sud de Montagne limousine associée à l'indice de Moulin des Renards, et une orientée nord-sud à l'ouest de N-Nexon (indice de Moulin du Blé) en partie intégrée à la zone favorable de Saint Saud la Coussière. Un groupement de points alignés nord-nord-est - sud-sud-ouest au sud-ouest de Gannat est contenu par des cellules à hauts scores qui prolongent l'anomalie de Montagne limousine (indice des Bajaris) vers le nord-est.

6. Rôle des failles

Le socle du Limousin est parcouru de grands décrochements qui semblent jouer un rôle dans la répartition des indices. La liaison n'est sûrement pas directe mais nous observons que la plupart des zones favorables sélectionnées sont aussi traversées par un de ces décrochements majeurs (Figure 25).

On peut distinguer 3 grandes familles d'orientation :

- ouest-est au nord (La Marche) ;
- nord-ouest - sud-est à sud sud-est à l'ouest ;
- sud-sud-ouest - nord-nord-est à l'est, système bordant le Sillon houiller.

Ce paramètre pourrait donc être un critère de favorabilité supplémentaire qui permettrait de mieux cibler les zones à prospector en première priorité dans des zones favorables dont la surface est souvent très grande. On pourrait, par exemple, travailler sur les surfaces d'intersection entre les zones favorables et une zone tampon de 3 000 m autour de ces décrochements majeurs (Figure 26).

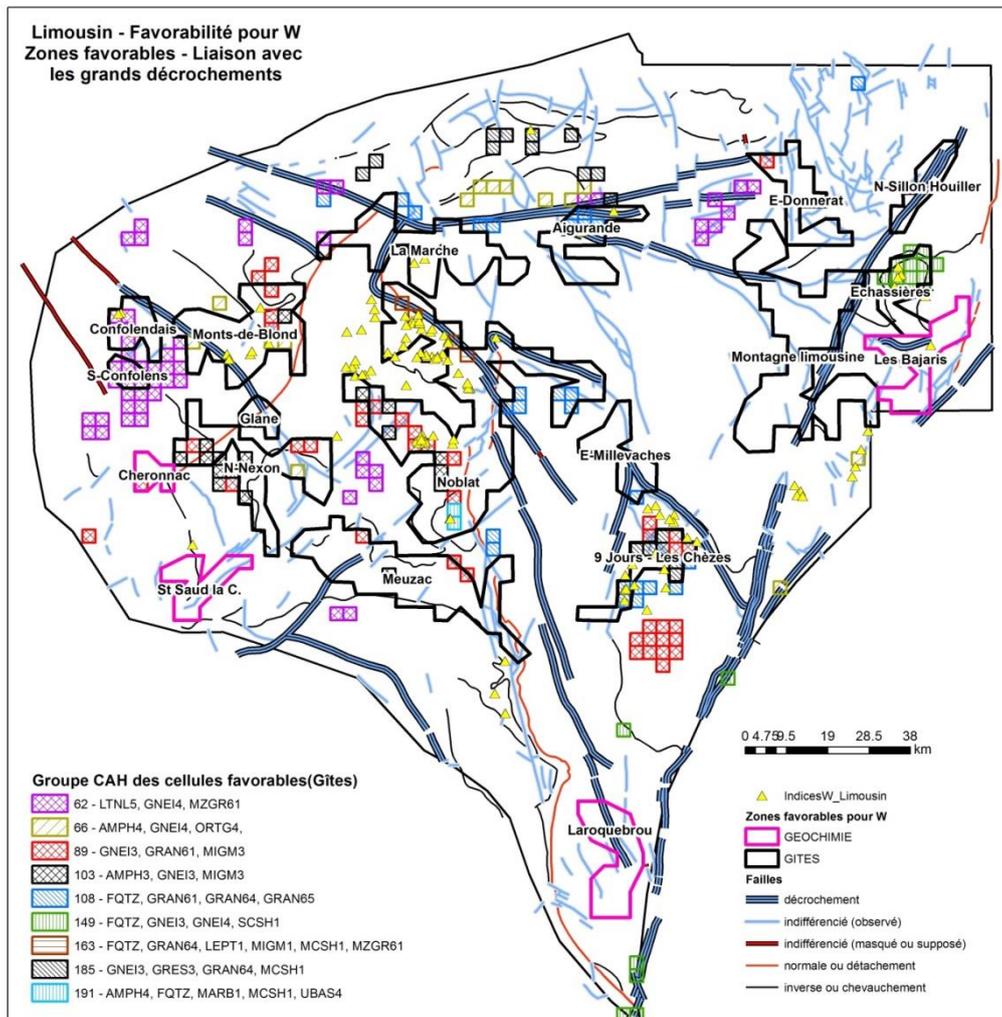


Figure 25 : Relation entre failles majeures du Limousin et des zones favorables à W.

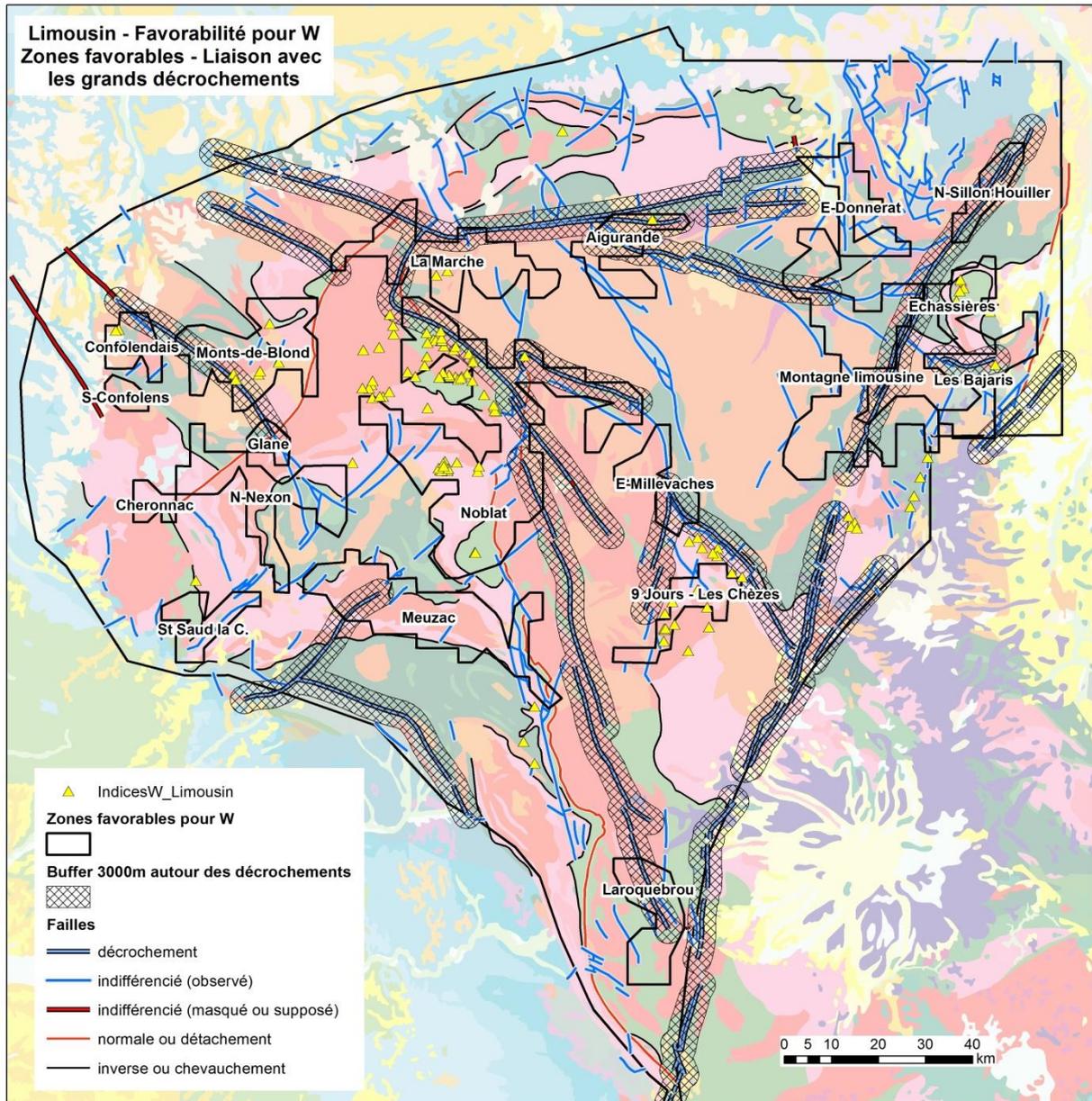


Figure 26 : Intersection entre zones favorables et un buffer de 3 000 m autour des décrochements majeurs.

7. Bilan des zones favorables

Le Tableau 11 présente un récapitulatif des différentes zones favorables mise en évidence par la combinaison des différentes approches mises en œuvre au cours de cette étude. Les fiches correspondant aux gîtes et anomalies géochimiques sont présentées en annexe.

Nom de la zone anormale (origine GIT ou GCH)	Surface (km ²)	Nombre d'indices	Gîtes associés	Géochimie - W > 20 ppm	Alluvionnaire	Présence d'un décrochement majeur	Anomalies géochimiques	Priorité - Potentiel d'exploration
Neuf-Jours - Les Chèzes (GIT)	171.55	7	9 Jours, Les Chèzes	Oui	SCH-WOL	Proche	B-ANO-A1-110	P1 – Tous paramètres présents, contexte varié pouvant impliquer différentes typologies de gisements. Nombreuses cellules CBA-CAH
Aigurande (GIT)	218.33	2		Oui	SCH	Oui	B-ANO-A1-12	P2 – Pas de wolframite mais autres paramètres présents, surtout au nord, Quelques cellules CBA-CAH
Confolendais (GIT)	125.90	3	Pinarde au, Périssac	Oui	SCH	Oui	B-ANO-A1-35	P1 – Pas de wolframite mais autres paramètres présents. Cellules CBA-CAH
Echassières (GIT)	183.85	5	Les Montmins, Mazet, Les Chaillats	Oui	SCH-WOL	Proche	B-ANO-A1-70	P2 – Tous paramètres présents mais zone très connue et explorée. Contexte géologique spécifique. Cellules CBA-CAH
Montluçon (GIT)	205.25			NECH	NECH	Proche		P2 – zone non échantillonnée et sans indice. 1 cellule CBA-CAH
E-Millevaches (GIT)	168.25			ech. partiel	SCH-WOL – ech. partiel	Oui		P3 - zone non échantillonnée et sans indice. Ne sort qu'en ranking. 1 cellule CBA-CAH
Glane (GIT)	56.13			NECH	NECH	Oui		P3 –petite zone non échantillonnée et sans indice. Ne sort qu'en ranking. Pas de cellules CBA-CAH
La Marche (GIT)	429.57	2		Oui	SCH-WOL	Oui		P2 – Grande zone avec plus d'indices en zone centrale. La zone ouest n'est pas échantillonnée. Pas de cellules CBA-CAH.
Meuzac (GIT)	603.74			Oui	SCH-WOL	Non		P2 – Grande zone surtout connue pour or. Pas d'indice mais géochimie dispersée surtout au sud et alluvionnaire abondant. Rares cellules CAB-CAH

Méthodes prédictives appliquées à la province à tungstène du Limousin (Massif central)

Montagne limousine (GIT)	769.94			Oui	SCH-WOL	Oui	B-ANO-A1-76 B-ANO-A1-148	P3- Très grande anomalie. Quelques géochimies et alluvionnaire abondant. Pas d'indice. Pas de CBA-CAH. Pourrait nécessiter un redécoupage
Monts-de-Blond (GIT)	441.41	11	La Garde, Vaulry-Cieux	Oui	SCH-WOL	Oui	B-ANO-A1-35 B-ANO-A1-34	P1 – grande anomalie avec présence de tous les paramètres. Cellules CBA-CAH de plusieurs familles.
N-Nexon (GIT)	402.57			Oui - ech. partiel	ech. partiel	Non	B-ANO-A1-138	P2 – zone mal couverte par l'inventaire et de forme complexe. Cellules CBA-CAH de 3 types.
Noblat (GIT)	1280.91	46	Les Côtes, Les Caillaudoux, Sussac, Vaux, Puy les Vignes	Oui	SCH-WOL	Oui	B-ANO-A1-13 B-ANO-A1-14	P1 (partie nord) à P2 – zone immense qui justifierait un redécoupage plus fin après étude spécifique- Présence de tous les paramètres mais répartition irrégulière, nombreux indices dans la partie nord-ouest. Cellules de CBA-CAH de plusieurs types associées à plusieurs typologies de gisements en partie sud-ouest.
S-Confolens (GIT)	50.62			Non	SCH	Non		P2- Pas d'anomalie géochimique mais présence de scheelite. Entièrement couverte par CBA-CAH d'un seul type.
N-Sillon Houiller (GIT)	114.31			NECH	NECH	Oui		P2 – zone non échantillonnée et sans indice ; ne ressort que par le ranking. Pas de cellules CBA-CAH. A contrôler ?
Les Bajaris (GCH)	242	1		Oui	SCH	Oui	B-ANO-A1-71	P2 – Anomalie W bien groupée autour de l'indice des Bajaris puis vers le NE. Associé à scheelite. Pas de CBA-CAH
Laroquebrou (GCH)	252	0		Oui	SCH-WOL	Oui		P1 ou P2 – géochimie bien structurée et wolframite abondante. Pas de CBA-CAH. A priori mal connue, nécessiterait un contrôle terrain.
Saint Saud Lacoussière (GCH)	156	0		Oui	SCH	Non	B-ANO-A1-16	P1 ou P2- géochimie bien marquée et scheelite abondante. Se prolonge au nord en dehors de la zone. Pas de CBA-CAH
Chéronnac (GCH)	63	0		Non	Non	Non		P2 – pas de teneurs en géochimie ni en alluvionnaire. 1 cellule de CBA-CAH.

Tableau 11 : Récapitulatif et priorisation des zones favorables de la province à W du Limousin. GIT = zone déterminée par le ranking sur la présence de gîte. GCH = zone déterminée par la présence de point de géochimie W > 100 ppm. NECH= non échantillonné.

