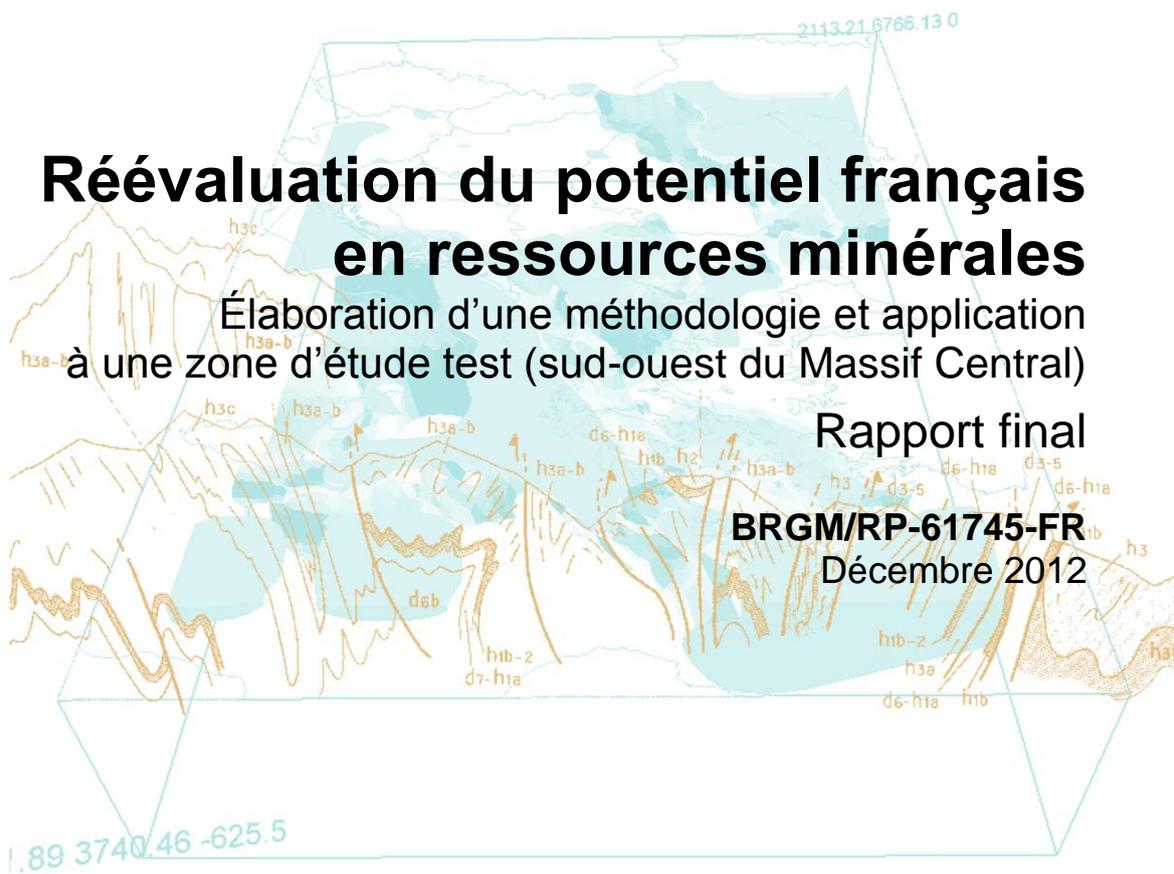


Document public



# Réévaluation du potentiel français en ressources minérales

Élaboration d'une méthodologie et application  
à une zone d'étude test (sud-ouest du Massif Central)

Rapport final

**BRGM/RP-61745-FR**

Décembre 2012



# Réévaluation du potentiel français en ressources minérales

Élaboration d'une méthodologie et application  
à une zone d'étude test (sud-ouest du Massif Central)

Rapport final

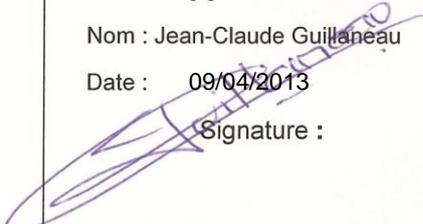
**BRGM/RP-61745-FR**

Décembre 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets de  
Service public du BRGM 2012 – Fiche 12RESB14

**D. Cassard, G. Bertrand, J. Monthel, E. Gloaguen,  
J. Melleton, Y. Husson, M. Billa, B. Tourlière**

**Vérificateur :**  
Nom : Thierry Augé  
Date : 08/04/2013  
Signature : 

**Approbateur :**  
Nom : Jean-Claude Guillauneau  
Date : 09/04/2013  
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**



**Mots-clés** : Ressources minérales, Inventaire minier national, Réévaluation, Potentiel minier, Tungstène, Massif Central, Montagne noire, France.

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

**Cassard D., Bertrand G., Monthel J., Gloaguen E., Melleton J., Husson Y., Billa M. et Tourlière B.** (2012) – Réévaluation du potentiel français en ressources minérales : élaboration d'une méthodologie et application à une zone d'étude test (sud-ouest du Massif Central). Rapport final. BRGM/RP-61745-FR, 126 p., 41 fig., 3 tabl., 2 ann., DVD-ROM.



## Synthèse

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la convention relative aux ressources minérales entre le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et le BRGM. Elle s'est attachée à mettre au point et à valider une méthodologie pour la réévaluation du potentiel minéral français incluant notamment la « reprise » des données de l'Inventaire minier national (1975-1991).

Cette méthodologie en 7 étapes s'appuie sur :

- un recensement de l'ensemble des données pertinentes et la constitution d'un catalogue de métadonnées ;
- une réévaluation géologique des sujets miniers de France métropolitaine dans le contexte économique actuel, permettant de présélectionner les zones ou « districts » méritant de retenir l'attention ;
- l'application d'un critère « filières industrielles et emplois » dont l'objectif est de s'assurer d'une bonne adéquation entre les objets à rechercher et leur impact sur l'activité en France et en Europe, et d'affiner - en accord avec le commanditaire - la liste des présélections ;
- le développement d'un SIG national permettant de mettre dans un même référentiel géographique toutes les données (géologiques, métallogéniques, géochimiques, géophysiques, sociétales...) nécessaires à l'étude et d'en favoriser la consultation ;
- l'évaluation de la favorabilité des zones présélectionnées par traitement des données incluant des recherches d'anomalies et des croisements multicritères à partir des différentes couches thématiques du SIG. Ces traitements seront adaptés aux informations disponibles et aux types de minéralisations recherchés et aboutiront à l'élaboration de cartes de potentiel minéral et/ou de prédictivité. Des compléments d'échantillonnage sur le terrain pourront être nécessaires pour pallier des manques d'information.
- l'application d'un critère « contraintes environnementales et réglementaires » et l'introduction de la dimension sociétale afin de s'assurer de l'acceptabilité des cibles identifiées ;
- la validation des résultats par le commanditaire lors de comités de restitution.

L'application de ce déroulé méthodologique aboutira en sortie à une vision renouvelée du potentiel minéral (probablement plus riche et novatrice pour les zones qui auront bénéficié d'acquisitions nouvelles en termes de fond géologique, de levés géophysiques aéroportés...) qui permettra de hiérarchiser en toute connaissance de cause et de prioriser les cibles / zones présélectionnées, soit pour en assurer le développement, soit pour les « sanctuariser ».

Afin de s'assurer de la faisabilité de cette démarche, le SIG national a été développé et est déjà largement alimenté (certaines couches thématiques – non absolument essentielles - restent à compléter / finaliser compte tenu de leur richesse), et un test de traitement « grandeur nature » a été réalisé sur le sud-ouest du Massif Central et les minéralisations à tungstène.



## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Rappels sur l’Inventaire minier français et ses principaux résultats.....</b>	<b>13</b>
2.1. LES RAISONS EN FAVEUR D'UNE COUVERTURE GEOCHIMIQUE.....	13
2.2. LES REGIONS COUVERTES PAR L'INVENTAIRE .....	14
2.3. METHODES DE PROSPECTION, ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE DU BRGM POUR L'INVENTAIRE.....	15
2.4. TRAITEMENT DES DONNEES.....	16
2.5. LES TRAVAUX COMPLEMENTAIRES .....	17
2.6. LES ENSEIGNEMENTS DE CE BREF PANORAMA DE L'INVENTAIRE POUR LE PRESENT PROJET.....	18
2.7. LES AUTRES DOCUMENTS ISSUS DE L'INVENTAIRE .....	18
<b>3. Les principaux sujets miniers en France métropolitaine .....</b>	<b>21</b>
3.1. INTERET ECONOMIQUE DES PRINCIPALES SUBSTANCES RECONNUES SUR LE TERRITOIRE .....	21
3.1.1. Tungstène .....	21
3.1.2. Antimoine .....	22
3.1.3. Niobium et tantale .....	22
3.1.4. Molybdène.....	23
3.1.5. Fluorine .....	23
3.1.6. Barytine.....	23
3.1.7. Terres rares.....	23
3.1.8. Métaux de base : Pb – Zn – Cu .....	24
3.1.9. Métaux précieux : or et argent.....	24
3.1.10. Bauxites réfractaires.....	24
3.1.11. Uranium (pour mémoire) .....	25
3.1.12. Charbon, lignite (pour mémoire) .....	25
3.1.13. Schistes bitumineux (pour mémoire) .....	26
3.2. INCIDENCE DU DEGRE DE RECONNAISSANCE SUR LE CHOIX DES GISEMENTS SELECTIONNES.....	26
3.3. CONTEXTE GITOLOGIQUE ET POSSIBILITE DE METTRE EN EVIDENCE DES RESSOURCES ADDITIONNELLES A DES GISEMENTS DEJA IDENTIFIES .....	27
3.4. NOUVELLE HIERARCHISATION DES SUJETS MINIERES EN FRANCE METROPOLITAINE .....	27
<b>4. Les données de l’Inventaire minier .....</b>	<b>31</b>

4.1. CONSTITUTION D'UNE BASE DE METADONNEES GEOGRAPHIQUES DES TRAVAUX DE GEOCHIMIE .....	31
4.1.1. Les sources de données disponibles .....	31
4.1.2. Réalisation de la couche de métadonnées géographiques associée aux rapports .....	33
4.1.3. Données manquantes identifiées .....	39
4.1.4. Répartition spatiale des données, seuils de détection et conséquences .....	39
4.2. VALORISATION DES DONNEES DE L'INVENTAIRE RELATIVES AUX GISEMENTS ET INDICES .....	41
<b>5. Données complémentaires hors-Inventaire .....</b>	<b>43</b>
5.1. LES DONNEES GEOLOGIQUES .....	43
5.1.1. Cartes géologiques .....	43
5.1.2. Banque de données du sous-sol (BSS) .....	43
5.2. LES DONNEES GITOLOGIQUES.....	44
5.3. LES DONNEES GEOCHIMIQUES.....	47
5.3.1. Projet FOREGS .....	47
5.3.2. Projet GEMAS .....	49
5.4. LES DONNEES GEOPHYSIQUES .....	50
5.5. LES DONNEES ENVIRONNEMENTALES ET LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX À PRENDRE EN COMPTE .....	53
5.5.1. Au titre des paysages et du patrimoine .....	53
5.5.2. Au titre de la protection de la nature.....	55
5.5.3. Au titre de la gestion de l'eau.....	59
5.5.4. Au titre de l'usage des sols .....	59
5.5.5. Au titre du patrimoine naturel.....	59
<b>6. Développement d'un Système d'Information Géographique national.....</b>	<b>69</b>
6.1. STRUCTURATION DES GEODATABASES .....	69
6.2. DETAIL DES CLASSES D'ENTITES.....	69
6.2.1. Le découpage au 1/50 000 de la France.....	70
6.2.2. Les données environnementales .....	70
6.2.3. Le fond géographique .....	70
6.2.4. Données du FOREGS .....	71
6.2.5. Données GEMAS.....	71
6.2.6. Données de géophysique, gravimétrie .....	71
6.2.7. Données alluvionnaires Inventaire minier.....	71
6.2.8. Mines, gisements et indices miniers.....	71
6.2.9. Données géochimiques de l'Inventaire minier .....	72
6.2.10. Permis miniers et concessions orphelines.....	72
6.2.11. Analyses roches .....	72

6.2.12. Etiquettes .....	72
6.2.13. Géologie complète de la France au 1 / 1 000 000 <sup>ème</sup> .....	73
6.2.14. Géologie simplifiée de la France au 1 / 1 000 000 <sup>ème</sup> .....	73
6.2.15. Métadonnées .....	73
6.2.16. Tables simples non géoréférencées .....	73
<b>7. Description de la méthodologie proposée.....</b>	<b>75</b>
7.1. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE .....	75
7.2. LE DEROULE METHODOLOGIQUE SOUS FORME SYNTHETIQUE .....	78
<b>8. Application à une zone test : les gisements de tungstène du sud du Massif Central.....</b>	<b>83</b>
8.1. CHOIX DE LA ZONE TEST .....	83
8.2. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE – DONNEES EXISTANTES .....	86
8.2.1. Contexte géologique : la Montagne Noire.....	86
8.2.2. Rappel historique succinct sur la production minière de la Montagne Noire ....	88
8.2.3. Métallogénie du tungstène dans la zone test de la Montagne Noire .....	91
8.3. LE SIG REGIONAL.....	91
8.4. LES TRAITEMENTS DE PREDICTIVITE .....	92
8.4.1. La méthode “Weight of Evidence” (WofE).....	92
8.4.2. La méthode “Cell-Based Association” (CBA).....	93
8.5. LES RESULTATS OBTENUS ET RECOMMANDATIONS.....	94
8.5.1. Résultats obtenus par la méthode du Weight of Evidence (approche expert) ..	94
8.5.2. Résultats obtenus par la méthode CBA .....	96
8.5.3. Synthèse des deux approches et recommandations .....	97
<b>9. Conclusion.....</b>	<b>101</b>
9.1. LA METHODOLOGIE : LES POINTS CLES .....	101
9.2. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A UNE ZONE TEST .....	102
9.3. MODALITES D'APPLICATION .....	103
<b>10. Références bibliographiques.....</b>	<b>105</b>

## Liste des Figures

Figure 1 - Tableau d'assemblage de la carte géologique de la France avec les régions prospectées par le BRGM (284 435 échantillons) et SNEA(P) (58 633 échantillons), d'après Lambert (2005) et Cassard et Lambert (2007). .....	14
--	----

Figure 2 - Répartition statistique des analyses multiéléments selon les méthodes employées. ....	16
Figure 3 - Représentation géographique des sujets miniers français sélectionnés dans la présente étude, codés par substance et classe de priorité (hors substances énergétiques). ....	30
Figure 4 - Exemple du fichier d'Index de l'ancien système VAX. Noter l'hétérogénéité mais l'intérêt de l'information contenue dans la colonne D. ....	32
Figure 5 - Structure de la base de données des rapports consacrés à l'Inventaire et référencés à la bibliothèque centrale du BRGM. ....	33
Figure 6 - Structure de la base de données Lambert (2005). ....	33
Figure 7 - Exemple de métadonnée relative à l'emprise géographique des échantillons (Pyrénées centrales et orientales). ....	34
Figure 8 - Confrontation des emprises géographiques entre les données issues de la Bibliothèque et les données de la base Lambert (2005) (Pyrénées centrales et orientales). ....	35
Figure 9 - Couche d'emprise géographique des rapports BRGM & SNEA(P) consacrés à la prospection géochimique. ....	36
Figure 10 - Couche d'emprise géographique des données de prospection alluvionnaire sur les données numériques disponibles dans la base Lambert (2005). ....	38
Figure 11 - Analyse quantitative des éléments chimiques analysés dans les échantillons de géochimie sédiment. ....	40
Figure 12 - Tableau d'assemblage de la carte géologique 1/50 000 et état d'actualisation à janvier 2012. ....	42
Figure 13 - Carte de densité des dossiers BSS (en nombre de dossiers par 10 km <sup>2</sup> ) en France métropolitaine. ....	44
Figure 14 - Gisements, gîtes et indices en France métropolitaine, extraits de la base ProMine Gisement et codés selon la substance principale (hors substances énergétiques). ....	45
Figure 15 - Tableau de Mendeleïev précisant les éléments analysés, selon les supports sols, eaux ou sédiments dans le cadre du FOREGS (Cassard et Lambert, 2007). ....	48
Figure 16 - Répartition des points d'échantillonnage du projet FOREGS. ....	49
Figure 17 - Répartition des points d'échantillonnage du projet GEMAS. ....	50
Figure 18 - Carte de densité des stations gravimétriques (en nombre de stations par km <sup>2</sup> ) en France métropolitaine. ....	52
Figure 19 - Carte d'emprise des différentes campagnes d'acquisition de données magnétiques aéroportées en France. ....	52
Figure 20* - Parcs nationaux (en mauve) et aires d'adhésion de parcs nationaux (en jaune) du territoire métropolitain. ....	55
Figure 21 - Carte de répartition des arrêtés préfectoraux de protection de biotope. ....	56
Figure 22 - Cartographies des zones humides protégées du territoire métropolitain (RAMSAR). ....	58
Figure 23 - Cartographie des Parcs Naturels Régionaux du territoire métropolitain. ....	60
Figure 24 - Cartographie des Zones classées ZNIEFF1 du territoire métropolitain. ....	62
Figure 25 - Cartographie des zones classées ZNIEFF2 du territoire métropolitain. ....	63
Figure 26 - Cartographie des réserves de la Biosphère. ....	64
Figure 27 - Cartographie des sites Natura 2000. ....	65
Figure 28 - Cartographie des zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO). ....	67
Figure 29 - Les classes d'entités de la géodatabase Sig_Mines_France, couvrant le territoire national et contenant les données numériques disponibles. ....	69