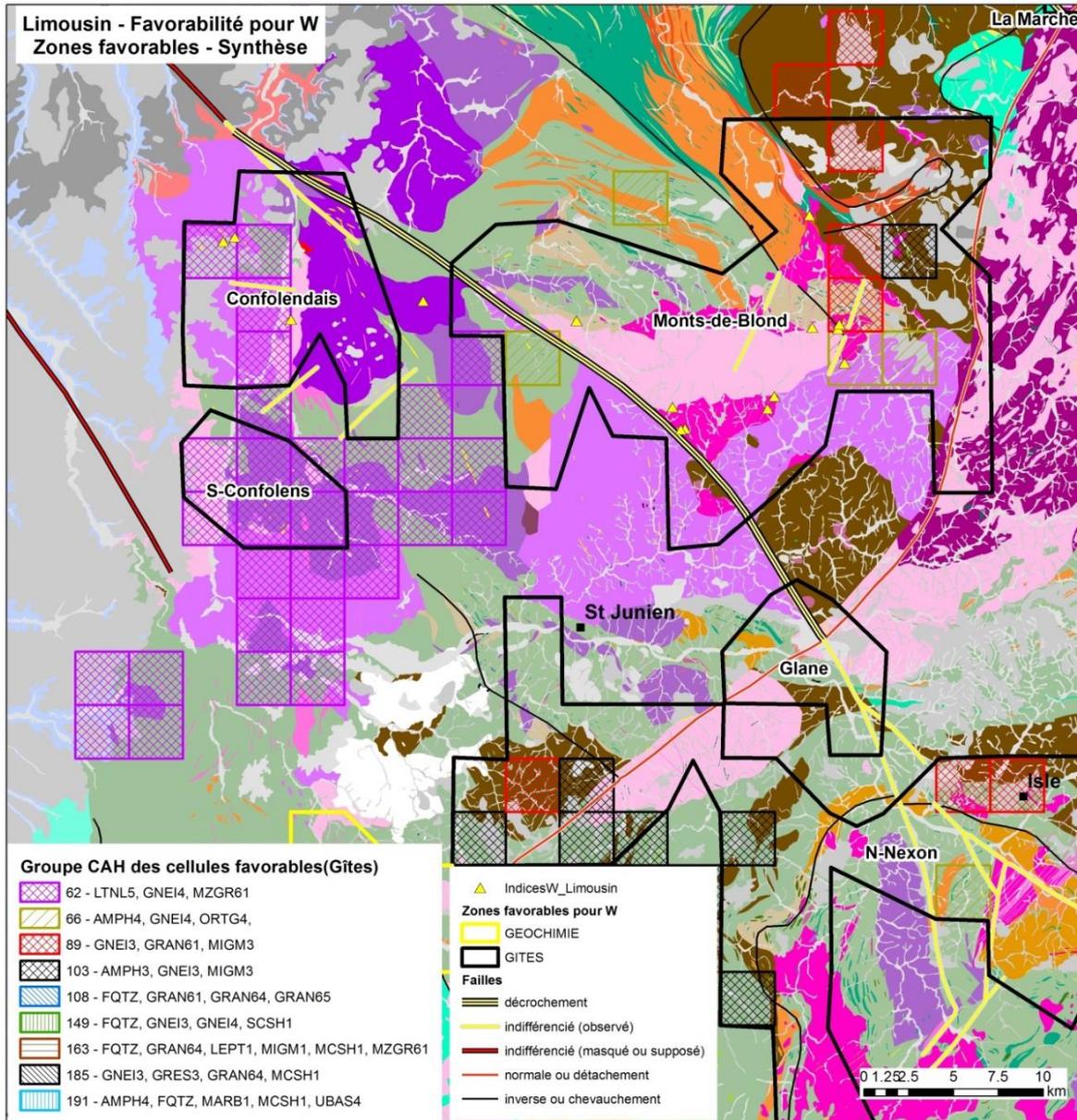


Figure 27 : Paramètres associés aux zones favorables du Confolendais, de S-Confolens, de Glane et des Monts de Blond (Limousin ouest).

La plupart des paramètres favorables sont présents sur les zones du Confolendais, de S-Confolens, de Glane et des Monts de Blond (Figure 27).

Le Confolendais, localisé dans un environnement granitique, se caractérise par la présence des gîtes de Périssac et Pinardeau (FRA-00312, voir annexe 2), des points de géochimie supérieurs à 20 ppm (anomalie géochimique B-ANO-A1-35), de la scheelite en alluvionnaire et est coupé au Nord par un décrochement majeur. Les gîtes connus ont déjà fait l'objet de travaux d'exploration au cours des années 1980.

La zone des Monts de Blond correspond à un district connu centré autour d'un granite différencié, avec les gîtes du district de Vaulry-Cieux (FRA-00853), de la wolframite et de la scheelite présente en alluvionnaire et des anomalies géochimiques bien marquées (B-ANO-A1-34 et B-ANO-A1-35).

La zone favorable de Glane est intéressante car elle n'a pas été couverte par la prospection inventaire et correspond à un contexte géologique comprenant des formations granitiques assez différenciées comme des filons et stocks d'aplopegmatites.

Le Sud-Confolens est en revanche dépourvu d'anomalie géochimique mais nous pouvons noter la présence de scheelite en alluvionnaire. La zone comprend de nombreuses intrusions granitiques, notamment des microgranites.

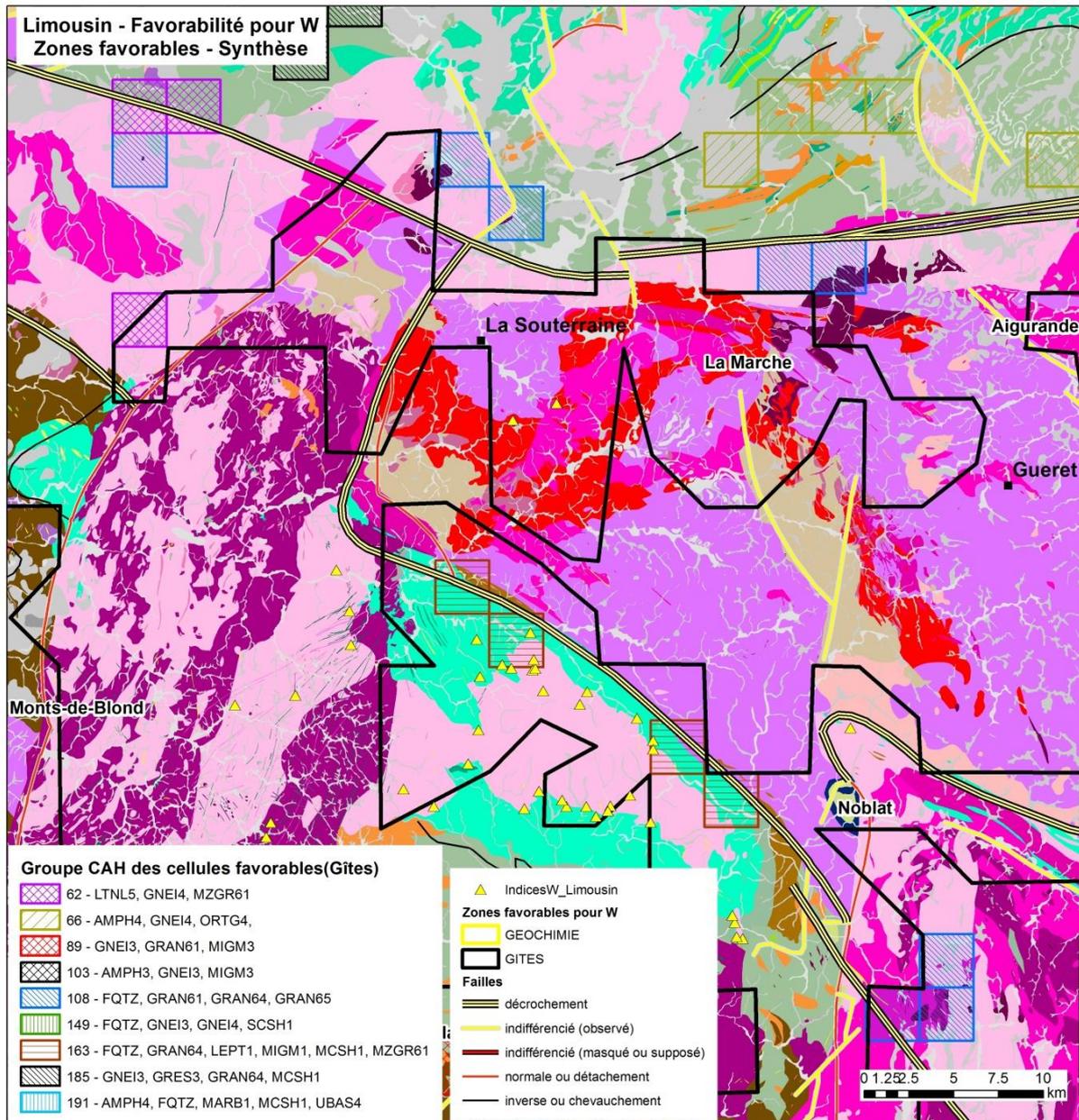


Figure 28 : Paramètres associés à la zone favorable de la Marche (Limousin nord).

La zone favorable de la Marche (Figure 28) est marquée par une grande structure, la présence de nombreux granitoïdes certains différenciés, correspondant principalement aux intrusions du complexe de Guéret et aux leucogranites plus tardifs du domaine de La Marche. Des points de géochimie W supérieurs à 20 ppm, de la wolframite et de la scheelite en alluvionnaire, ainsi que des indices à W y ont été mis en évidence.

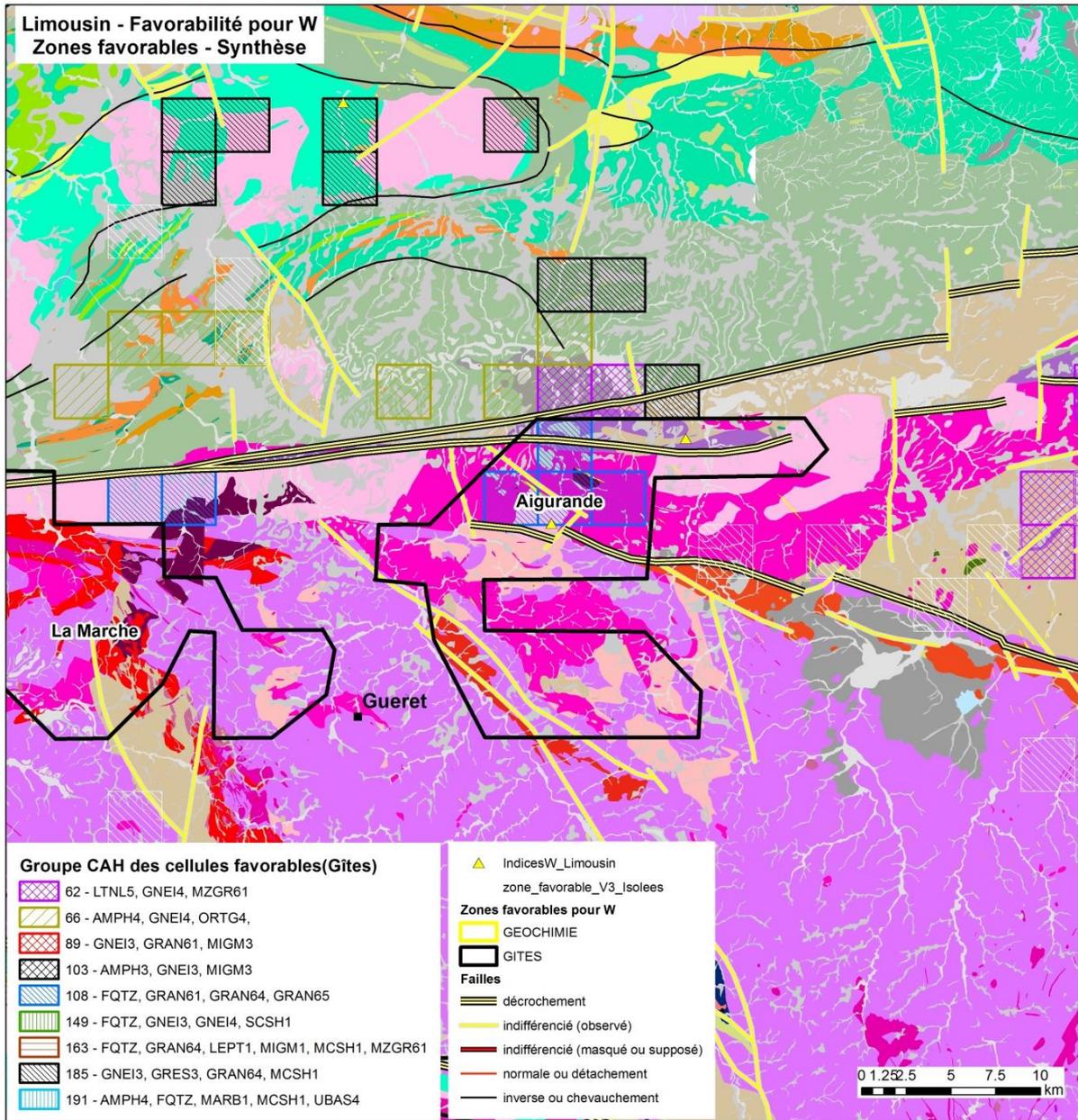


Figure 29 : Paramètres associés à la zone favorable d'Aigurande (Limousin nord).

La zone favorable d'Aigurande (Figure 29) se trouve en continuité de celle de La Marche, dans un contexte granitique similaire cependant marqué par une multiplication des structures associées au domaine de La Marche. Quelques indices à W, de la scheelite en alluvionnaire, et une anomalie géochimique (B-ANO-A1-12) y sont connus.

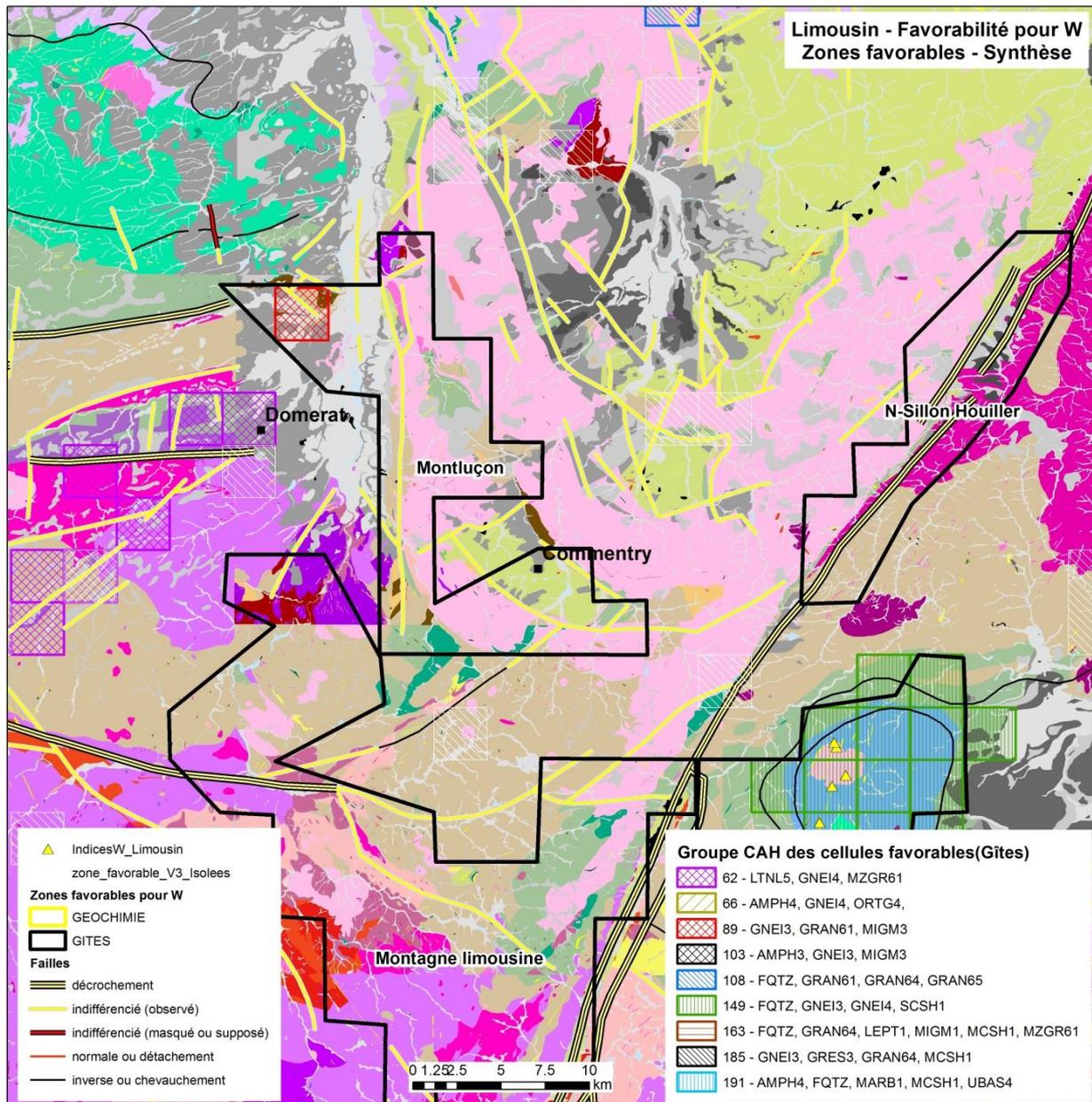


Figure 30 : Paramètres associés aux zones favorables Montluçon et N-Sillon houiller (Limousin nord-est).

Les zones favorables de Montluçon et N-Sillon houiller (Figure 30) n'ont pas fait l'objet d'un échantillonnage durant l'Inventaire. En revanche, le contexte géologique est caractérisé par la présence de nombreux granitoïdes et de grands décrochements.

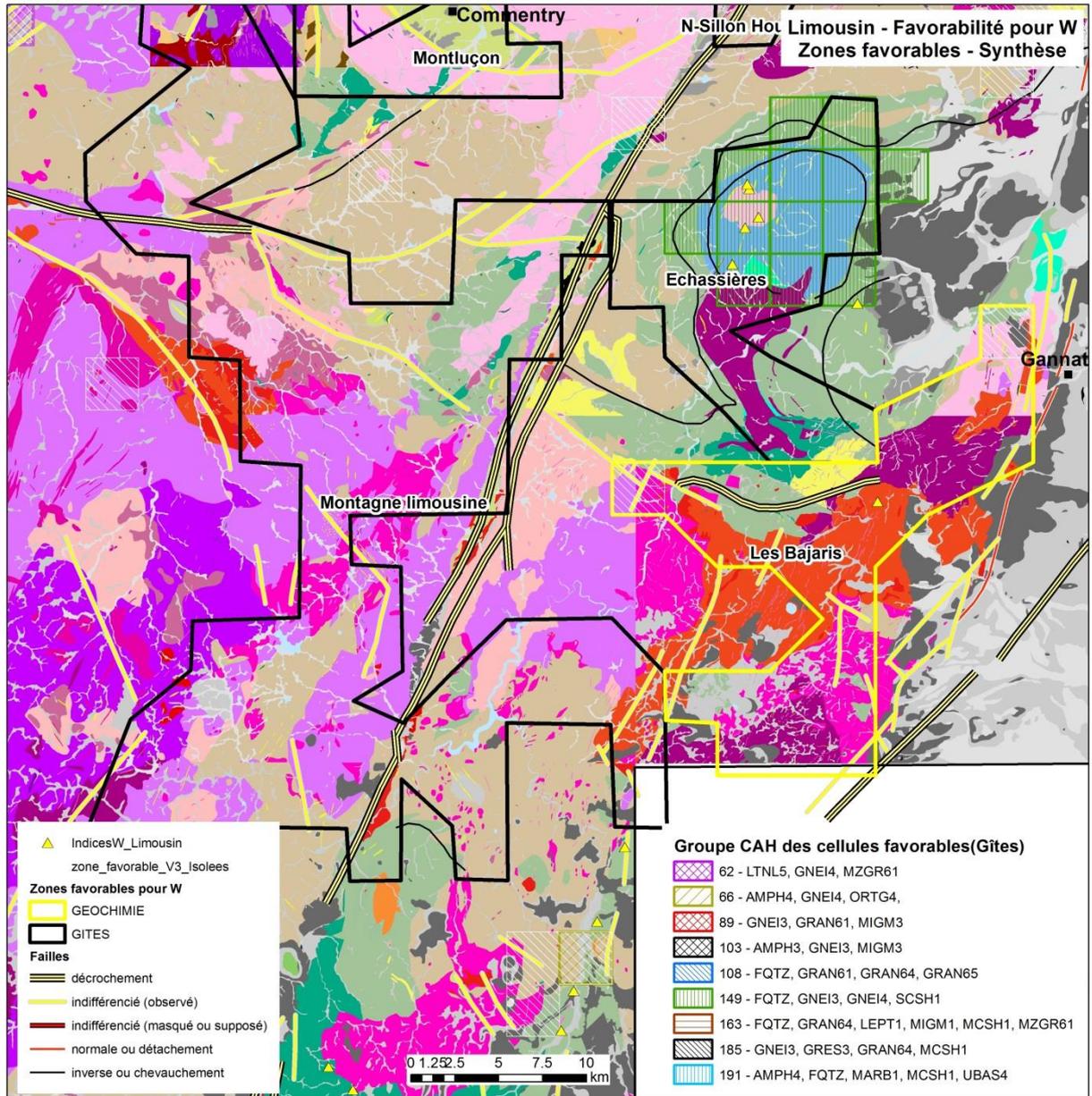


Figure 31 : Paramètres associés aux zones favorables d'Echassières et des Bajaris (Limousin est).

La zone d'Échassières (Figure 31) est très largement connue pour son potentiel en tungstène, avec de nombreux gîtes filoniens qui ont fait l'objet d'exploitations par le passé. La découverte de nouvelles minéralisations n'est pas à exclure considérant ce nombre élevé de gîtes. En particulier, de nouvelles approches exploratoires portant sur une bonne compréhension des contrôles structuraux pourraient s'avérer judicieuses.

La zone Les Bajaris est définie par la géochimie, avec une anomalie bien structurée à proximité d'un indice connu (B-ANO-A1-71). Une grosse partie de la zone s'étend sur les formations volcano-sédimentaires des tufs anthracifères (Viséen). La scheelite est bien présente en alluvionnaire. De très nombreux filons de microgranites y sont aussi cartographiés.

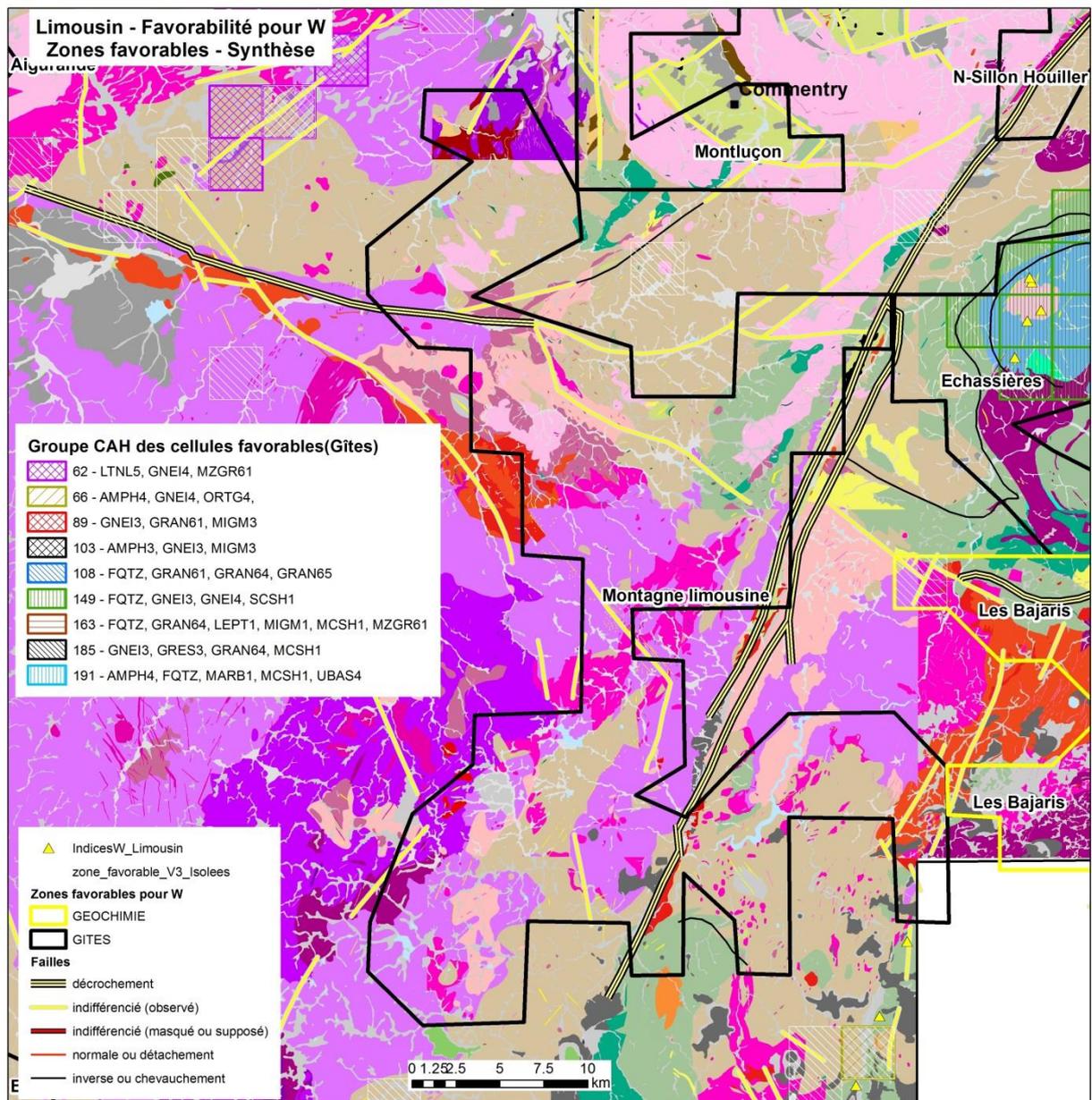


Figure 32 : Paramètres associés à la zone favorable de Montagne limousine (Limousin centre-est).

La zone Montagne Limousine (Figure 32), de grande étendue, est majoritairement localisée à l'ouest du Sillon Houiller et sur la bordure orientale du complexe de Guéret, en contact avec les formations métamorphiques de hauts degrés de l'UIG. Deux anomalies géochimiques (B-ANO-A1-76 et B-ANO-A1-148) ont été mises en évidence. En alluvionnaire, la wolframite et la scheelite sont présentes alors qu'aucun indice n'est connu.

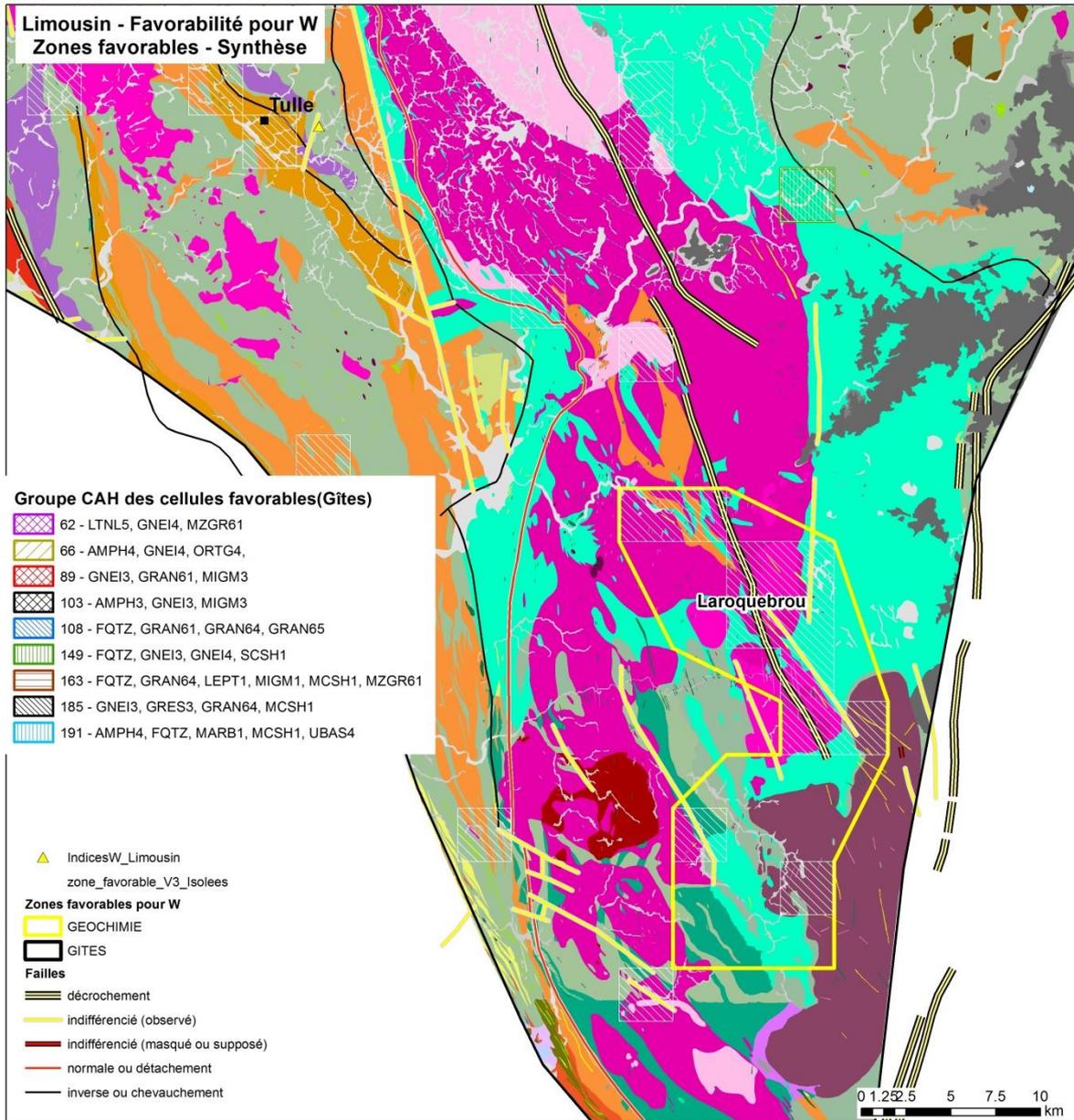


Figure 33 : Paramètres associés à la zone favorable de Laroquebrou (Limousin sud).