Figure 30 - Présentation synthétique du déroulé méthodologique montrant l'enchaînement des différentes tâches.....	81
Figure 31 - Répartition géographique de la consommation de tungstène (primaire) en 2010 (extrait de Audion et Labbé, 2012).....	84
Figure 32 - Évolution récente de la production et de la consommation primaire et des prix du tungstène depuis 1985, et tendances d'évolution pour 2012-2016 (extrait de Audion et Labbé, 2012).....	84
Figure 33 - Évaluation de la criticité du tungstène (Extrait de Audion et Labbé, 2012).....	85
Figure 34 - Localisation et emprise de la zone de test choisie (le fond est constitué par la carte géologique de France au 1/1 000 000).....	87
Figure 35 - Grands traits structuraux de la Montagne Noire (Demange et al., 1995).....	87
Figure 36 - Anciennes exploitations minières présentes sur la Montagne Noire (légende page suivante).....	89
Figure 37 - Les classes d'entités de la géodatabase Zone_Test.gdb, extraite de la géodatabase nationale Sig_Mines_France.gdb.....	91
Figure 38 - Carte des zones favorables mises en évidence par la méthode du Weight of Evidence.....	95
Figure 39 - Zoom de la Figure 38 sur le secteur du Moulinas et alentours (zone de Montredon-Labessonnié) qui présente la plus forte favorabilité en tungstène par la méthode du Weight of Evidence.....	96
Figure 40 - Carte des zones favorables (carrés bleus) obtenues par la méthode CBA, et comparaison avec les zones d'intérêt identifiées par la méthode WofE (polygones roses).....	97
Figure 41 - Localisation des zones d'intérêt sur une carte d'anomalie de Bouguer (données gravimétriques, valeurs en mGal) montrant leur lien avec une structuration tectonique NE-SW et de forts gradients gravimétriques.....	99

## Liste des Tableaux

Tableau 1 - Liste des sujets miniers français classés en priorité 1 ou 2 dans le cadre de la présente étude.....	29
Tableau 2 - Structure de la base de données ProMine Gisement, telle que décrite dans les métadonnées de la base ( <a href="http://ptrarc.gtk.fi/ProMine/default.aspx">http://ptrarc.gtk.fi/ProMine/default.aspx</a> ).....	46
Tableau 3 - Répartition des différents types d'analyses entre les laboratoires du projet GEMAS.....	50

## Liste des Annexes

Annexe 1 - Liste non exhaustive des documents relatifs aux ressources minérales françaises.....	109
Annexe 2 - Métallogénie du tungstène dans la Montagne Noire.....	115



# 1. Introduction

La présente 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. L'introduction à la Convention relative aux ressources minérales entre le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL<sup>1</sup>) et le BRGM résume fort bien cette situation : « *La disponibilité et l'accessibilité des ressources minérales sont un des enjeux stratégiques pour les économies française, européenne et mondiale car elles sont des intrants indispensables à la plupart des processus économiques. L'Europe et surtout la France qui ont vu décliner, ces cinquante dernières années, les filières d'extraction et d'affinage des métaux sont maintenant dépendantes des marchés extérieurs pour ces matières premières indispensables au fonctionnement de leur économie. L'évolution du marché mondial, avec le développement des pays émergents, l'apparition de positions oligopolistiques comme le Brésil (niobium) et la Chine (terres rares) et le contexte politico-économique rendent encore plus fragile les pays dont la production manufacturière dépend essentiellement d'importations. Dans ce contexte très tendu, la France comme l'Europe, doivent être en capacité de promouvoir des actions fortes afin d'assurer aux industriels encore implantés sur son territoire les approvisionnements nécessaires à leur production. C'est ainsi que le MEDDTL, Ministère en charge des ressources minérales et des mines, a lancé en avril 2009 des travaux visant à évaluer et, le cas échéant, à redéfinir la politique française des ressources minérales.* »

Le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre de la fiche « Revalorisation et réévaluation du potentiel français en ressources minérales » et porte plus particulièrement sur la mise au point d'une méthodologie de choix de priorités : établissement de modèles géologiques prévisionnels réactualisés, revisite avec documents croisés (géophysique, etc.) et proposition de priorités.

Ainsi, il apparaît aujourd'hui que, malgré l'effort remarquable d'acquisition de données réalisé durant l'Inventaire minier de la France métropolitaine durant les années 1975-1991, le potentiel en ressources minérales du sous-sol français reste mal connu. Les raisons en sont multiples et de nature variée. L'approche mise en œuvre était mono-méthode, essentiellement la géochimie stream-sédiment et alluvionnaire. La géophysique n'a pas été utilisée pour l'approche stratégique, étant surtout employée en phase tactique pour le contrôle d'anomalies géochimiques ou pour vérifier la continuité de structures géologiques localement minéralisées. L'Inventaire n'a finalement exploré que les deux-tiers du socle (massifs anciens, chaînes alpine et pyrénéenne, intrusifs) affleurant sur le Territoire et toutes les anomalies mises en évidence lors de la phase stratégique n'ont pas fait l'objet d'un suivi tactique approfondi.

À partir de 1985, un freinage, dû aux économies budgétaires et au manque d'attrait pour les matières premières dont les cours s'étaient effondrés, a amené une décroissance brutale des crédits d'inventaire, qui ne s'est plus poursuivi désormais que par reconduction annuelle. Les recherches se sont donc fortement réduites et peu à peu focalisées sur l'or, seul métal ayant conservé des cours attrayants. Le Comité de l'Inventaire décidait alors pour gagner du temps de présenter aux opérateurs miniers les sujets or à un stade de maturité moindre que celui primitivement retenu.

Sans plus entrer dans les détails, on comprend que l'Inventaire est resté un travail inachevé.

---

<sup>1</sup> Devenu Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) courant 2012

Outre le contexte général rappelé plus haut, d'autres facteurs invitent à revisiter les données de l'Inventaire et à réévaluer le potentiel minéral français :

- les cours des métaux qui pour certains sont très hauts : Cu, Pb, Zn, W, Sb, etc. ;
- l'apparition de nouvelles technologies dans le traitement des minerais, permettant la mise en exploitation de gisements qui, il y a seulement 20 ans, seraient restés à l'état d'anomalies ;
- le développement de nouveaux modèles de gisements (gisements épithermaux, IOCG [Iron-Oxides Copper Gold deposits]...) ; gisements qui n'ont jamais été recherchés sur le territoire national ;
- nombre de métaux rares<sup>2</sup>, qui peuvent être stratégiques, voire critiques (e.g., Ta, Nb, Li, terres rares, etc.) et qui sont souvent indispensables au développement des technologies modernes, n'ont la plupart du temps pas fait l'objet d'études sérieuses, et leur potentiel reste largement méconnu.

Cette étude s'est attachée à mettre au point un déroulé méthodologique pour la réévaluation du potentiel minéral français incluant notamment la « reprise » des données de l'Inventaire. En pratique, ceci recouvre deux actions :

- établir la liste des tâches / actions à accomplir, avec (i) la description -aussi exhaustive que possible- de leur contenu et du résultat ou livrable attendu, et (ii) leur enchaînement (fonctionnement en parallèle ou séquentiel), en veillant à la logique du déroulement et à l'introduction de points de validation des choix ou des résultats ;
- s'assurer en parallèle de la faisabilité de la méthodologie proposée. Pour cela, la réalisation des tâches suggérées a été entreprise, faisant apparaître ici ou là des contraintes à prendre en compte, ce qui a permis d'affiner certaines parties du déroulé. Ce travail était d'autant plus indispensable qu'un test d'application / validation grandeur nature devait être effectué sur une zone sélectionnée.

Toutes les données acquises au cours de la seconde action sont venues alimenter un SIG d'échelle nationale. Ce SIG, qui évoluera au fur et à mesure des études à venir, peut être vu comme le cœur du système : c'est la plateforme à partir de laquelle les traitements pourront être lancés (calcul de potentiel minéral, cartes de prédictivité<sup>3</sup>) et qui permettra, en combinant les données issues de l'Inventaire et des données acquises plus récemment, d'identifier, de caractériser, puis de prioriser les zones ou cibles méritant de retenir l'attention.

---

<sup>2</sup> Les métaux rares sont généralement des coproduits d'autres métaux majeurs : ils ne sont presque jamais la substance principale d'un gisement et sont souvent produits en faible quantité. Ils peuvent être stratégiques s'ils sont une ressource indispensable à une industrie, une politique industrielle... Ils peuvent être qualifiés de critiques s'il s'agit d'une ressource pour laquelle les risques industriels liés à un déficit de l'offre sont élevés et pour laquelle il n'y a pas de substitution possible. Il faut noter qu'une matière peut être stratégique ou critique dans une industrie mais pas dans une autre, dans un pays mais pas dans un autre et que cela évolue avec le temps.

<sup>3</sup> De l'adjectif « prédictif » (« qui détermine, par l'étude, la probabilité d'occurrence d'un phénomène ») et du suffixe nominal « ité » ; les cartes de prédictivité – ou cartes prédictives – sont des cartes de probabilité (relative ou absolue) d'occurrence d'un phénomène, à savoir une minéralisation dans le cadre de la présente étude.

## 2. Rappels sur l'Inventaire minier français et ses principaux résultats

Lors du premier choc pétrolier en 1973, l'inquiétude au sujet de l'approvisionnement en matières premières minérales de l'industrie française conduit les pouvoirs publics à lancer en 1975, parmi de nombreuses mesures, un inventaire des ressources minières en métropole, en Guyane et en Nouvelle-Calédonie. Le but de cet inventaire était double : d'une part estimer le potentiel en certaines substances minérales de la France, d'autre part inciter les opérateurs à lancer des prospections pour le valoriser. Cet inventaire laissait de côté l'estimation du potentiel en gisements sédimentaires (charbon, fer, potasse, bauxite) ainsi que celle du potentiel des gisements d'uranium et de nickel (Nouvelle-Calédonie) traité à part, pour ne s'intéresser qu'aux gisements de métaux non ferreux ou de métaux d'alliages et à leur gangue associée valorisable (fluorine, barytine), gisements souvent irréguliers et posant des problèmes de réserves. Il convient toutefois de mentionner que la relance de la production charbonnière, souhaitée au début des années 1980, avait entraîné la mise sur pied d'un inventaire charbonnier qui a été réalisé sur la période s'étendant de 1980 à 1985 inclus. En outre, un inventaire « matériaux de carrière » a été réalisé entre 1979 et 1985. L'inventaire principal, portant sur les gisements de métaux non ferreux, s'est poursuivi, à un rythme ralenti à partir de 1985, jusqu'en 1991. L'objectif affiché était un doublement à terme de la production minière nationale pour ces métaux.

En s'adressant à un seul opérateur, l'État pouvait attendre des garanties d'homogénéité, de non redondance, et d'économie à cause de la standardisation des méthodes employées.

De ce fait, le BRGM, conformément à sa mission de Service public et à la demande du Ministère de l'Industrie, a effectué de nombreuses campagnes de prospection à vocation minière entre les années 1975 et 1991 ; ces opérations étaient réalisées dans le cadre du programme dénommé « Inventaire des ressources minérales du territoire national ».

### 2.1. LES RAISONS EN FAVEUR D'UNE COUVERTURE GEOCHIMIQUE

Pour explorer de vastes secteurs, deux grandes familles de techniques étaient disponibles :

- la géophysique, c'est-à-dire la mesure des propriétés magnétiques, électriques ou radiométriques du sous-sol ou de la surface (de nombreux gisements sont conducteurs de l'électricité, et parfois magnétiques). À l'échelle d'un territoire comme la France, les mesures se font de manière aéroportée, et sont donc obtenues très rapidement ;
- la géochimie, c'est-à-dire le dosage des métaux ou autres éléments, dans les roches et d'une façon plus générale dans l'environnement. Elle est beaucoup plus lente à mettre en œuvre.

Ces deux familles de techniques ont été très largement employées de par le monde ; elles présentent chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Il faut souligner le fait que les méthodes de mesures chimiques permettent par spectrométrie d'obtenir simultanément des mesures sur plusieurs dizaines d'éléments. Or, on sait que dans le passé, le sous-sol français a fourni des productions relativement importantes de substances assez variées, plomb, zinc, argent, or, antimoine, tungstène, baryum, fluor, pour ne citer que les principaux minerais non ferreux. Les cibles potentielles étant variées, on a été conduit logiquement à pencher pour une technique à même de rendre compte de cette diversité, à savoir un programme de mesures géochimiques systématiques (Barbier, 1996).

## 2.2. LES REGIONS COUVERTES PAR L'INVENTAIRE

Pour des raisons économiques et gîtologiques, la géochimie de surface n'étant pas considérée à l'époque comme un outil efficace pour évaluer le potentiel profond des grands bassins sédimentaires, les campagnes de prospection n'ont couvert, à quelques exceptions près, que les socles hercyniens et alpins, éventuellement leurs marges sédimentaires, ce qui représente malgré tout une partie non négligeable du territoire (102 000 km<sup>2</sup>, soit environ 20 % ; *Figure 1*). La surface estimée du « socle » (anté-hercynien et massifs intrusifs) étant d'environ 150 000 km<sup>2</sup>, **l'Inventaire a donc en réalité exploré les deux-tiers du socle affleurant sur le Territoire** (Lambert, 2005).

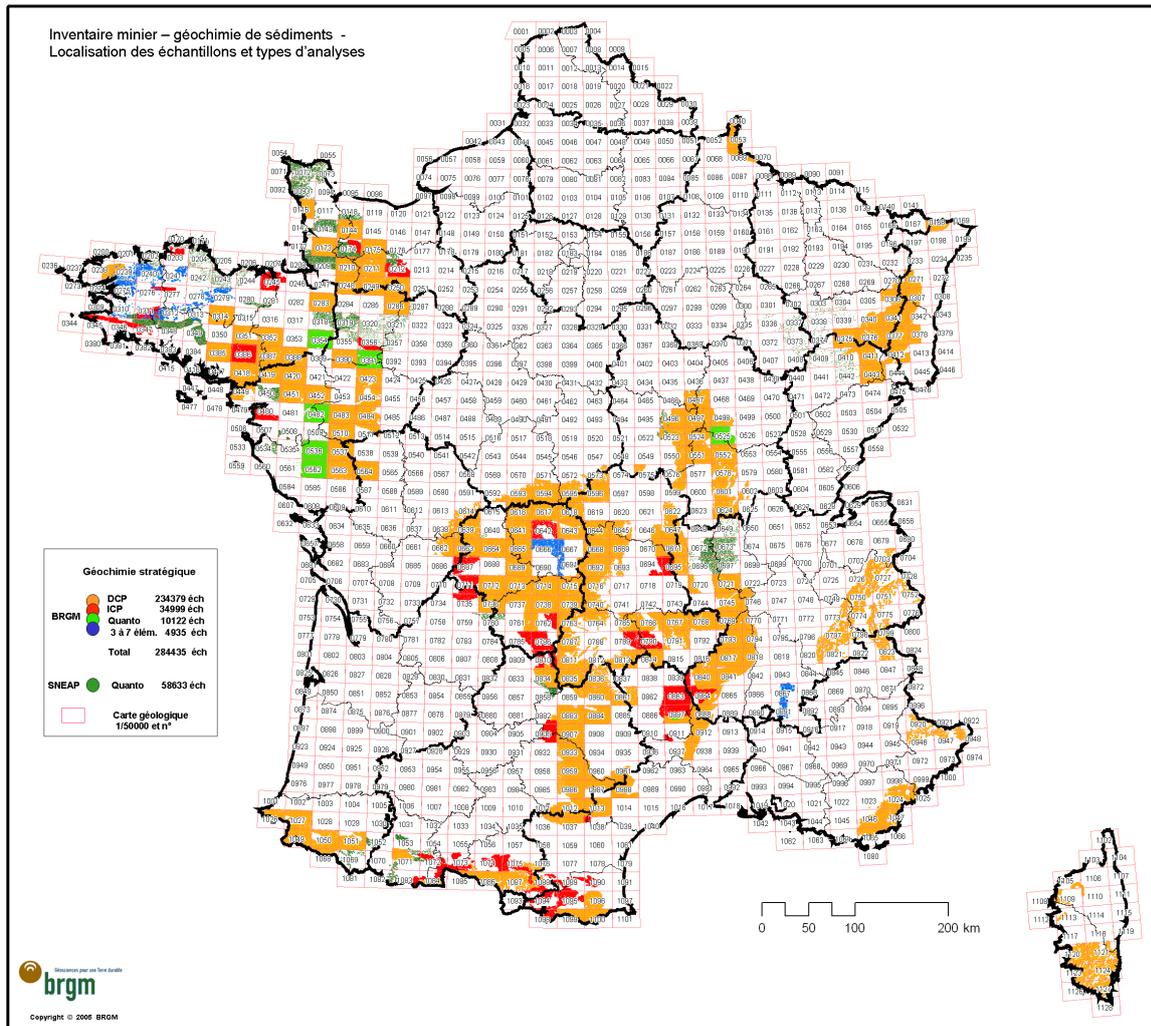


Figure 1 - Tableau d'assemblage de la carte géologique de la France avec les régions prospectées par le BRGM (284 435 échantillons) et SNEA(P) (58 633 échantillons), d'après Lambert (2005) et Cassard et Lambert (2007).

Parallèlement, la société SNEA(P) a également effectué des recherches pour son propre compte pendant la même période que le BRGM, et en utilisant le même outil géochimique, mais sur des zones en général différentes et complémentaires (parfois partiellement chevauchantes). Après l'abandon de ces recherches, les résultats ont été mis à la disposition du comité de l'Inventaire, contribuant ainsi à augmenter la surface couverte.

Par ailleurs, le BRGM a complété la reconnaissance des régions prospectées par géochimie par une prospection de type « alluvionnaire », *i.e.* par détermination des minéraux de fond de batée. Il ne s'agit en l'occurrence plus de géochimie, mais ce type d'exploration a été effectué dans le même temps, par les mêmes équipes de terrain, et les résultats interprétés parallèlement à la géochimie. Cette double méthode a souvent montré son efficacité, car elle met en évidence à la fois la présence d'anomalies métalliques et les minéraux éventuellement associés. Le total des points échantillonnés en alluvionnaire est de 96 924 qui se répartissent par région comme suit : Massif Armoricain : 15 990 ; Massif Central : 66 160 ; Vosges : 3 111 ; Sud-Ouest : 9 645 et Corse : 2 018.

### **2.3. METHODES DE PROSPECTION, ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE DU BRGM POUR L'INVENTAIRE**

Le but essentiel de l'exploration géochimique était d'estimer et d'optimiser l'évaluation du potentiel minier du territoire métropolitain et, pour ce faire, d'obtenir le maximum d'informations permettant de déceler une quelconque minéralisation dans l'environnement de sites d'échantillonnage par l'analyse chimique : détection directe des métaux concernés, association d'éléments caractéristiques d'un type de minéralisation, mise en évidence de phénomènes minéralisateurs, caractérisation géochimique des formations lithologiques environnantes.