La zone de Laroquebrou (Figure 33) couvre une anomalie géochimique à W bien structurée autour de la granodiorite et la présence de wolframite en alluvionnaire, malgré l'absence de gîte ou d'indice connus. L'encaissant est composé de micaschistes.

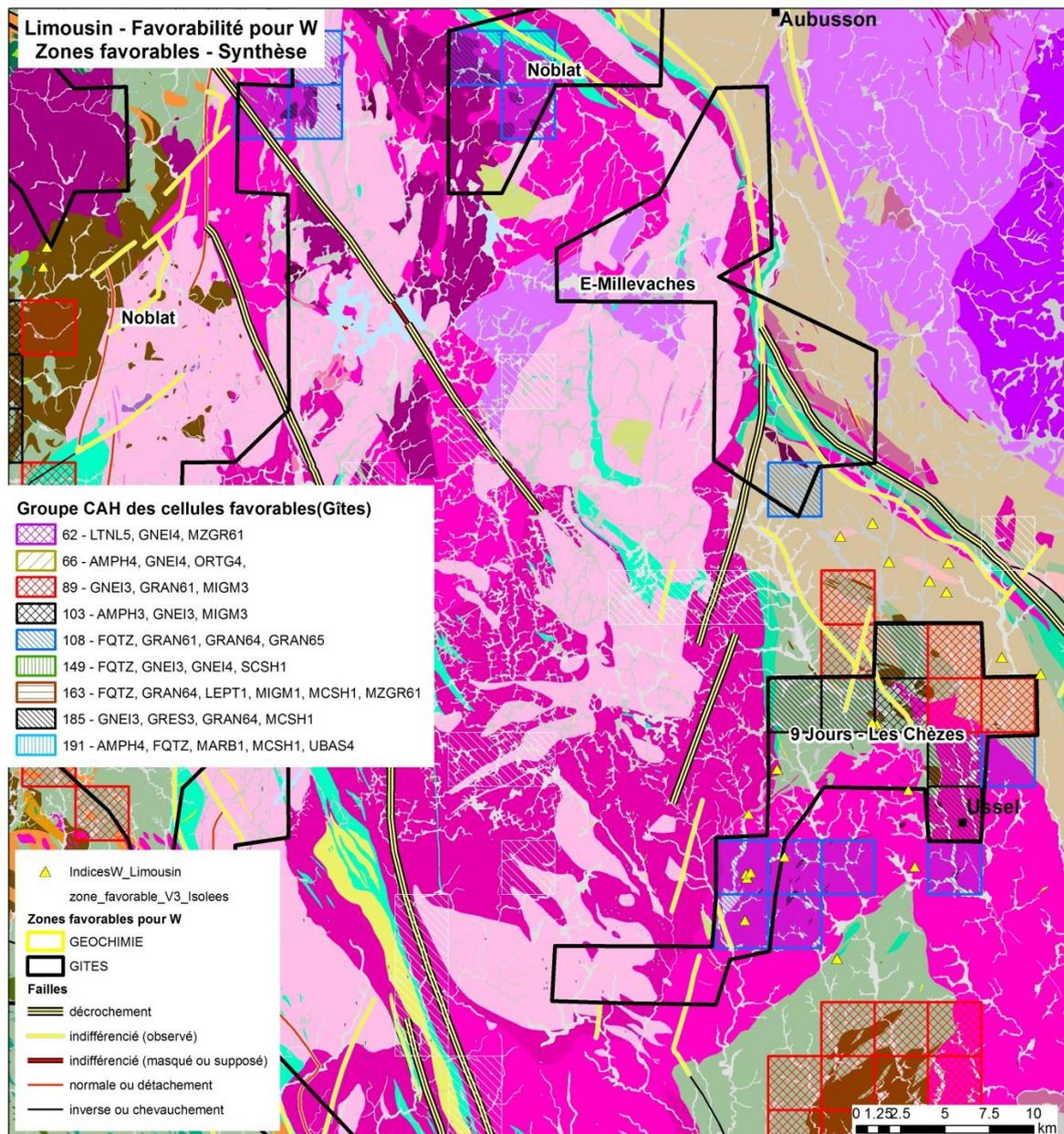


Figure 34 : Paramètres associés aux zones favorables de Neuf-Jours/Les Chèzes et E-Millevaches (Limousin centre-sud).

La zone de Neuf-Jours/Les Chèzes (Figure 34) a déjà fait l'objet de prospection avancée suite à la découverte du gîte de Neuf-Jours (FRA-00306). Plusieurs paramètres expriment sa favorabilité : anomalie géochimique (B-ANO-A1-110), présence de scheelite et wolframite en alluvionnaire, proximité de décrochement majeur et nombreux gîtes et indices connus.

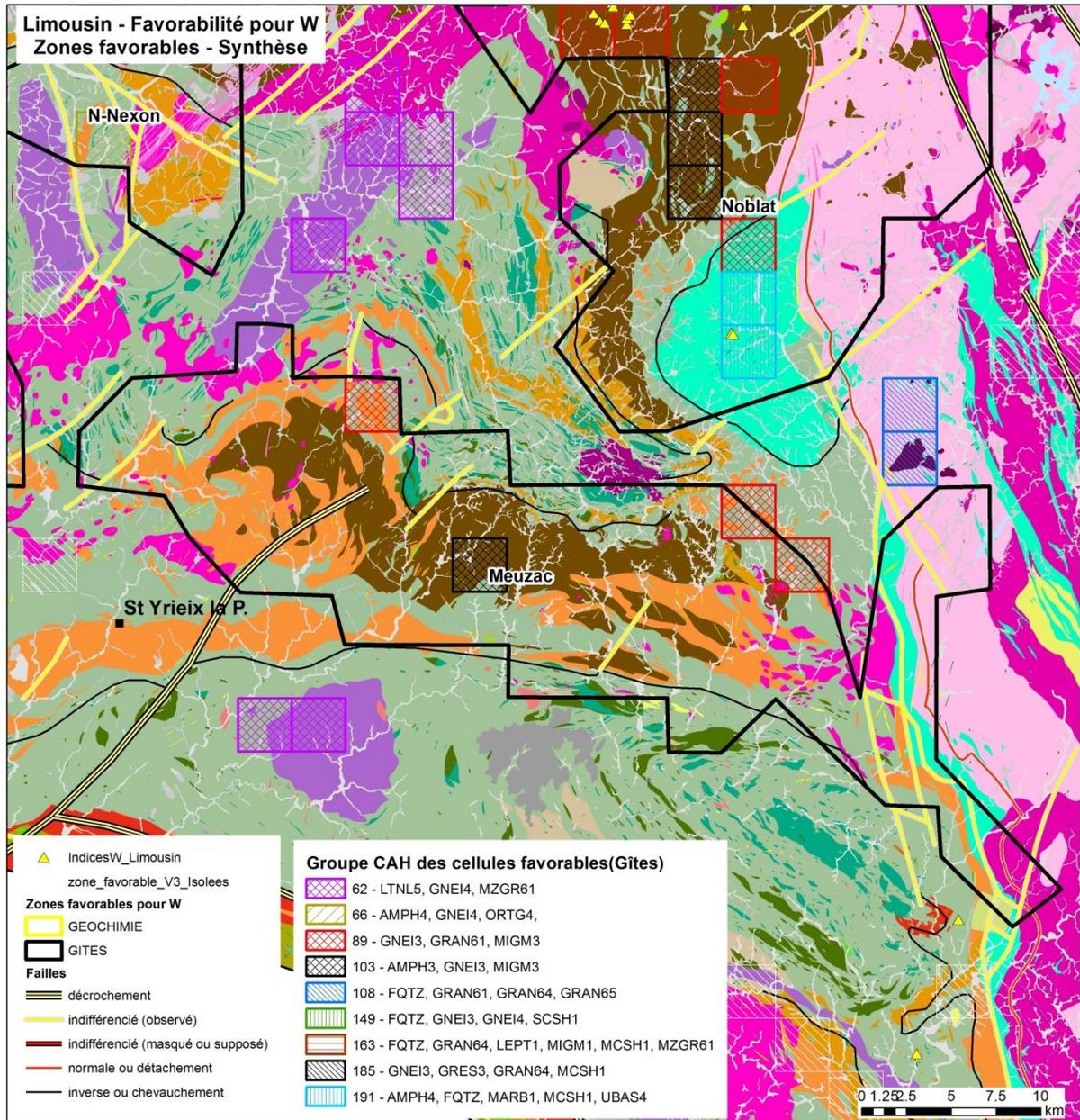


Figure 35 : Paramètres associés à la zone favorable de Meuzac (Limousin sud).

La zone de Meuzac (Figure 35), de grande étendue, est centrée sur des formations métamorphiques de hauts degrés (orthoogneiss et migmatites), et assez peu de granitoïdes. Cependant, de nombreux points de géochimie ainsi que la présence de scheelite et wolframite sont des indicateurs de la possible présence de minéralisations.

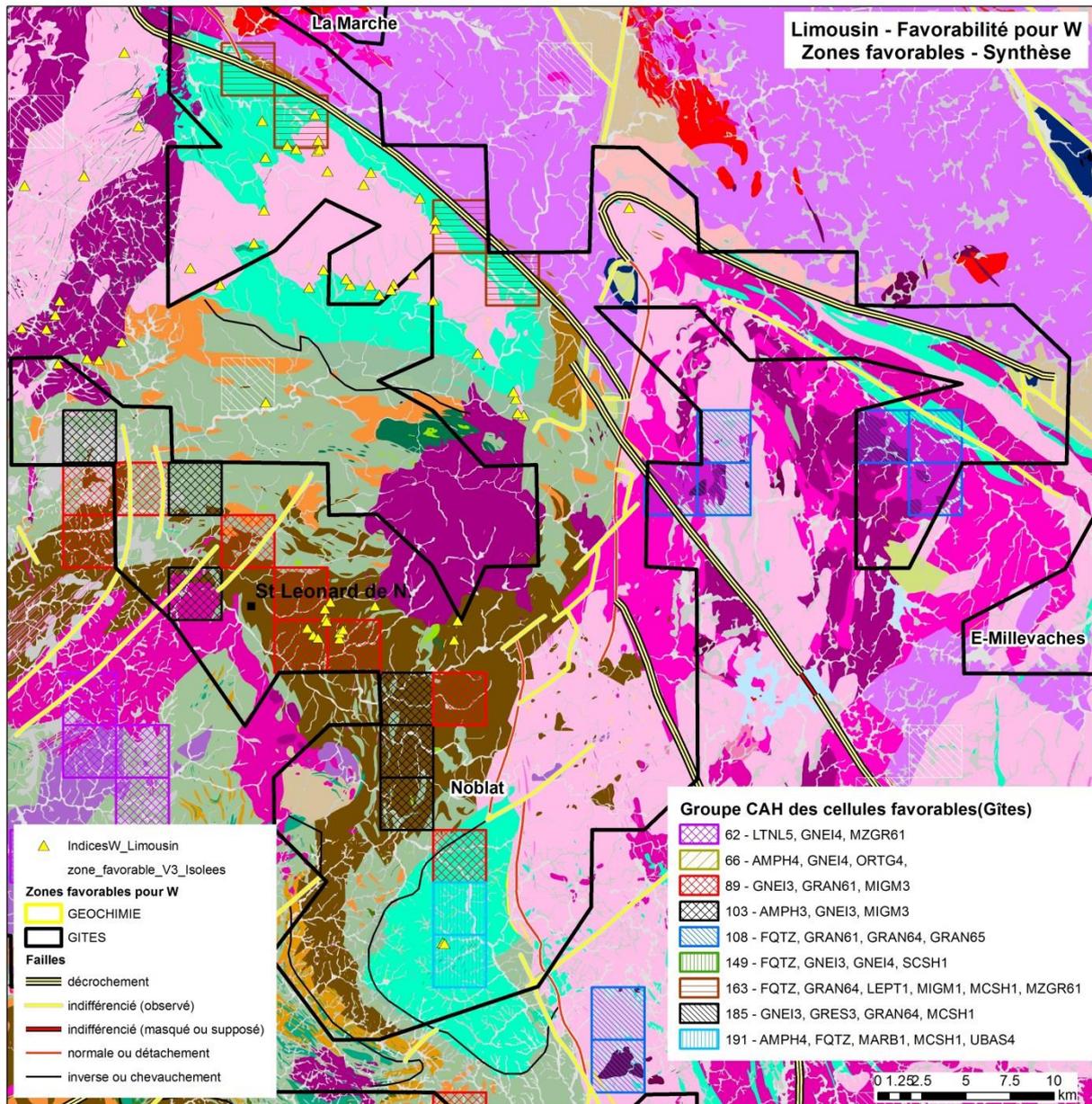


Figure 36 : Paramètres associés à la zone favorable de Noblat (Limousin centre-ouest).

La zone de Noblat (Figure 36), de forte étendue, correspond à plusieurs ensembles géologiques. Au nord, elle couvre partiellement le massif granitique de Saint-Goussaud qui porte de nombreux indices sur ses bordures. Elle se structure de plus sur de grands décrochements d'orientation générale nord-ouest - sud-est. Au sud-ouest, elle s'étend sur la bordure occidentale du Millevalches, une fenêtre de terrains para-autochtones, constitués de micaschistes et où est connu l'indice de Sussac. À l'ouest, elle couvre les formations métamorphiques de hauts degrés (gneiss et migmatites) de l'UIG, avec les nombreux indices et gîtes connus, notamment celui de Puy-les-Vignes (FRA-00061). Deux anomalies géochimiques importantes y sont définies (B-ANO-A1-13 et B-ANO-A1-14). La scheelite et la wolframite sont présentes en alluvionnaire.