Tout corps géologique (minéral, roche) affleurant et donc soumis pendant une longue période à des phénomènes d'érosion ou de dissolution se décompose en « particules ». Ces particules peuvent ensuite être déplacées à une distance plus ou moins importante (quelques dizaines de km pour des sédiments, quelques dizaines de mètres pour les sols). Leur analyse révèle une « signature » chimique, reflet plus ou moins fidèle de la composition chimique de la roche ou de la minéralisation d'origine. Les sédiments de rivière (ou les sols) peuvent donc, après analyse, signaler par des teneurs « anormales » en certains éléments la présence de corps minéralisés dans le voisinage du site de prélèvement : en amont dans le bassin pour un sédiment de ruisseau (« stream-sediment »), plus haut dans la pente pour des colluvions, à quelques dizaines de mètres aux alentours pour un sol sur un terrain plat.

Pour les sédiments, c'est donc dans le bassin versant correspondant que se situera l'origine de cette anomalie. Il s'agira donc de placer au mieux les sites de prélèvement pour « échantillonner » le maximum de bassins, tout en évitant une trop forte « dilution » ou « dispersion » du signal géochimique. Plusieurs tests ont été effectués au début et au cours de l'Inventaire ; ils devaient confirmer le choix de plusieurs paramètres (type de matériel, granulométrie, densité d'échantillonnage, profondeur de prélèvement, type d'analyses), le but étant d'optimiser la représentativité de l'échantillon par rapport au bassin, l'intensité du signal géochimique, la répétitivité de l'analyse, et ceci dans une fourchette de temps/coût réaliste.

La procédure suivante a été utilisée dès le démarrage des campagnes dites « stratégiques » :

- densité d'échantillons de l'ordre de 2 à 3 par km<sup>2</sup> imposé par le paramètre « temps/coût » ;
- matériel : sédiment de ruisseau actif correspondant à des bassins de petite taille (idéalement de l'ordre du km<sup>2</sup>, ce qui n'est pas toujours réalisable), ou prélèvement en base de thalweg sec et à environ 20 cm (à la base des racines) d'un type de sol/sédiment/colluvion dénommé ici « fond de vallon » ;
- quantité de matériel brut : 1 à 3 kg de la partie fine superficielle, permettant d'extraire, après séchage et émottage, une quantité suffisante de la fraction granulométrique souhaitée ;
- taille granulométrique analysée : 0-125 µm incluant donc argiles, limons et silts fins.

Pour ce qui concerne les données géochimiques, le BRGM a toujours utilisé l'analyse multi-élémentaire ; le nombre d'éléments analysés varie selon la méthode employée : en général 22 pour le plasma DCP, instrument qui a été largement le plus utilisé comme le montre le graphique de répartition (*Figure 2*), 33 pour le quantomètre, et 34 pour le plasma ICP, plus récemment utilisé. L'or n'a jamais été analysé par une de ces méthodes, mais par absorption atomique sur une prise d'échantillon réservée pour ce type d'analyse.

Dans le cadre de l'Inventaire, l'or n'a été que tardivement analysé, et ceci pour deux raisons :

- lancé au milieu des années 1970, le programme visait plutôt les métaux de base classiques demandés par les industries de l'époque ;
- et surtout, les moyens analytiques d'alors ne permettaient pas de détecter en routine l'or à un seuil suffisamment bas pour être efficace dans le cadre de prospection à faible densité d'échantillonnage.

Avec les progrès effectués depuis lors, à partir des années 1980, il a enfin été possible de détecter l'or à des seuils de l'ordre de 20 ppb, ce qui devenait intéressant pour l'exploration. C'est pour cette raison que seules les campagnes des dernières années de l'Inventaire possèdent des résultats or ; elles sont essentiellement localisées dans le Massif Central et les Pyrénées.

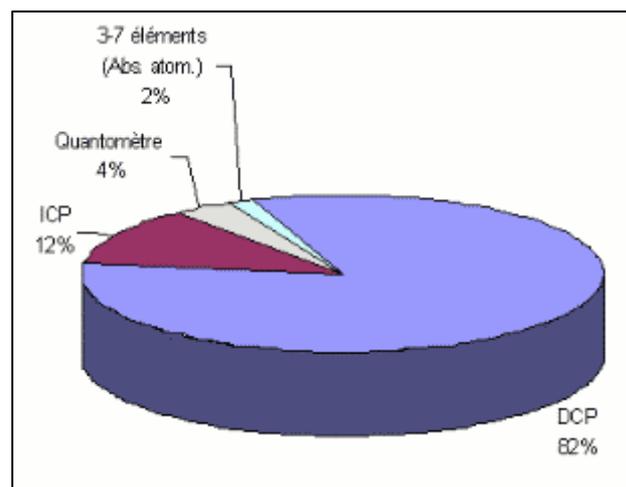


Figure 2 - Répartition statistique des analyses multiéléments selon les méthodes employées.

## 2.4. TRAITEMENT DES DONNEES

Les campagnes de prospection ont été engagées pour réaliser, dans les régions ciblées, la couverture des coupures topographiques IGN 1/50 000. Toutes ne sont pas couvertes et, sur certaines, les prélèvements n'ont concerné que des formations géologiques choisies par avance.

Lorsqu'une coupure était complétée, une interprétation géochimique de l'ensemble des résultats devenait possible (traitements statistiques multivariés identifiant des formations géologiques ou des associations minérales, surtout mise en évidence d'anomalies métalliques, propositions de travaux complémentaires). Les résultats d'étude des fonds de batée, lorsque disponibles, étaient également pris en compte.

À l'issue de ces interprétations, et pour la plupart des feuilles 1/50 000, un rapport était édité. Il résume la géologie locale, présente les résultats des traitements statistiques, décrit en détail les

anomalies mises en évidence. Il comprend en annexe des cartes au 1/50 000 : localisation des échantillons, isovaleurs pour éléments particuliers, anomalies géochimiques pour les métaux usuels, synthèse d'anomalies ; et présente un listing des résultats.

Plus tard, en regroupant les résultats de plusieurs feuilles, des synthèses régionales ont également été réalisées.

## 2.5. LES TRAVAUX COMPLEMENTAIRES

Tout résultat « positif » à l'issue de la prospection de type « stratégique » que constitue l'Inventaire Minier ne sera pas suffisant pour déboucher directement sur la mise à jour d'un gisement ; tout au plus s'agira-t-il d'« indice géochimique ». Des travaux complémentaires seront nécessaires (on parle de stade « tactique ») pour déterminer la localisation exacte du corps minéralisé (par géophysique, géochimie de détail ou prospection marteau), en préciser ses caractéristiques métallogéniques et commencer à estimer son potentiel économique par tranchées et sondages.

Ce sont environ **2 000 indices entièrement nouveaux** qui ont été ainsi mis en évidence. Mais, pour inciter les opérateurs à faire des recherches approfondies, il fallait aller un peu plus loin. Sur les anomalies géochimiques en sol les plus étendues, associées à des structures géologiques repérables, notamment par étude géophysique au sol, les travaux de l'Inventaire ont consisté généralement en sondages destructifs obliques, perpendiculaires aux structures et croisés de manière à recouper la minéralisation escomptée à environ 50 mètres de profondeur, afin de bien définir, en particulier son attitude en profondeur, rendue souvent anormale en surface par la solifluxion. Puis, si ces sondages destructifs s'avéraient positifs, les travaux se poursuivaient par un ou deux sondages carottés prévus pour toucher le minerai à une profondeur d'environ 100 m. Si le produit « puissance x teneur » dans les carottes de sondages se rapprochait du niveau économique et si la longueur de la structure en surface pouvait laisser espérer un tonnage suffisant, alors le Comité de l'Inventaire décidait d'arrêter les travaux et de proposer le sujet à la profession.

Après les deux premiers programmes quinquennaux (1975-79 et 1980-85) qui ont vu **quarante-six sujets nouveaux** présentés à la profession minière, à partir de 1985, un freinage, dû aux économies budgétaires et au manque d'attrait pour les matières premières dont les cours s'étaient effondrés, a amené une décroissance brutale des crédits d'inventaire, qui ne s'est plus poursuivi désormais que par reconduction annuelle. Plusieurs opérateurs miniers importants avaient d'autre part mis en sommeil leurs activités de recherche minière.

Les recherches se sont donc fortement réduites et peu à peu focalisées sur l'or, seul métal ayant conservé des cours attrayants. Le Comité décidait alors pour gagner du temps de présenter aux opérateurs miniers les sujets or à un stade de maturité moindre que celui primitivement retenu : dix-neuf fiches de sujets or allant de prospectes bien délimités à des regroupements d'anomalies de la dimension d'un district ont ainsi été rendues publiques. **Cinquante-sept sujets nouveaux** ont ainsi été présentés entre 1985 et 1991.

Au total, se sont donc **cent trois sujets nouveaux qui ont été proposés à la profession minière** entre 1975 et 1991 (incluant les 19 fiches or). Soixante et un ont fait par la suite l'objet d'attribution de permis exclusifs de recherche (PER), permis accordés à une douzaine d'opérateurs miniers.

H. Pélissonnier (1995) note que « les indices n'ayant pas donné lieu à une présentation restent susceptibles de renfermer des minéralisations intéressantes. Leur mise à l'écart avait été

rendue nécessaire par le caractère ponctuel et coûteux de la prospection en aval, reposant principalement sur des sondages. Il est tout à fait possible que le tri effectué soit à reprendre, notamment en fonction d'idées nouvelles ou de modifications de l'environnement économique ».