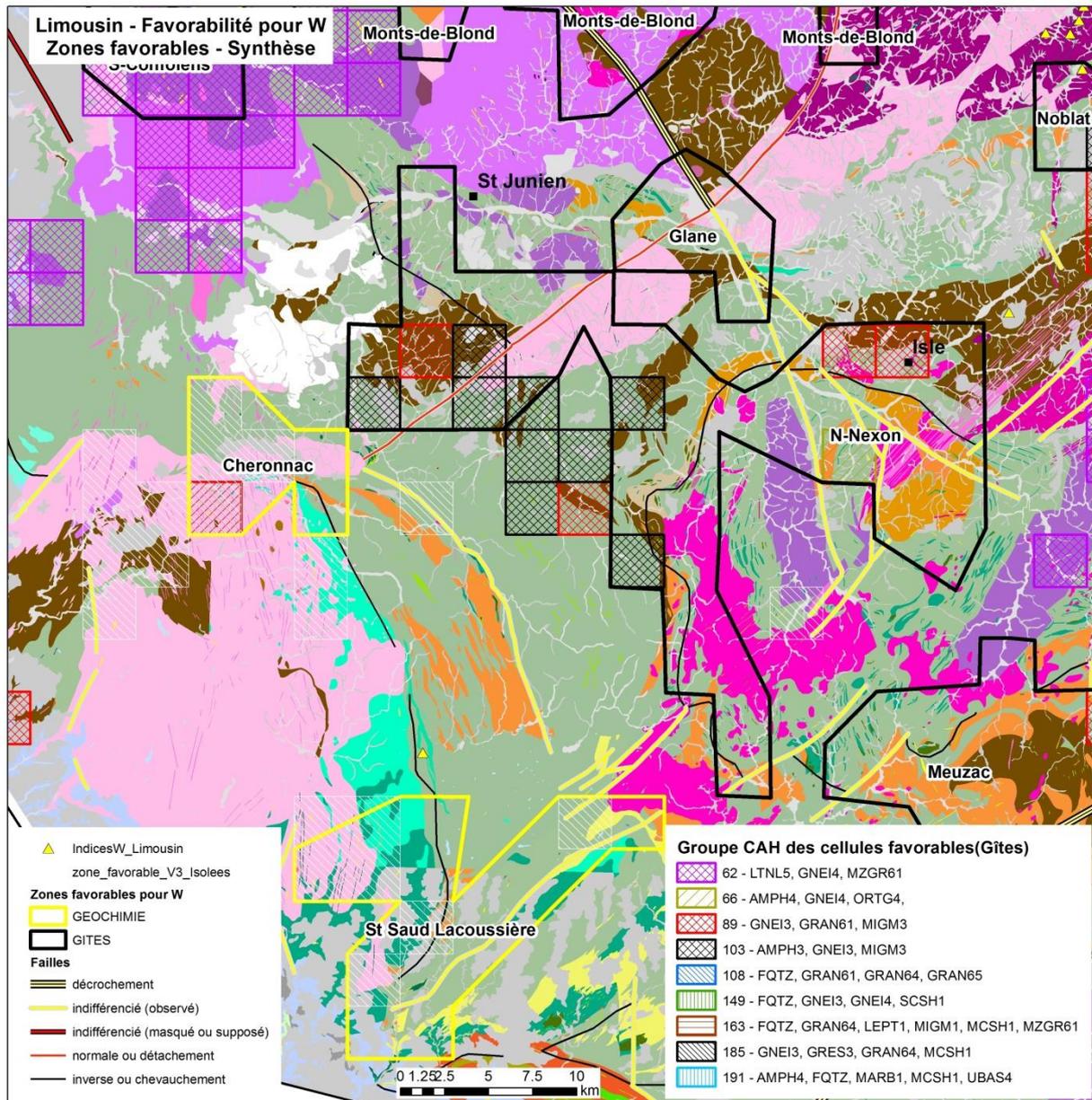


Figure 37 : Paramètres associés aux zones favorables de Saint-Saud-Lacoussière, Cheronnac et N-Nexon (Limousin sud-ouest).

La zone de Saint-Saud-Lacoussière (Figure 37), qui s'étend au sud et à l'ouest sur des terrains métamorphiques du Para-autochtone, avec des intrusions granitiques et, à l'est et au nord, sur l'UIG (leptynites, micaschistes), est définie par la présence d'une anomalie géochimique (B-ANO-A1-16) et la présence de scheelite en alluvionnaire. Aucun indice n'y est cependant connu.

La zone N-Nexon comprend des formations métamorphiques de l'USG et de l'UIG, recoupées par de nombreux granitoïdes. Elle ne comprend pas d'indices connus, mais une anomalie géochimique y a été définie (B-ANO-A1-138). La zone est cependant partiellement couverte par l'Inventaire.

La zone de Cheronnac couvre le massif granitique du même nom et son encaissant, correspondant à l'est aux formations métamorphiques du para-autochtone et au nord au gneiss de l'UIG. Aucune anomalie géochimique ou marqueurs alluvionnaires n'y sont à noter.

8. Conclusions

La partie nord-ouest du Massif Central, correspondant globalement au Limousin, a fait l'objet d'une étude de favorabilité pour la présence de gisements de tungstène. Cette province contient de nombreux gîtes et indices connus. L'objectif de cette étude est ainsi de faire ressortir des zones présentant un potentiel élevé de contenir des gîtes encore non identifiés et susceptibles de constituer des gisements économiques (« target generation »).

À partir des données disponibles - essentiellement géologiques, gîtes et indices, - le croisement de différentes techniques de prédictivité a permis de sélectionner 15 zones très favorables à la présence de gîtes à W. La prise en compte des données géochimiques permet d'ajouter 4 zones situées en périphérie des zones précédentes.

Ces zones favorables se répartissent en couronne autour du grand massif granitique de Guéret et couvrent les 3 unités métamorphiques du Limousin (UPM, UIG et USG) qui ne semblent donc pas jouer de rôle préférentiel. La plupart sont associées à la présence d'intrusions granitiques dans des environnements métamorphiques variés.

Les zones ainsi définies sont souvent de grande taille et ne sont pas très focalisées. Cette imprécision est certainement due au fait que les seuls paramètres géologiques à l'échelle de 1/50 000 ne sont pas suffisants pour obtenir des résultats plus précis pour la recherche d'objets de petite taille.

L'observation de la répartition entre indices et grands décrochements semble montrer qu'il existe une relation spatiale entre ces deux objets. Cela permet alors de focaliser des zones d'intérêt prioritaires sur les intersections entre les zones issues des traitements de prédictivité et ces grands accidents.

9. Bibliographie

- Alexandre P., Cheilletz A., Deloule E., Cuney M., 2000. Âge de cristallisation à 319 ± 7 Ma du granite de Blond (NW Limousin, Massif Central français) obtenu par datation U/Pb à la microsonde ionique sur zircons. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 330, 617-622.
- Aubert G., 1969. Les coupoles granitiques de Montebras et Échassières (Massif Central Français) et la genèse de leurs minéralisations en étain, lithium, tungstène et béryllium. *Mémoires du BRGM*, 46, 349 p.
- Audion A.S., Labbé J.F., avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS), 2012. Panorama mondial 2011 du marché du tungstène. BRGM/RP-60461-FR, 109 p., 29 fig., 17 tabl.
- Béziat P., Coulomb J.-J., 1990. Les gisements de tungstène en France. Situation en 1990. Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire, BRGM, 107 p.
- Bonham-Carter G.F., 1994. Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS. *Computer Methods in the Geosciences* 13, Pergamon, New York, 398 p.
- Brown T., Pitfield P., 2014. Tungsten. In: *Critical metals handbook* (ed. Gunn G.). Wiley, 385-413.
- Burnol L., Péronne Y., de Vaucorbeil H., 1980. La coupole cachée de leucogranite de Neuf-Jours (Corrèze) et les minéralisations en tungstène associées. *Chronique de la Recherche Minière*, 455, 96-116.
- Cerny P., Blevin P.L., Cuney M., London D., 2005. Granite-related ore deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary volume, 337-370.
- Cheilletz C., Archibald D.A., Cuney M., Charoy B., 1992. Ages $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ du leucogranite à topaze-lépidolite de Beauvoir et des pegmatites sodolithiques de Chédeville (Nord du Massif Central, France). Signification pétrologique et géodynamique. *C.R.Acad. Sc.*, Paris, 315, 329-336.
- Cuney M., Marignac C., Weisbrod A., 1992. The Beauvoir Topaz-Lepidolite Albite Granite (Massif Central, France): The disseminated Magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be Mineralization. *Economic Geology*, 87, 1766-1794.
- Cuney M., Alexandrov P., Le Carlier de Veslud C., Cheilletz A., Rimbault L., Ruffet G., Scaillet S. (2002). The timing of W-Sn-rare metals mineral deposit formation in the Western Variscan chain in their orogenic setting: the case of the Limousin area (Massif Central, France). In: *The timing and location of major ore deposits in an evolving orogen* (eds. D.J. Blundell, F. Nebauer, A. Von Quadt). *Geological Society of London Special Publication*, 204, 213-228.
- Dubuisson G., Mercier J.C., Girardeau J., Frison, J.Y., 1989. Evidence for a lost ocean in Variscan terranes of the Western Massif Central, France. *Nature*, 337, 729-732.

Faure M., Bé Mézème E., Duguet M., Cartier C., Talbot J.-Y., 2005. Paleozoic tectonic evolution of medio-Europa from the example of the French Massif Central and Massif Armoricain. *Journal of Virtual Explorer*, 19, paper 5.

Floc'h J.P., 1983. La série métamorphique du Limousin Central. Thèse, Université de Limoges, 455 p.

Harlaux M., Romer R.L., Mercadier J., Morlot C., Marignac C., Cuney M., 2017. 40 Ma years of hydrothermal W mineralization during the Variscan orogenic evolution of the French Massif Central revealed by U-Pb dating of wolframite. *Mineralium Deposita*, DOI 10.1007/s00126-017-0721-0.

Jarchovský T., 2006. The nature and genesis of greisen stocks at Krásno, Slavkowský les area – western Bohemia, Czech Republic. *Journal the Czech Geological Society*, 51, 201-215.

Lardeaux J.M., Ledru P., Daniel I., Duchene S. 2001. The Variscan French Massif Central - a new addition to the ultrahigh pressure metamorphic "club ": exhumation processes and geodynamic consequences. *Tectonophysics*, 323, 143-167.

Ledru P., Lardeaux J.-M., Santallier D., Autran A., Quenardel J.-M., Floc'h J.-P., Lerouge G., Maillet N., Marchand J., Ploquin A., 1989. Où sont les nappes dans le Massif Central français ? *Bulletin Société Géologique de France*, 5, 605-618.

Mairecolas M., 2008. L'étain en Gaule et en Europe occidentale pendant la Protohistoire et l'Antiquité. Une zone de production et de diffusion : le Limousin. Thèse Univ. Toulouse Jean Jaurès, 531 p.

Matte P., 1991. Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in western Europe. *Tectonophysics*, 196, 309-339.

Melleton J., 2008. Modalités du recyclage de la croûte continentale dans l'orogène varisque par traçage in situ des zircons hérités (mesures U-Pb/LA-ICP-MS). Thèse Université d'Orléans, 261 p.

Melleton J., Gloaguen E, Frei D., 2015. Rare-Elements (Li-Be-Ta-Sn-Nb) magmatism in the European Variscan Belt, a Review. 13th SGA Biennial meeting, Proceedings, vol. 2., 807-810.

Raimbault L., Burnol L. 1998. The Richemont rhyolite dyke Massif Central, France: a subvolcanic equivalent of rare metal granites. *The Canadian Mineralogist*, 36, 265-282.

Roig J.Y., 1997. Evolution tectono-métamorphique d'un segment de la chaîne hercynienne. Rôle du plutonisme dans la caractérisation des tectoniques du Sud-Limousin (Massif Central français). Thèse, Université d'Orléans, Orléans, 287 pp.

Romer R.L., Kroner, 2014. Sediment and weathering control on the distribution of Paleozoic magmatic tin-tungsten mineralization. *Miner. Deposita*, DOI 10.1007/s00126-014-0540-5.

Rossi P. & Pin C., 2008. Les magmatismes paléozoïques. *Géochronique*, 105, 53-56.

Rudnick R.L., Gao S., The composition of the continental crust. In: *The Crust Vol. 3, Treatise on Geochemistry*, (eds Holland, H.D., Turekian, K.K.). Elsevier-Pergamon, Oxford, United Kingdom, 1-64.

Santallier D., 1981. Les roches métamorphiques du Bas-Limousin, Massif Central (France). Thèse d'Etat, Orléans, 340 p.

Simmons S.F., Sawkins J., 1983. Mineralogic and fluid inclusion studies of the Washington Cu-Mo-W bearing breccia pipe, Sonora, Mexico. *Economic Geology*, 78, 521-526.

Sinclair W.D., 1996. Gîtes filoniens (filons, stockwerks) d'étain et de tungstène. *In* : Géologie des types de gîtes minéraux du Canada ; Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., et Thorpe, R.I. Éditeurs. Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada*, 8, p.453-465.

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

USGS, 2017. Tungsten. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2 p.

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, 43-61.

Weppe M., 1958. Contribution à l'étude des gîtes de tungstène français, Puy-les-Vignes, la Chataigneraie. *Géologie appliquée et prospection minière*, t. III, N°1, 2, 3, 196 p.

Werner A.B.T., Sinclair W.D., Amey E.B., 2014. International strategic mineral issues summary report—Tungsten. U.S. Geological Survey Circular 930—O, 74 p..

Yang K., Bodnar R.J., 2004. Orthomagmatic origin for the Iilwang Cu-W breccia-pipe deposit, southeastern Kyongsang Basin, South Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 259-270.

Annexe 1

Extrait de la convention DEB-BRGM faisant référence au travaux présentés dans ce rapport

Thème 1 - Fiche 2 - Revalorisation et réévaluation du potentiel français en ressources minérales

Tableau récapitulatif des actions de la fiche :

Action	Libellé	Correspondant
2.1	Réexamen et valorisation du patrimoine minier français (métropole) : caractérisation des cibles (fin)	G. Bertrand
2.2	Réexamen et valorisation du patrimoine minier français (métropole) : catalogue hiérarchisé des anomalies polymétalliques (suite)	D. Cassard
2.3	Réexamen et valorisation du patrimoine minier français (métropole) : promotion des districts miniers métropolitains	D. Cassard
2.4	Base de données des titres miniers M valides	C. Zammit
2.5	Informatisation de la documentation minière non publiée	J.-J. Dupuy

1.1. **ACTION 2.1 – RÉEXAMEN ET VALORISATION DU PATRIMOINE MINIER FRANÇAIS (MÉTROPOLE) : CARACTÉRISATION DES CIBLES (FIN)**

Correspondant BRGM : G. Bertrand

Correspondant DEB : D. Guillon

Contexte

Cette action s'inscrit dans le cadre du réexamen et de la valorisation du potentiel minier français engagé en 2011. Elle a été axée en 2013 et en 2014 sur la revue d'une sélection de cibles minières déjà identifiées lors de l'Inventaire national (1975-1992) ou antérieurement, pour les caractériser et affiner leur priorisation en vue d'en assurer la promotion. Elle s'inscrit dans le cadre du Contrat d'objectifs État-BRGM 2013-2017, notamment de l'objectif 3 « *Contribuer aux politiques publiques en matière de ressources minérales et de développement d'une activité minière responsable* ».

La méthodologie initiale présentée en 2012 est exhaustive mais sa mise en œuvre est relativement lourde et donc consommatrice de temps. Le concept d'une approche intermédiaire a été introduit (cf. conclusion du rapport 2012 BRGM/RP-61745-FR), entre la simple présélection de cibles, basée essentiellement sur une approche technico-économique avec prise en compte du contexte actuel (même rapport, tableau 1), et la mise en œuvre de la méthodologie dans son intégralité. Cette méthodologie dite « allégée » a été mise en œuvre en 2013. Sur les 169 cibles présélectionnées et hiérarchisées en 2012, une nouvelle sélection a été réalisée en accord avec la DGALN / Bureau des Ressources Minérales et ce sont finalement 99 cibles qui ont été retenues. Sur ce total, 27 cibles ont été étudiées en 2013, puis 38 en 2014.

Une partie du budget 2013 a été utilisée pour retraiter la géochimie stream de l'Inventaire afin de pouvoir caractériser le potentiel de développement des cibles (estimé notamment sur la présence d'anomalie(s) à proximité). Il est à noter que cet important travail de retraitement de la géochimie stream est aussi valorisé dans le cadre de l'action intitulée "Anomalies polymétalliques"

En 2015, l'action portera sur la poursuite et la finalisation de ce travail. Ce sont donc les 34 cibles restantes qui seront étudiées.

Actions à mener par le BRGM

1) Préparation des 34 fiches "2015" :

- Les rubriques des fiches techniques établies ont évolué courant 2013 (voir rapport intermédiaire BRGM/RP-62501-FR de juillet 2013). Elles s'établissent dorénavant comme suit :
- **Id** : numéro d'identifiant de la cible extrait de la base ProMine³ - BRGM ;
- **Nom** : nom usuel de la cible ;
- **Substances** : classées par ordre d'importance décroissante ;
- **Priorité initiale** : telle qu'attribuée dans le rapport BRGM RP-51422-FR ;
- **Département** : numéro du département où se situe la cible ;
- **Région** : acronyme de la région où se situe la cible (LRO pour Languedoc-Roussillon, MPY pour Midi-Pyrénées, etc.) ;
- **Long.** : longitude géographique de la cible ;
- **Lat.** : latitude géographique de la cible ;
- **N° carte géologique à 1/50 000** : sera renseigné lors de la consolidation du SIG national ;
- **Historique du titre minier** : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Statut actuel du titre minier** : renseignement fourni par le Bureau des Ressources Minérales ;
- **Typologie du gisement** : extraite de la base ProMine - BRGM ;
- **Contexte géologique** : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Dates d'exploitation** : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Tonnages exploités, ressources en place et teneurs** : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Criticité des substances** : d'après la nature des substances connues comparée aux listes de substances classées comme critiques d'abord par le COMES et sinon par la Commission européenne ;
- **Potentialités en métaux rares** : d'après les recherches bibliographiques et la nature du minerai (un minerai à zinc contient potentiellement du germanium et de l'indium qui n'ont pas été forcément dosés ou même recherchés) ;
- **Existence d'une filière de transformation** : filière française ou européenne, complète ou incomplète, d'après les recherches bibliographiques ;
- **Potentiel de développement** : déduit de l'interprétation de la géochimie Inventaire réalisée au cours de cette étude (*cf. supra*) ;
- **Origine de la découverte** : Anciens travaux, prospection marteau, anomalie géochimique ou géophysique : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Degré de connaissance** : codé suivant les travaux d'exploration réalisés : 1 : anomalie géochimique ou géophysique, 2 : cible explorée par sondages uniquement percutants, 3 : cible explorée par sondages carottés, 4 : cible explorée par travaux de

³ La base de données ProMine – BRGM est une base de données des gisements et indices européens, conçue et développée par le BRGM, et intégrée dans le Projet européen ProMine.

subsurface (tranchées, excavations, petits puits) et sondages carottés, 5 : cible explorée par travaux miniers souterrains et sondages carottés ;

- **Prospection géochimique régionale** : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Prospection géophysique régionale** : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Sondages percutants et/ou carottés** : d'après les recherches bibliographiques : estimation la plus précise possible, sinon nombre minimum de sondages réalisés avec estimation du métrage total minimum si possible ;
- **Tranchées, tarières, travaux miniers (TMS)** : d'après les recherches bibliographiques : estimation la plus précise possible, sinon nombre minimum d'ouvrages réalisés avec estimation du métrage total minimum si possible ;
- **Tests minéralurgiques** : d'après les recherches bibliographiques ;
- **Documentation disponible** avec alimentation de la couche de métadonnées du SIG qui devra fournir de manière opérationnelle la liste des documents (de l'Inventaire et hors-Inventaire) disponibles sur le secteur. Dans la mesure du possible, les documents papiers importants seront scannés [cf. action 2.5. de numérisation de la documentation minière non publiée] et enregistrés au format PDF pour pouvoir être mis à disposition du public via un site internet) ;
- **Enjeux environnementaux** : utilisation du SIG national avec les compléments et mises à jour nécessaires ;
- **Contraintes liées à l'urbanisation et aux infrastructures** : utilisation du SIG national avec les compléments et mises à jour nécessaires ;
- **Réévaluation de la priorité initiale** : sur la base des éléments précédents.

2) Rédaction de fiches promotionnelles :

Les fiches techniques relatives aux cibles pourront être accompagnées de fiches ou documents dédiés (notamment) aux élus locaux avec présentation des objectifs, de la méthode mise en œuvre et donnant des éléments techniques simplifiés. En d'autres termes, il s'agit de créer un support de communication et de fournir des éléments de langage. Le nombre et le format de ces documents dits "fiches promotionnelles", n'est pas arrêté, et sera discuté en cours de projet avec le Bureau des Ressources Minérales.

3) Alimentation du SIG national.

Produits de sortie

Les produits de sortie seront :

- un rapport final sur cette action qui se sera étalée sur trois années, avec la totalité des fiches techniques réalisées ;
- des fiches promotionnelles sur un certain nombre de cibles. Le format exact de ces fiches devra être défini début 2015 et leur nombre précisé dès que possible.

De plus, toute la documentation consultée lors de cette étude (lien avec l'action de numérisation de la documentation minière non publiée) viendra alimenter le SIG national (couche « Métadonnées ») dont le développement a été entrepris dans le cadre de l'action 2012.

1.2. **ACTION 2.2 – RÉEXAMEN ET VALORISATION DU PATRIMOINE MINIER FRANÇAIS (MÉTROPOLE) : CATALOGUE HIÉRARCHISÉ DES ANOMALIES POLYMÉTALLIQUES (SUITE)**

Correspondant BRGM : D. Cassard

Correspondant DEB : D. Guillon

Contexte

Dans le cadre du réexamen et de la valorisation du potentiel minier français engagés en 2011, **il s'agit de s'assurer, avec la prise en compte des résultats des stades initiaux de l'Inventaire minier, que tout a été mis complètement en œuvre pour localiser et caractériser les ressources minérales métalliques primaires en France.**

L'action 2.1 des programmes 2013-2014 (et 2015, voir ci-dessus) passe en revue une série de cibles minières sélectionnées pour les caractériser et affiner leur priorisation en vue d'en assurer la promotion. Parallèlement, le retraitement des données de géochimie "stream sediment" issues de l'Inventaire minier a permis d'élaborer des cartes d'anomalies polymétalliques. Ces cartes et les autres indices situés à proximité permettent d'estimer le potentiel de développement de ces cibles.

Cette action s'inscrit dans le cadre du Contrat d'objectifs État-BRGM 2013-2017, notamment de l'objectif 3 « *Contribuer aux politiques publiques en matière de ressources minérales et de développement d'une activité minière responsable* ».

Cette action vise à constituer **un catalogue d'anomalies métalliques hiérarchisées** basé sur une approche métallogénique actualisée (les substances/modèles à rechercher ont beaucoup évolué depuis les années 80) prenant en compte l'intégralité des données de l'Inventaire.

Compte tenu des objectifs affichés, cette action se place **en amont** du travail en cours (Action 2.1 des programmes 2013-2015) qu'elle viendra utilement compléter et renforcer.

Les fiches techniques de cibles minières dont l'élaboration a débuté en 2013 comportent une rubrique intitulée "Potentiel de développement". Celui-ci est estimé sur la présence (i) d'anomalies géochimiques et (ii) d'autres indices plus ou moins proches de la cible. Les cartes d'anomalies géochimie-stream ont été réalisées globalement sur l'ensemble des zones couvertes par l'Inventaire (cf. Rapport Intermédiaire BRGM/RP-62501-FR, 2013), mais le traitement des données s'est focalisé (jusqu'en 2013) sur la recherche des anomalies polymétalliques les plus significatives et situées à proximité des cibles minières étudiées. **En d'autres termes, il n'y a pas eu de revue systématique (et de caractérisation) des anomalies, qui est le propos de cette action.**

La classification de ces anomalies par classification ascendante hiérarchique (CAH, également appelée Cluster Analysis) a permis de déterminer des contextes métallogéniques pertinents. Un premier examen des anomalies fait apparaître plusieurs situations potentiellement intéressantes :

- 1 - Certaines anomalies ne contiennent pas d'indices/occurrences connus. Leur potentiel reste largement inconnu.
- 2 - Certaines anomalies renferment des indices mais leurs extension est parfois largement supérieure à la zone définie par les indices. Il y a possibilité de découverte.
- 3 - Il existe un "décalage" entre la paragenèse des indices contenus et la signature *a priori* attendue de l'anomalie polymétallique.

4 - Absence d'anomalie alors que des indices existent : ceci peut correspondre à deux situations : (i) zones non couvertes par l'Inventaire minier ou (ii) absence totale de signature anormale. Dans le premier cas, et en fonction de l'intérêt des indices, la question d'un éventuel échantillonnage à caractère local pourra alors se poser. Dans le deuxième cas, une reconnaissance géologique pourrait être envisagée si les indices semblent intéressants (priorité secondaire).

Pour juger de la favorabilité de certaines de ces situations, il devient indispensable de replacer les cibles et les indices dans leur contexte géologique, géodynamique et métallogénique en intégrant, lorsqu'elles sont disponibles, des données de géophysique. Il pourra s'avérer également nécessaire de sélectionner certains échantillons prélevés lors de l'Inventaire (selon une méthode statistique) afin de les ré-analyser.

Des étapes de concertation avec le BRM sont prévues afin d'évaluer le degré d'avancement des catalogues et la hiérarchisation des anomalies.

La tâche d'intégration des données géophysiques mobilisera les données existantes de gravimétrie, aéromagnétisme et radiométrie (principalement Massif armoricain et Morvan ; Limousin à évaluer).

Actions à mener par le BRGM

- ❶ Poursuite de la constitution du **catalogue INI + METALGEOD** : poursuite et fin des études métallogéniques et géodynamiques démarrées en 2014 ;
- ❷ Poursuite de la constitution du **catalogue INI + METALGEOD + GEOPH** : poursuite des traitements géophysiques et de la caractérisation des anomalies démarrées en 2014 ;
- ❸ Phases de concertation ;
- ❹ Eventuels contrôles de terrain (à n'envisager probablement qu'en 2016, sur une sélection d'anomalies mal connues ou mal comprises et à possible fort potentiel).

1.3. ACTION 2.3 – RÉEXAMEN ET VALORISATION DU PATRIMOINE MINIER FRANÇAIS (MÉTROPOLE) : PROMOTION DES DISTRICTS MINIERS MÉTROPOLITAINS

Correspondant BRGM : D. Cassard

Correspondant DEB : D. Guillon

Contexte

Les fiches techniques de cibles minières produites dans le cadre de l'Action 2.1 sont factuelles, basées sur l'exhumation et l'exploitation systématique des données de l'Inventaire et notamment de la géochimie (réinterprétée). Leur objectif est d'estimer le potentiel de développement des cibles étudiées et de réévaluer leur priorité. Elles ont indéniablement un aspect « catalogue » et le manque de mise en perspective est évident.

*L'idée présentée pour cette nouvelle action, serait finalement de revenir, au moins pro parte, à ce qui était suggéré en 2012 dans le rapport " Réévaluation du potentiel français en ressources minérales. Elaboration d'une méthodologie et application à une zone test (sud-ouest du Massif Central)" BRGM/RP-61745-FR, avec **autre ce qui est fait actuellement (et qui est poursuivi***

dans le cadre de l'action 2.1), une approche "district" (i) prenant en compte la géologie et la métallogénie régionale, l'apport de la géophysique lorsqu'elle est disponible, (ii) développant une réflexion sur le potentiel, et (iii) établissant une comparaison avec les autres gisements/districts mondiaux du même type. En d'autres termes, élaborer un document attrayant à l'attention des Professionnels et donc d'un solide niveau technique.

Cette action s'inscrit dans le cadre du Contrat d'objectifs État-BRGM 2013-2017, notamment de l'objectif 3 « *Contribuer aux politiques publiques en matière de ressources minérales et de développement d'une activité minière responsable* ».

Pour pallier cet aspect catalogue et le manque de perspective, il est proposé, dès que les fiches techniques relatives à une substance dans une région (e.g., Sb dans le Massif Armoricaïn) sont prêtes (fiches Rosnoen [29], La Coëfferie [35], [Stival [56], La Télachère [85], Les Brouzils [85], La Baussonnière [85]), d'engager la rédaction de "mini" monographies (de 10 à 20 pages environ en fonction de la richesse et de la complexité du sujet) par districts (e.g., la Pointe bretonne, la Bretagne centrale, la Vendée), avec prise en compte de tous les autres gîtes existants. Les fiches seraient alors placées en annexe de la monographie, en quelque sorte "enchâssées" ("embedded" comme disent les Anglo-Saxons), ce qui permettrait de leur donner une toute autre valeur.

Un exemple de monographie pourrait être le tungstène dans le SW du Massif Central traité dans le rapport 2012 cité précédemment.

Le choix des monographies à rédiger sera décidé en concertation avec le Comité de suivi, de manière à coller au mieux à l'actualité minière en France. Idéalement, il faudrait que 4 à 5 monographies par an soient rédigées et publiées de manière à ce que l'action promotionnelle soit visible et qu'elle ait un réel impact.

Les données acquises dans ce cadre et les traitements viendront alimenter le SIG "National". Les monographies seront mises en ligne sur MinerallInfo et téléchargeables. Elles feront l'objet d'une publicité lors de leur publication sur le Web (cf. Rapport final Action 2.1 pour 2013).

Actions à mener par le BRGM

- ❶ Choix des régions et des districts à traiter en fonction des fiches techniques de cibles minières déjà réalisées ;
- ❷ Présentation des choix au Comité de suivi ;
- ❸ Constitution des équipes pour la rédaction des monographies. 2 à 3 monographies devraient être mises en chantier en 2015. En fonction des personnels disponibles, plusieurs monographies devraient pouvoir être réalisées en parallèle. En fonction de la complexité du sujet, de la substance, de la qualité et du nombre des données (cf. supra) une monographie pourra associer un métallogéniste, un expert en traitement des données et prédictivité et un économiste des ressources minérales ;
- ❹ Présentation des monographies au Comité de suivi ;
- ❺ Dès la présentation des monographies au Comité de suivi, elles seront mises en ligne sur MinerallInfo, mise en ligne accompagnée d'une publicité annonçant leur publication.