## **2.6. LES ENSEIGNEMENTS DE CE BREF PANORAMA DE L'INVENTAIRE POUR LE PRESENT PROJET**

On retiendra plus particulièrement que :

- l'Inventaire n'a exploré que les deux-tiers du socle (massifs anciens, chaînes alpine et pyrénéenne, intrusifs) affleurant sur le Territoire. Toutes les coupures topographiques IGN 1/50 000 n'ont pas été couvertes et, sur certaines, seules quelques formations géologiques choisies par avance ont fait l'objet de prélèvements ;
- toutes les anomalies mises en évidence lors de la phase stratégique n'ont pas fait l'objet d'un suivi tactique approfondi. Les anomalies mal structurées, ou manquant d'intensité, ou non connectées à une structure géologique facilement identifiable ont été rejetées assez rapidement ;
- ces choix ont été guidés à la fois par des problèmes de coûts, par les modèles métallogéniques en vigueur à l'époque et par les objectifs assignés à l'Inventaire.

Revisiter l'Inventaire avec (i) des modèles métallogéniques renouvelés, (ii) la possibilité de croiser spatialement différents types d'informations (e.g. géologie homogénéisée, couvertures géophysiques, couvertures géochimiques issues de différents programmes européens de recherche, etc.) non disponibles à l'époque et (iii) sous des optiques nouvelles résultant du développement de nouvelles technologies et des besoins qu'elles génèrent (e.g. métaux stratégiques ou critiques) semble donc être une tâche logique.

## **2.7. LES AUTRES DOCUMENTS ISSUS DE L'INVENTAIRE**

Nous aurons l'occasion au chapitre 4 de détailler la nature des principaux documents issus de l'Inventaire ; il s'agit surtout de bases des données « géochimiques », de cartes et de rapports « papier » sur lesquels ont été décrits les observations et les résultats des travaux à l'échelle de la carte au 1/50 000 et/ou du prospect.

A ces documents, il faut ajouter plusieurs synthèses, rédigées par le BRGM dans le cadre de ses activités pour le Comité de l'Inventaire minier métropolitain (*voir Annexe 1*) :

- les ressources minières françaises par substances. 14 volumes concernant Pb-Zn, W, Sn, Sb, Mn, Cu, Au, fluorine, barytine, S, Hg, talc, amiante, andalousite, rédigés entre 1978 et 1990 ;
- les synthèses régionales issues des travaux de l'Inventaire. 15 rapports relatifs à Nord Bretagne, Bassin de Châteaulin, Basse-Normandie, Saint-Georges-sur-Loire, Vendée Mauges, Plateau d'Aigurande, Granite de Meymac, Pontgibaud, Sud Limousin, Argentat-Châtaigneraie, District de Brioude-Massiac, Cévennes, Montagne Noire et Pyrénées orientales, effectués à la fin de l'Inventaire ;
- la carte minière de la France métropolitaine, à l'échelle du 1/1 000 000 et sa notice explicative, situation 1993-1994.

En 2002, le BRGM a publié une synthèse portant sur l'Inventaire minier de la France métropolitaine (Deschamps *et al.*, 2002) listant les principaux gîtes ou gisements découverts ou valorisés dans le cadre de cette opération (voir encadré ci-dessous).

### Liste des principaux gîtes ou gisements découverts et/ou valorisés dans le cadre de l'Inventaire (Deschamps *et al.*, 2002)

- **pour or**, le gisement de **Lopérec** (29), représentant 4 t de métal contenu à près de 8 g/t Au. À un stade plus amont, on citera la découverte d'un véritable district aurifère associé à la faille d'Argentat (**Grand Fraud**, **La Planchette**, **Les Angles**, etc.) et de plusieurs districts à minéralisations mésothermales dans le Massif Armoricain,
- **pour métaux de base**, les amas sulfurés de : **La-Porte-aux Moines** (22), 1,9 Mt à 7,8 % Zn et 1,7 % Pb et **Bodennec** (29), avec 2,1 Mt à 2,9 % Zn et 1,1 % Cu ; les gîtes exhalatifs sédimentaires pyrénéens d'**Arrens** (65), 130 000 t Zn et 30 000 t Pb, 3 Mt BaSO<sub>4</sub> et **Banciole** (Zn, Pb) ; les minéralisations à métaux de base et précieux de la province volcano-sédimentaire de Saint-Georges-sur-Loire (**La Haie-Claire** et **Le Plessis**, 44),
- **pour antimoine**, le gisement des **Brouzils** (85), qui a fait l'objet de travaux miniers et d'une exploitation pilote de 1988 à 1992 (895 t Sb produites, ressources de 9 250 t Sb à 6,7 %) ; toujours en Vendée, on peut citer les prospectes de **La Baussonnière** et de **Mesnard-la-Barotière**, où l'antimoine est accompagné d'or,
- **pour tungstène**, les skarns de **Fumade** (81), représentant un potentiel de 10 à 14 000 t de WO<sub>3</sub> à teneur de 1% et de **Coat-an-Noz** (22), avec 11 000 t WO<sub>3</sub> à 1%, ainsi que la coupole de **Neuf-Jours** (19),
- **pour étain** (avec plus ou moins de tungstène) et métaux rares (Li, Ta-Nb, Be), le gîte **Tréguennec** (29) de caractéristiques voisines du gîte d'**Echassières** (03), représentant un potentiel de 5 400 t Sn, 1 600 t Ta, 1 300 t Nb, 66 000 t Li<sub>2</sub>O et 2 800 t Be. On peut ajouter le gîte de **Lanmeur** (29), avec 5 000 à 6 000 t Sn, accompagné de cuivre,
- **pour molybdène** : le gîte porphyrique de **Beauvain** (61), avec une estimation de 60 000 t Mo à basse teneur,
- **pour fluorine et barytine**, les prospectes filoniens des **Renauds** (58) (430 000 t BaSO<sub>4</sub> et 120 000 t CaF<sub>2</sub>) et d'**Ambierle** (42) (minimum 150 000 t BaSO<sub>4</sub>).

L'**inventaire charbonnier** a également contribué à ce renouvellement des connaissances, avec deux découvertes significatives :

- l'important gisement de charbon de **Lucenay-les-Aix** (58) : 250 Mt sous moins de 400 m de recouvrement,
- le gros gisement de lignite en subsurface de **Mézos-Onesse** (40) : 165 millions de m<sup>3</sup>.

Beaucoup plus récemment, en 2010, le BRGM a été mandaté par le MEEDDM pour réaliser des panoramas du marché de 14 substances (ou groupes de substances) afin de déterminer la vulnérabilité de la France vis-à-vis de Sb, Be, Ga, Ge, graphite, Li, Mo, Nb, Re, Se, Ta, Te, W et terres rares. Ces documents informent également sur les sources d'approvisionnement et le potentiel du sous-sol français.



### 3. Les principaux sujets miniers en France métropolitaine

L'objectif de l'Inventaire minier était de fournir à la Profession des sujets à un stade relativement « amont » de la prospection, et susceptibles d'être développés par la société qui en obtenait les droits miniers. Entre 1975 et 1992, une centaine de sujets miniers nouveaux ont ainsi été présentés. À cela il faut ajouter les sujets non issus de l'Inventaire, découverts avant ou sur des financements différents. Ils font également partie du patrimoine minier national. Au total, plus d'une centaine de sujets sont pris en compte dans ce travail préliminaire de sélection.

L'intérêt d'un sujet minier est fonction de nombreux paramètres, parmi lesquels :

- l'attrait économique de la substance et son importance vis-à-vis de l'industrie nationale ;
- le degré de reconnaissance des indices et/ou gisements ;
- le contexte géologique régional et la possibilité de mettre rapidement en évidence des ressources additionnelles.

Cette sélection s'appuie bien naturellement sur les travaux de synthèse effectués antérieurement : Péliissonnier (1995), Béziat et Bornuat (1995), Gentilhomme et Deschamps (2001), Deschamps *et al.* (2002).

#### 3.1. INTERET ECONOMIQUE DES PRINCIPALES SUBSTANCES RECONNUES SUR LE TERRITOIRE

Le sous-sol français est riche en plusieurs substances attractives sur le plan industriel (métaux d'alliage, minéraux industriels, métaux de base, métaux rares et métaux précieux), pour certaines desquelles il subsiste une filière industrielle au niveau national et/ou européen.

##### 3.1.1. Tungstène

Vital pour les industries mécaniques, ce métal d'alliage est traditionnellement utilisé en raison de sa dureté élevée et de sa résistance à la chaleur. Plusieurs sociétés françaises sont impliquées dans la transformation à partir de produits importés ou de recyclage : *Eurotungstène* et *Erasteel* (filiales d'*Eramet*), *Saint-Gobain*, *Plansee Tungsten Alloys* (anciennement *Cime Bocuze*), etc. Une récente étude de marché (Audion et Labbé, 2012) conclut à une forte criticité sur les approvisionnements et à une importance économique « très forte » du tungstène pour l'industrie française.

Des ressources en terre atteignant ou dépassant 5 000 t de WO<sub>3</sub> sont identifiées en France avec :

- le district de Fumade – Montredon – Labessonnié dans le Tarn, et celui de Coat-an-Noz en Bretagne ;
- la mine de Salau, en Ariège, à teneur élevée, dont l'exploitation a cessé en 1986 non pas par manque de réserves mais à la suite de la chute des cours ;
- le district d'Echassières - Les Montmins dans l'Allier ;
- le district de la Châtaigneraie, aux confins du Cantal et de l'Aveyron, avec les gisements de Leucamp et d'Engualès.