Produits de sortie

Cette action, pour couvrir l'ensemble du territoire, devrait se dérouler sur deux années. Chaque monographie comprendrait :

- 1) Une présentation du contexte géologique régional ;
- 2) Un rappel historique sur la production minière de la région ou du district ;
- 3) Une présentation de la métallogénie régionale pour la substance considérée, accompagnée d'une description des types métallogéniques rencontrés avec des cartes et des coupes (en fonction des documents disponibles) ;
- 4) La présentation et l'intégration des données géophysiques disponibles et exploitables (synergie à exploiter avec l'action 2.2 du programme 2014-2015) ;
- 5) Une ou plusieurs études de prédictivité, en fonction de l'étendue géographique de la zone, du nombre⁴ et de la distribution spatiale des minéralisations et de l'homogénéité des typologies ;
- 6) Une courte synthèse relative aux gisements/districts mondiaux de même typologie afin de pouvoir établir des comparaisons ;
- 7) Une conclusion résumant les points forts du "district" (promotion !) ;
- 8) Les références bibliographiques incontournables (avec les liens pour le téléchargement lorsque cela est possible) ;
- 9) Une annexe commune (et assez succincte) relative aux traitements de prédictivité mis en œuvre (Index Overlay [méthode "classique" BRGM], Weight of Evidence, CBA [Cell-Based Association, nouvelle méthode développée au BRGM et testée de manière fructueuse dans le rapport 2012], DBQ pour les métaux critiques [Database Querying, nouvelle méthode BRGM développée dans le cadre du projet EU-FP7 ProMine]...) afin que le lecteur puisse juger du sérieux des cartes de favorabilité et de la façon dont elles ont été établies.

⁴ Le nombre des minéralisations existantes est important puisqu'elles servent de set d'apprentissage dans nombre de méthodes de prédictivité. L'homogénéité des typologies de minéralisations est également un critère important : on cherche à prédire un phénomène minéralisateur qui est contrôlé par la lithologie ou la lithostratigraphie et/ou le magmatisme, le volcanisme et/ou les structures et/ou la géodynamique... Mélanger, souvent par manque d'informations fiables, des types de minéralisations ayant des contrôles différents, conduit généralement à des interprétations très critiquables voire totalement erronées.

Annexe 2

Fiches descriptives des sujets miniers correspondant à des gîtes de tungstène du Limousin (Action 2.1 de la convention DEB-BRGM)



Réexamen et valorisation du patrimoine minier métropolitain



Fiche de sujet minier

Nom : Neuf-Jours

Identifiant ⁽¹⁾ : FRA-00306

Région : Limousin

Département : Corrèze (19)

Coordonnées ⁽²⁾ : Long. = 2,2424° Lat. = 45,5991°

Dernière mise à jour : Décembre 2013



Substance(s) principale(s) ⁽³⁾ : W, Mo, Sn

Historique du titre minier : Permis de recherche SNEA(P) expiré

Statut actuel du titre minier ⁽⁴⁾ : Libre, pas d'instruction en cours

Contexte géologique sommaire :

Le gisement est encaissé dans des gneiss à biotite-sillimanite bordés au sud par le massif granitique de Meymac, au nord-ouest par un contact faillé avec des micaschistes, au nord-est par des anatexites à cordiérite

Typologie du gisement :

Deux types : dissémination dans le greisen de la coupole granitique et filons recoupant les gneiss encaissants

Dates d'exploitation : Non (prospect)

Criticité des substances ⁽⁵⁾ : W critique (COMES - UE)

Tonnages exploités – ressources et teneurs : Potentiel estimé pour la coupole à 500 000 t de minerai à environ 0,5 % WO₃ soit environs 2500 t WO₃

Potentialités en métaux rares : In, Sc ?

Existence d'une filière de transformation ⁽⁶⁾ : Filière française incomplète (notamment amont) et européenne complète pour W.

Origine de la découverte ⁽⁷⁾ :

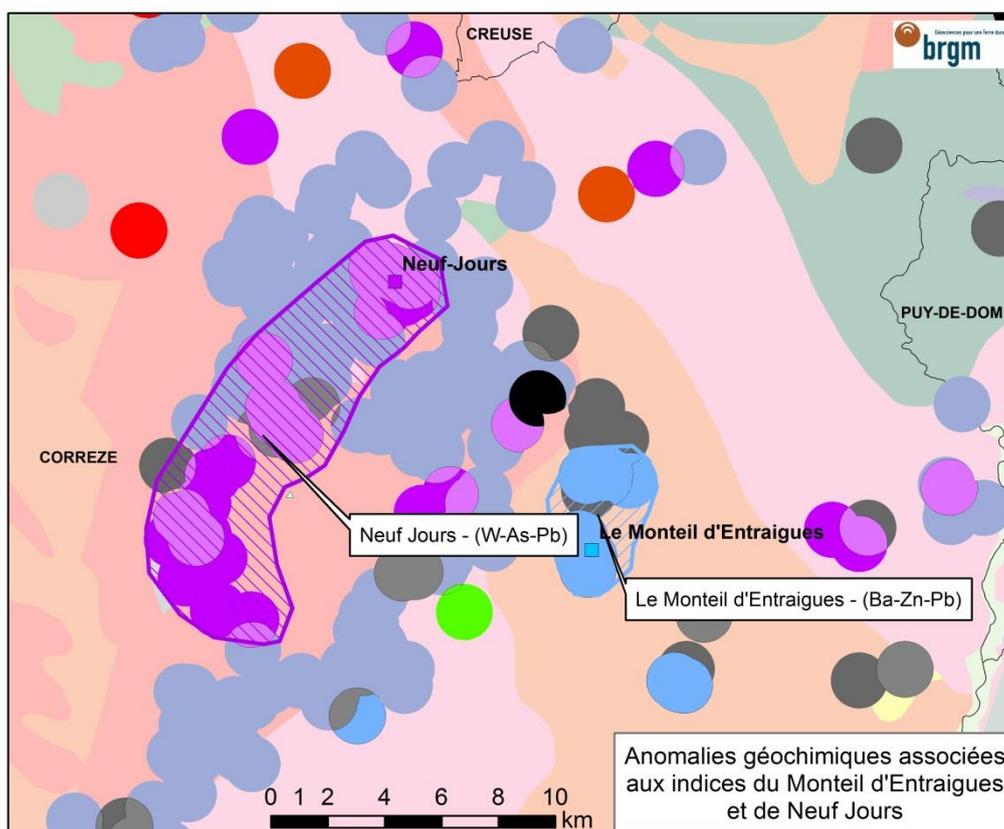
Indices de minéralisations en W, Bi, Sn et Mo découverts au XVIIIème s. Prospection BRGM géochimique, alluvionnaire et géophysique tactique

Degré de connaissance : 3

- **Prospection géochimique régionale** : Inventaire BRGM
- **Prospection géophysique régionale** : Localement : essais géophysiques (gravimétrie, magnétisme, électromagnétisme VLF, résistivité, polarisation provoquée)
- **Sondages percutants et/ou carottés** : 103 sondages percutants (3254 m) et 5 sondages carottés (644,45 m)
- **Tranchées, tarières, travaux miniers (TMS)** : 7 tranchées pour un total de 405 m
- **Tests minéralurgiques** : Non

Potentiel de développement ⁽⁸⁾ :

Des données issues de la prospection géophysique par polarisation provoquée laissent envisager la présence d'autres coupoles au NNO.



Enjeux environnementaux :

Parc naturel régional de Millevaches en Limousin

Contraintes liées à l'urbanisation :

Zone rurale sans habitations ou infrastructures importantes à moins d'un km

Documentation disponible ⁽⁹⁾ :

Benaouda N. (1982). Greisenisation dans la coupole aveugle de Neuf-Jours (Corrèze, Massif Central français). Thèse 3ème cycle, Paris, 145 p.

Besse A., Ezanno P., Lambolez B. (1979). Essais géophysiques méthodologiques sur le batholithe de microgranite greisenisé de Neufs-Jours (près Meymac. Corrèze). Polarisation provoquée et résistivité. BRGM, 79 SGN 778 GPH.

Béziat P., Coulomb J.-J., Gentilhomme P., Gramont (de) X. (1990). Les gisements de tungstène en France. Situation en 1990. BRGM, 107 p.

Burnol L., Peronne Y., Vaucorbeil (de) H. (1980). La coupole cachée de leucogranite de Neufs-Jours (Corrèze) et les minéralisations en tungstène associées. N° spécial Chroniques de la Recherche Minière, 455, p. 96-116.

Burnol L., Vaucorbeil (de) H. (1980). Inventaire du territoire métropolitain. Découverte et prospection du gîte de tungstène de Neuf-Jour. 1975-1979. BRGM, 80 RDM 044 FE, 36 p. + annexes

Ceaux J.-L., Recoing M. (1977). Prospection pour tungstène de Neuf-Jours et d'Aix-Montaserre (Corrèze). BRGM, DL Clermont n°266.

Mennechet C., Madelaine B. (1978). Essais géophysiques au lieu-dit "Ferme de Neuf-Jours" (Corrèze). Gravimétrie. Résistivité. Magnétisme. VLF. BRGM, 78 GPH 010, 7 p.

Réévaluation de la priorité initiale ⁽¹⁰⁾ :

Priorité initiale

2

→

Priorité réévaluée

2

⁽¹⁾ – Dans la base de données SIG Mines France (<http://sigminesfrance.brgm.fr>)

⁽²⁾ – Degrés décimaux (WGS84)

⁽³⁾ – Classées par ordre d'importance décroissant

⁽⁴⁾ – D'après DGALN/DEB/BRM

Méthodes prédictives appliquées à la province à tungstène du Limousin (Massif central)

- ⁽⁵⁾ – Sur la base des travaux du COMES et de l'UE
- ⁽⁶⁾ – Française, complète ou incomplète, européenne
- ⁽⁷⁾ – Anomalie géochimique/géophysique, prospection marteau, ...
- ⁽⁸⁾ – Estimation basée notamment sur la réinterprétation de la géochimie de l'Inventaire
- ⁽⁹⁾ – Accessible au public
- ⁽¹⁰⁾ – D'après le rapport BRGM/RP-61745-FR, sur une échelle à 3 niveaux



Réexamen et valorisation du patrimoine minier métropolitain



Fiche de sujet minier

Nom : Pinardeau

Identifiant ⁽¹⁾ : FRA-00312

Région : Poitou-Charentes

Département : Charente (16)

Coordonnées ⁽²⁾ : Long. = 0,6362° Lat. = 46,0768°

Dernière mise à jour : Novembre 2015



Substance(s) principale(s) ⁽³⁾ : W, Mo

Historique du titre minier : PER Syndicat BRGM - Entreprise Gagneraud attribué en 1985

Statut actuel du titre minier ⁽⁴⁾ : Périmé en 1988

Contexte géologique sommaire :

Le prospect est compris dans une zone caractérisée par la présence de de massifs granitiques calco-alcalins à alcalins, mis en place dans des intrusions plus basiques (granodiorite) et des gneiss.

Typologie du gisement :

Greisen à W

Dates d'exploitation : Non

Criticité des substances ⁽⁵⁾ : W critique (COMES - UE); Mo stratégique

Tonnages exploités – ressources et teneurs : 1 brèche quartzeuse a montré dans une tranchée des teneurs de 2,12 % WO₃. Les forages n'ont montré qu'une teneur maximale de 0,19 % WO₃ (S3 du Monta) sur 3,55 m. Une tranchée a recoupé une teneur de 1,26 % WO₃ sur 4 m.

Potentialités en métaux rares : In, Sc

Existence d'une filière de transformation ⁽⁶⁾ : Filière française incomplète (notamment amont) et européenne complète pour W.

Origine de la découverte ⁽⁷⁾ :

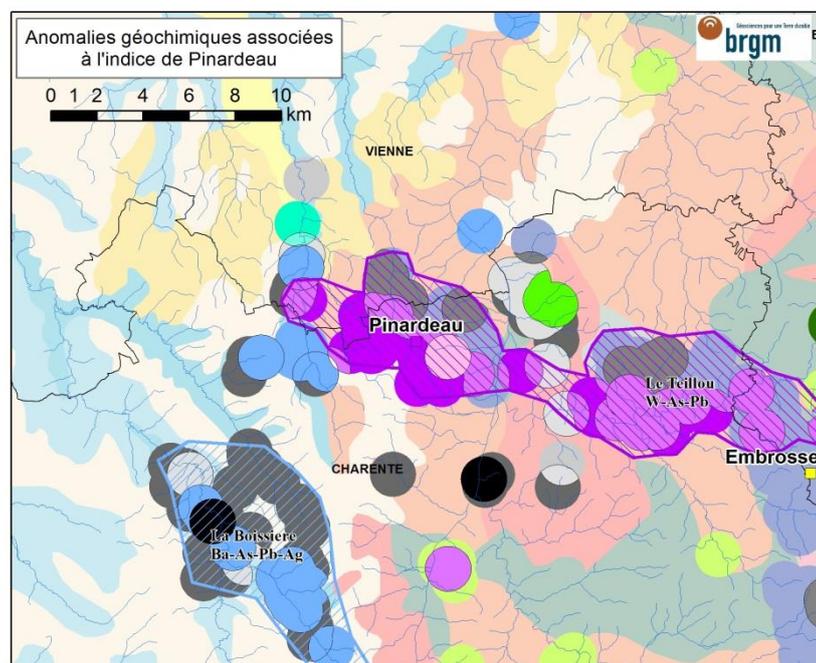
Anomalie géochimique de la prospection stratégique de l'Inventaire (1978-1979)

Degré de connaissance : 3

- **Prospection géochimique régionale** : Prospection géochimique stratégique de l'Inventaire (1978-1979; 3 ech. au km²; feuille de Confolens et de l'Isle-Jourdain). Prospection géochimique sol 200 m x 200 m puis 50 m x 50 m. Prospection éluvionnaire (1985) à la maille de 50 m x 20 m.
- **Prospection géophysique régionale** : Gravimétrie (carte 1/80000 de Confolens).
- **Sondages percutants et/ou carottés** : 37 sondages percutants (total cumulé de 1830,90 m). Un sondage carotté hydrophore (45 m) puis 5 autres pour une longueur totale de 601,35 m.
- **Tranchées, tarières, travaux miniers (TMS)** : Réalisation de 14 profils géochimiques à la tarière (bed-rock). 2 tranchées de 49 et 50 mètres.
- **Tests minéralurgiques** : Non

Potentiel de développement ⁽⁸⁾ :

L'indice de Pinardeau est inclus dans une large anomalie géochimique régionale à W. Les teneurs rencontrées en sondage restent faibles (<0,2 % WO₃) mais les travaux de reconnaissance n'ont pas été assez développés pour juger de l'intérêt minier de ce prospect. Les travaux se sont en effet arrêtés à la suite de la chute des cours du tungstène du milieu des années 80. Des tranchées supplémentaires permettraient de contrôler les structures minéralisées, alors que la réalisation de sondages à maille reserrée apporterait une meilleure caractérisation des limites des concentrations. La présence de petits métaux associés (In et Sc) n'a pas été recherchée.



Enjeux environnementaux :

Pas d'enjeux particuliers identifiés.

Contraintes liées à l'urbanisation :

Très faible densité d'habitation (exploitations agricoles); champs cultivés et forêts.

Documentation disponible ⁽⁹⁾ :

Amblard J.L., Degay J.C., de Vaucorbeil H. (1983). Découverte et prospection du gîte de tungstène de Pinardeau - Pierre Bergère (Charente). 1980-1982. BRGM, 83-RDM-025-FE, 110 pp.

Réévaluation de la priorité initiale ⁽¹⁰⁾ :

Priorité initiale

3

→

Priorité réévaluée

3

⁽¹⁾ – Dans la base de données SIG Mines France (<http://sigminesfrance.brgm.fr>)

⁽²⁾ – Degrés décimaux (WGS84)

⁽³⁾ – Classées par ordre d'importance décroissant

⁽⁴⁾ – D'après DGALN/DEB/BRM

⁽⁵⁾ – Sur la base des travaux du COMES et de l'UE

⁽⁶⁾ – Française, complète ou incomplète, européenne

⁽⁷⁾ – Anomalie géochimique/géophysique, prospection marteau, ...

⁽⁸⁾ – Estimation basée notamment sur la réinterprétation de la géochimie de l'Inventaire

⁽⁹⁾ – Accessible au public

⁽¹⁰⁾ – D'après le rapport BRGM/RP-61745-FR, sur une échelle à 3 niveaux



Réexamen et valorisation du patrimoine minier métropolitain

Fiche de sujet minier



Nom : Puy-les-Vignes

Identifiant ⁽¹⁾ : FRA-00061

Région : Limousin

Département : Haute-Vienne (87)

Coordonnées ⁽²⁾ : Long. = 1,5310° Lat. = 45,8263°

Dernière mise à jour : Décembre 2013



Substance(s) principale(s) ⁽³⁾ : W, Sn

Historique du titre minier : Concession minière historique instituée le 25/04/1863

Statut actuel du titre minier ⁽⁴⁾ : Non libre (péremption au 31/12/2018)

Contexte géologique sommaire :

Le gisement se présente sous la forme d'une "cheminée" bréchique, de la forme d'une ellipse de 340 x 80 m. Cette structure verticale recoupe l'unité de Saint-Léonard-de-Noblat, constituée essentiellement de gneiss à sillimanite, orthose et muscovite pouvant aller localement jusqu'à l'anatexie .

Typologie du gisement :

Filons et stockwercks ("greisen") granitiques et péri-granitiques

Dates d'exploitation : Oui. Concession accordée en 1863. Exploitation jusqu'en 1957, avec une interruption entre 1920 et 1938.

Criticité des substances ⁽⁵⁾ : W critique (COMES - UE)

Tonnages exploités – ressources et teneurs : 4000 t WO₃. Réserves estimées sont d'au moins 386 000 t à 0,3 % WO₃ soit 1158 t WO₃

Potentialités en métaux rares : In, Sc ?

Existence d'une filière de transformation ⁽⁶⁾ : Filière française incomplète (notamment amont) et européenne complète pour W.

Origine de la découverte ⁽⁷⁾ :

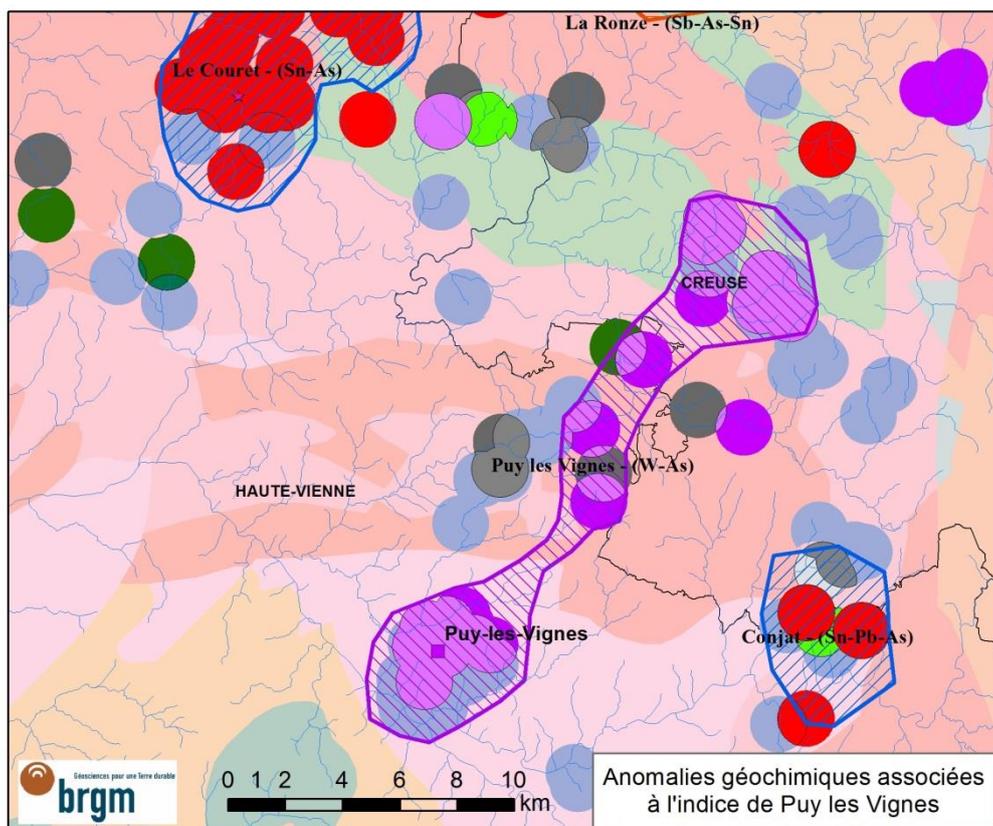
Occurrence connue depuis la fin du XVIIIe siècle. Découverte du gisement au XIXe siècle après des recherches pour étain.

Degré de connaissance : 3

- **Prospection géochimique régionale** : Inventaire BRGM
- **Prospection géophysique régionale** : Localement : Gravimétrie et test électromagnétique
- **Sondages percutants et/ou carottés** : Un grand nombre. Au moins 760 m carottés et 1000 m de percutant
- **Tranchées, tarières, travaux miniers (TMS)** : Un grand nombre de tranchés. Notamment dans le secteur des Clauds
- **Tests minéralurgiques** : Concentration par gravité, Scheiding.

Potentiel de développement ⁽⁸⁾ :

Partie occidentale du gisement très peu connue et à fort potentiel. Second pipe localisé au lieu-dit les Caillaudoux. Plusieurs anomalies géochimiques similaires dans la région (E de Moissanes et à Laveyrat). Or signalé dans pyrite.



Enjeux environnementaux :

Non

Contraintes liées à l'urbanisation :

Zone rurale, présence de batiments d'habitation et agricoles

Documentation disponible ⁽⁹⁾ :

Laval, M. (1985). Synthèse sur la mine de tungstène de Puy-les-Vignes (Haute-Vienne). BRGM, Note DAM/-GMX-1214.. Weppe, M. (1951). Contribution à l'étude des gîtes de tungstène français de Puy-les-Vignes (Haute-Vienne, La Châtaigneraie (Cantal). Thèse de doctorat, Université de Nancy, 207 pp.

Réévaluation de la priorité initiale ⁽¹⁰⁾ :

Priorité initiale

2

→

Priorité réévaluée

2+

⁽¹⁾ – Dans la base de données SIG Mines France (<http://sigminesfrance.brgm.fr>)

⁽²⁾ – Degrés décimaux (WGS84)

⁽³⁾ – Classées par ordre d'importance décroissant

⁽⁴⁾ – D'après DGALN/DEB/BRM

⁽⁵⁾ – Sur la base des travaux du COMES et de l'UE

⁽⁶⁾ – Française, complète ou incomplète, européenne

⁽⁷⁾ – Anomalie géochimique/géophysique, prospection marteau, ...

⁽⁸⁾ – Estimation basée notamment sur la réinterprétation de la géochimie de l'Inventaire

⁽⁹⁾ – Accessible au public

⁽¹⁰⁾ – D'après le rapport BRGM/RP-61745-FR, sur une échelle à 3 niveaux



Réexamen et valorisation du patrimoine minier métropolitain



Fiche de sujet minier

Nom : Vaulry - Cieux

Identifiant ⁽¹⁾ : FRA-00853

Région : Limousin

Département : Haute-Vienne (87)

Coordonnées ⁽²⁾ : Long. = 1,0833° Lat. = 46,0379°

Dernière mise à jour : Mars 2015



Substance(s) principale(s) ⁽³⁾ : Sn, Au, W, Cu, In

Historique du titre minier : Société des Mines de Bellac, renoncé le 18/06/1959

Statut actuel du titre minier ⁽⁴⁾ : Libre, pas d'instruction en cours

Contexte géologique sommaire :

Minéralisations liées au granite de Vaulry, et plus précisément aux leucogranitiques tardi-hercynien greisenisés des Monts de Blond.

Typologie du gisement :

Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques; sables de plage et placers de zone néritique; granites spécialisés ("greisen") et gisements porphyriques à Sn enrichis en In.

Dates d'exploitation : Exploitation ancienne

Criticité des substances ⁽⁵⁾ : W et In critiques, Cu stratégique

Tonnages exploités – ressources et teneurs : Productions passées : 50 t Sn

Potentialités en métaux rares : In, Li

Existence d'une filière de transformation ⁽⁶⁾ : Filières françaises incomplètes (pas de production primaire) et européennes complètes pour Sn

Origine de la découverte ⁽⁷⁾ :

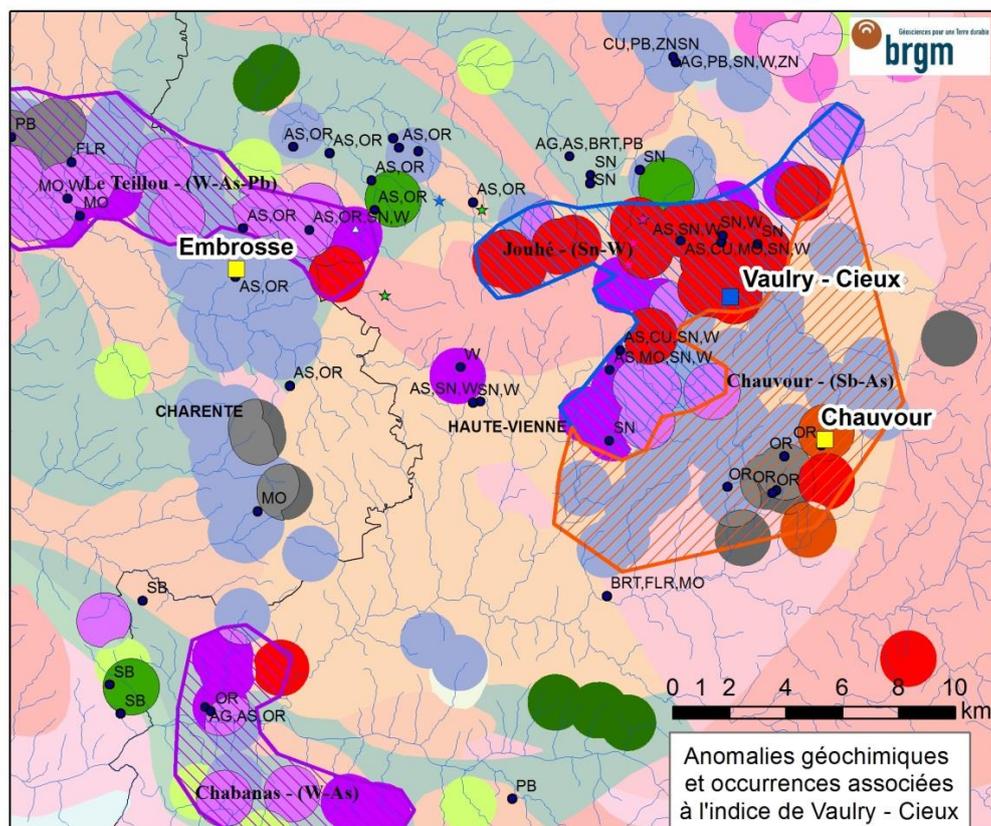
Anciens travaux

Degré de connaissance : 5

- **Prospection géochimique régionale** : Géochimie Inventaire
- **Prospection géophysique régionale** : Non renseigné
- **Sondages percutants et/ou carottés** : Nombreux sondages superficiels dans les alluvions en 1865 (63 sondages dans le secteur de Vaulry et 92 dans celui de Cieux), 1899 à 1901 et 1941 (349 sondages dans le secteur de Cieux).
- **Tranchées, tarières, travaux miniers (TMS)** : Travaux d'exploration dans les minéralisations en place du secteur de Vaulry de 1813 à 1928 (minéralisation de La Garde; 5 puits, nombreuses tranchées, descenderies et galeries) et en 1911 (minéralisation de Jouhe; un puit, dit de La Vergne, une descender
- **Tests minéralurgiques** : Essais de lavage sur le minerai primaire et sur les sables alluvionnaires (environ 2 000 m³).

Potentiel de développement ⁽⁸⁾ :

L'indice de Vaulry et Cieux se trouve sur la bordure sud-est d'une importante anomalie géochimique polymétallique à Sn.



Enjeux environnementaux :

Aucun identifié

Contraintes liées à l'urbanisation :

Pas de zone urbanisée ni d'infrastructures dans le secteur de Vaulry; village dans le secteur de Cieux

Documentation disponible ⁽⁹⁾ :

Aubert G. et Burnol L. (1960). Etude de la concession des mines d'étain et tungstène de Vaulry et Cieux. Rap. BRGM A.1630, 54 p., 3 ann.

Réévaluation de la priorité initiale ⁽¹⁰⁾ :

Priorité initiale

3

→

Priorité réévaluée

3

⁽¹⁾ – Dans la base de données SIG Mines France (<http://sigminesfrance.brgm.fr>)

⁽²⁾ – Degrés décimaux (WGS84)

⁽³⁾ – Classées par ordre d'importance décroissant

⁽⁴⁾ – D'après DGALN/DEB/BRM

⁽⁵⁾ – Sur la base des travaux du COMES et de l'UE

⁽⁶⁾ – Française, complète ou incomplète, européenne

⁽⁷⁾ – Anomalie géochimique/géophysique, prospection marteau, ...

⁽⁸⁾ – Estimation basée notamment sur la réinterprétation de la géochimie de l'Inventaire

⁽⁹⁾ – Accessible au public

⁽¹⁰⁾ – D'après le rapport BRGM/RP-61745-FR, sur une échelle à 3 niveaux



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