### 3.1.2. Antimoine

La France a une longue tradition minière et métallurgique avec ce métal. Aujourd'hui, l'antimoine est surtout utilisé pour ses qualités d'ignifugeant dans les plastiques et dans la fabrication des PVC. La France conserve une place importante dans l'UE, avec la *Société des Produits Chimiques de la Lucette* (SPCL) et la *Société Industrielle et Chimique de l'Aisne* (SICA) ; ces sociétés figurent parmi les principaux producteurs mondiaux de composés antimonieux, à partir de concentrés aujourd'hui importés de Chine. Les risques sur les approvisionnements en antimoine sont évalués à 4/5, et la criticité économique de la filière à 3,5/5 (Audion, 2011).

La France est aujourd'hui totalement dépendante de la Chine mais son potentiel en minerai est réel. Elle dispose de ressources principalement situées en Bretagne avec le district de La Coefferie<sup>4</sup> (ressources évaluées à 5 000 t de Sb, valorisées par 2 t d'or) et en Vendée avec le gisement des Brouzils (réserves prouvées de 4 500 t métal, tentative d'exploitation en carrière par l'*Entreprise Gagneraud* au milieu des années 1990). Ces ressources peuvent paraître modestes, mais elles sont similaires à celles des gisements exploités dans le monde : faisceau de filons de petite taille, d'épaisseur métrique et d'extension hectométrique.

### 3.1.3. Niobium et tantale

Dans la nature, niobium et tantale sont étroitement associés. Ils se rencontrent dans les complexes alcalins, carbonatites et leucogranites enrichis en Sn, W et U, mais également dans les placers issus de l'altération supergène des gîtes précédents.

Environ 90 % de la consommation mondiale du niobium se retrouve dans la fabrication de l'acier, le reste va à la production de superalliages, aux applications de super-conductivité et aux applications médicales. Les qualités du niobium en font une matière première stratégique considérée comme indispensable. Les usages du tantale se sont considérablement développés à partir des années 1970 avec l'électronique pour la fabrication des condensateurs. Il est également utilisé dans la conception des superalliages pour les moteurs d'avion, les turbines à gaz, les réacteurs nucléaires, les équipements industriels exposés aux hautes températures et à la corrosion, etc.

*Eramet*, *Arcelor Mittal* et *Vallourec* sont les principaux utilisateurs de ferroniobium en France ; ils se fournissent auprès du brésilien *CBMM*, qui produit 80 % du niobium mondial. Les principaux utilisateurs français/européens de tantale sont *Firadec*, *Snecma/Safran* et *Airbus*. Pour tous, ces métaux stratégiques sont considérés comme critiques, car ils sont difficilement substituables dans leurs différents domaines d'utilisation, même si les quantités nécessaires sont modestes.

La France a une petite production indirecte, puisque *Kaolins de Beauvoir*, filiale du Groupe *Imerys*, produit un concentré à Sn-Ta-Nb, en co-produit de l'exploitation des kaolins d'Échassières (03). D'autres potentialités existent en métropole, notamment avec le gisement de Tréguennec (29) dont la teneur en Ta est élevée. Son potentiel est évalué à 3 000 t de Nb-Ta, 5 400 t de Sn, auquel il faut ajouter des minéraux de Be et Li. Un inventaire du potentiel Nb-Ta de la Guyane est également actuellement à l'étude.

---

<sup>4</sup> Non cité dans la synthèse de Deschamps *et al.* (2002, voir encadré), probablement parce qu'il s'agit d'un district.

#### 3.1.4. Molybdène

Les ferro-alliages représentent 80 % de l'utilisation mondiale du molybdène, et son utilisation tend à se développer dans la filière électronique et les réfractaires. Les gisements les plus fréquents sont de type « porphyre », à Cu-Mo ou à Mo seul. Il s'agit de gisements à gros tonnage et basse teneur, exploités par mine à ciel ouvert.

À Beauvain, dans l'Orne, l'Inventaire a mis en évidence les racines d'un porphyre à Mo, dont le potentiel est évalué à 250 Mt @ 0,02-0,03 % Mo.

#### 3.1.5. Fluorine

Cette substance naturelle non métallique trouve de nombreuses applications dans la sidérurgie, la métallurgie de l'aluminium, la verrerie, la cimenterie, la fabrication de matières plastiques, de solvants, de fluides frigorigènes, etc. Jusqu'en 2006, date d'arrêt des dernières mines françaises (Le Burg et Montroc, dans le Tarn), l'industrie de la fluorine a représenté un chiffre d'affaire annuel d'environ 15 M€, mais seules de grandes compagnies tel que *SOGEREM/SECME*, filiales de *Péchiney-ALCAN*, ont pu résister à la concurrence chinoise (Féraud, 2008).

La France dispose d'importantes ressources, principalement constituées par les gisements stratiformes du Morvan : Antully (5,3 Mt @ 34 % CaF<sub>2</sub>), Pierre-Perthuis, Egreuil et Marigny-sur-Yonne (8 Mt @ 33 % CaF<sub>2</sub>), Courcelles-Fré moy (2,5 Mt @ 36 % CaF<sub>2</sub>). Jusqu'à présent, la mise en exploitation de ces gisements a été pénalisée par des contraintes environnementales et par une opinion publique peu favorable à l'industrie. Mais les mentalités évoluent, la société *GARROT-CHAILLAC* vient de reprendre l'exploration par sondages du gisement d'Antully, dans la forêt de Planoise. Elle compte réaliser une centaine de sondages courts, dans le but de certifier la ressource d'un panneau minéralisé représentatif, et procéder à des essais de concentration du minerai.

#### 3.1.6. Barytine

Les forages d'exploration et de production d'hydrocarbures absorbent environ 90 % de la production mondiale de barytine. Ce simple chiffre suffit à indiquer toute l'influence que la conjoncture pétrolière -et gazière- peut avoir sur la demande en barytine. La dernière mine française, Chaillac, exploitée par une filiale du groupe *Solvay*, a fermé par épuisement des réserves en 2006 après avoir fournis 3 Mt de barytine de qualité « chimique ».

Les principales ressources démontrées par l'Inventaire correspondent à des minéralisations stratiformes associées au gîte de type « Sedex » d'Arrens (Hautes-Pyrénées) dont le potentiel est évalué à 3 Mt. Une ressource de l'ordre de 0,9 Mt est également associée à l'amas sulfuré Zn-Cu de Chessy (Rhône). Par ailleurs, il faut tenir compte des gisements filoniens des Renauds, dans le Morvan, et d'Ambierle, dans le Forez, où l'on annonce une ressource d'environ 0,5 Mt sur chacun des gîtes.

#### 3.1.7. Terres rares

La vulnérabilité de la France vis-à-vis de ces substances est très forte : les terres rares entrent dans la fabrication de nombreux produits (téléviseurs, disques durs, batteries, catalyseurs, etc.) et sont devenues indispensables aux industries de pointe et à la Défense. La Société *Silcea*, filiale de *Rhodia* (groupe *Solvay*), est leader mondial dans la formulation de terres rares de très haute pureté.

Il existe un potentiel « terres rares » associé aux monazites grises des placers de la région de Grand-Fougeray, en Bretagne. Le sujet, découvert par le BRGM dans les années 1960 suite à de la prospection alluvionnaire, est à nouveau à l'étude.

### 3.1.8. Métaux de base : Pb – Zn – Cu

Dans les années 1990-2000, la fermeture des mines Pb-Zn de Saint-Salvy et des Malines, puis celle de la fonderie de Noyelles-Godault, ont entraîné la disparition du groupe *Metaleurop*, héritier de la célèbre *SMM Peñarroya*, qui pendant un demi-siècle a assuré la production minière Pb-Zn française. Aujourd'hui, *Metaleurop*, renommée *Recylex*, est dépendante du groupe suisse de négoce de matières premières *Glencore*.

Le potentiel français en Pb-Zn-Cu reste important, avec plusieurs gisements de type amas sulfurés (VMS), qui sont restés au stade de projet :

- Chessy, dans le Rhône, à Zn, Cu et Ba, dont les réserves sont évaluées à 5,4 Mt @ 9,0 % Zn, 2,3 % Cu et 14 % Ba ;
- Rouez, dans la Sarthe, dont le potentiel est évalué à plus de 70 Mt @ 0,6 % Cu, 1,5 % Zn, avec métaux précieux associés ; ce gisement est cependant pénalisé par une granulométrie fine (20-30 µm) des sulfures qui nécessitera un broyage fin du minerai ;
- Bodennec (2,1 Mt @ 1,2 % Cu, 2,9 % Zn) et La-Porte-aux-Moines (1,9 Mt @ 7,8 % Zn, 1,7 % Pb et 0,8 % Cu), en Bretagne.

La mise en exploitation de ces gisements reste dépendante des problèmes environnementaux qu'elle peut générer.

Il existe également dans les Pyrénées centrales une province à Zn, de type exhalatif-sédimentaire (Sedex), autrefois reconnue par la *SMMP*, la *SNEA(P)* et le *BRGM*. Elle englobe les gisements de Carboire (1,6 Mt @ 7 % Zn), Bentaillou, Pierrefite et Nerbiou. La barytine est localement présente (Arrens), et l'existence de métaux rares tels que In et Ge, n'est pas à écarter.

L'Inventaire a également permis d'accrocher des gisements filoniens, comme Guerdérien en Bretagne, qui se singularise par une teneur de 20 % Zn en sondage, mais qui reste mal reconnu.

### 3.1.9. Métaux précieux : or et argent

À partir des années 1980, l'Inventaire s'est réorienté sur l'or dont le cours était élevé. Beaucoup de sujets ont été alors présentés à la profession, souvent à un stade très « amont » de la prospection. Il s'agit d'indices dont l'ampleur n'est pas connue et où l'or est associé des sulfarséniures, ce qui, pour des raisons environnementales, en limite beaucoup l'intérêt.

Aujourd'hui, les cours très élevés de l'or et de l'argent devraient permettre de relancer l'exploration, au moins sur les sujets les plus prometteurs. D'autre part, il faut signaler que l'or et l'argent restent des sous-produits permettant de valoriser les concentrés à Sb, Pb et Cu de certains gisements.

### 3.1.10. Bauxites réfractaires

La France, pionnière de l'industrie minière et métallurgique de l'aluminium, a joué à travers le groupe *Péchiney-Ugine-Kuhlman*, un rôle mondial important dans l'histoire de l'aluminium.

Entre 1885 et 1991, le territoire national a produit plus de 100 Mt de bauxites, principalement à partir des districts de Brignoles, dans le Var, et de Villeveyrac, dans l'Hérault.

En France, l'exploitation des bauxites en tant que minerai d'aluminium, a cessé au début des années 1990. Par contre, l'exploitation de certaines bauxites se poursuit au titre de produits réfractaires, notamment pour les cimentiers. Pour être de qualité « CAC » (Calcium Aluminates Cement), les bauxites réfractaires doivent présenter des qualités chimiques très spécifiques, basées sur leur contenu en  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  et  $SiO_2$ . La société *Kerneos*, héritière de *Ciment Fondu* et de *Lafarge Aluminates*, est aujourd'hui leader mondial dans la technologie des aluminates de calcium, avec un chiffre d'affaire de 360 M€ (<http://www.kerneos.com/>).

En métropole, la *Société d'Industrialisation et de Commercialisation de l'Association de Parents d'Enfants Inadaptés (SODICAPEI)* a repris l'exploitation des bauxites réfractaires des concessions de Villeveyrac et des Usclades, autrefois attribuées à *Alusuisse* et à *Péchiney*. *Vicat* est actionnaire à près de 50 % de la *SODICAPEI* ; la production annuelle est d'environ 150 kt et la ressource est évaluée à 25 Mt.

D'autre part, la société *GARROT-CHAILLAC* est titulaire de deux autorisations d'exploitation sur le territoire national :

- l'une pour la reprise des haldes de bauxite sur les communes de Bédarieux, Pézènes-les-Mines et Carlencas (Hérault), à raison de 40 kt/an. L'exploitation est active depuis 1983 ;
- la seconde pour l'exploitation par MCO de la concession de l'Arboussas, sur la commune de Pézènes-les-Mines, au rythme moyen de 60 kt/an. L'autorisation d'exploitation est valide jusqu'en 2032.

Sur le territoire métropolitain, il existe sans aucun doute d'autres sites où des bauxites de qualité réfractaire pourraient être exploitées.

### **3.1.11. Uranium (pour mémoire)**

Aujourd'hui, l'uranium est exclusivement du domaine de compétences d'*Areva*, anciennement *COGEMA*. La principale ressource connue, et encore non exploitée sur le territoire national, correspond au gîte de Coutras, en Aquitaine, où la *COGEMA* a mis en évidence un potentiel de 20 kt d'uranium à teneur de 0,1 %. Malgré son tonnage important, ce gisement n'a jamais été exploité en raison de ses faibles teneurs et de son environnement géographique sensible.

### **3.1.12. Charbon, lignite (pour mémoire)**

L'activité industrielle dérivant du charbon – production d'électricité, cokeries, chauffage – reste significative. En 2011, la France a importée 9,8 Mep de charbon, en provenance des États-Unis, de Colombie, d'Australie, de Russie et d'Afrique du Sud. Cette consommation de charbon représente encore 6 % de la consommation énergétique, ce qui était déjà le cas dans les années 1990. La dernière mine de charbon a fermé il y a moins de 10 ans (La Houve en Lorraine) pour des raisons de rentabilité.

Il subsiste en France un potentiel charbonnier important. Les gisements de Lucenay-les-Aix (200 Mt de charbon) et de Mezos (160 Mt de lignite) en sont deux exemples, découverts et développés dans le cadre de l'inventaire des années 1980.

### 3.1.13. Schistes bitumineux (pour mémoire)

Les schistes bitumineux sont des roches sédimentaires contenant du kérogène extractible par pyrogénéation, à une teneur minimale de 40 l/t. Autun, dans le Morvan, est le berceau de l'industrie schistière : l'exploitation industrielle des schistes bitumineux pour produire des huiles minérales y a démarré en 1837 et s'est poursuivie jusqu'en 1957.

Dans le cadre de l'Inventaire, des études ont été réalisées pour estimer le potentiel et les procédés de mise en valeur des schistes bitumineux de l'est du bassin de Paris (pilote industriel de Féocourt) et des bassins permien du nord-est du Massif Central.

Aujourd'hui, ces études sont à réexaminer dans le cadre d'une politique beaucoup plus générale destinée à faire le point sur le potentiel en hydrocarbures des schistes, et de leur mise en valeur.

## 3.2. INCIDENCE DU DEGRE DE RECONNAISSANCE SUR LE CHOIX DES GISEMENTS SELECTIONNES

Nous l'avons mentionné en introduction : l'Inventaire avait pour objectif de sélectionner des cibles d'intérêt, à charge de la société intéressée par le sujet d'y développer les recherches afin de confirmer ou infirmer sa valeur.

Il est certain que l'on attribuera plus d'intérêt à un sujet qui sera à un stade de développement avancé, et qui aura passé avec succès toutes les étapes préliminaires de reconnaissance. Cela ne veut cependant pas dire qu'un sujet très peu développé ne puisse pas se révéler au final de qualité bien supérieure à celui qui aurait franchi les différentes étapes : pour cela l'expertise du géologue-gîtologue reste primordiale. À charge de ce dernier de convaincre sa compagnie de lui octroyer les financements nécessaires de manière à bien étayer et mener à terme sa réflexion !

La qualification des ressources-réserves est aujourd'hui normalisée, et fait l'objet de procédures assez strictes pour en définir la terminologie. Cette terminologie tient compte de la densité d'informations, de la bonne répartition et représentativité des sondages, de la fiabilité et du contrôle de l'échantillonnage, de la qualité des analyses, etc. Les pays anglo-saxons ont défini des procédures qui font aujourd'hui « références » auprès des organismes financeurs : code JORC pour les australiens, rapport NI43-101 pour les canadiens, rapport SAMREC pour les sud-africains.

À l'époque de la réalisation des travaux de l'Inventaire, cette obligation n'était pas aussi stricte, même s'il existait déjà une terminologie fondée sur la densité des travaux menés et le professionnalisme avec lequel ils étaient réalisés. Aujourd'hui, il convient d'être prudent dans la manière de qualifier les chiffres annoncés afin de ne pas créer d'ambiguïtés. Par ordre croissant de degré de reconnaissance, on parlera de :

- « potentiel géologique » lorsqu'il s'agit d'une estimation préliminaire, basée sur des raisonnements gîtologiques, tenant compte de l'environnement géologique, structural, minéralogique de l'indice et de la présence d'éléments comparables à des gisements connus ;
- « ressources » lorsque l'enveloppe minéralisée fait l'objet d'estimations chiffrées, basées sur des tranchées, des sondages, voire même des travaux miniers de reconnaissance. Les ressources sont qualifiées de « possibles » (ou inférées), « indiquées » et « mesurées » en fonction de la quantité, de la qualité et du détail des travaux réalisés. À titre d'exemple, on va ainsi resserrer la maille de sondages afin de certifier des ressources indiquées en ressources mesurées ;

- « réserves » lorsque l'on aura fait la preuve de l'exploitabilité technique et économique d'une partie des ressources, au terme d'une étude de préfaisabilité, ou mieux de faisabilité. Là encore, il existe des qualificatifs pour les réserves, qui, en fonction du degré de précision seront « probables » ou « prouvées ».

### **3.3. CONTEXTE GITOLOGIQUE ET POSSIBILITE DE METTRE EN EVIDENCE DES RESSOURCES ADDITIONNELLES A DES GISEMENTS DEJA IDENTIFIES**

L'intérêt d'un gisement se juge également à la possibilité de découvrir des ressources additionnelles dans l'environnement relativement proche du site d'exploitation. Nous avons également retenu ce critère pour sélectionner les gisements et/ou indices. La notion de « districts miniers » (basée notamment sur le contexte gîtologique) est connue et utilisée depuis longtemps. Quel que soit le pays, elle a fait ses preuves à de nombreuses reprises (Routhier, 1980). Aujourd'hui les outils SIG permettent de faire facilement les superpositions de fonds géologiques, géophysiques, géochimiques, imagerie satellitaire, cartes de gisements et indices, etc. qui permettent de caractériser les districts.

On regrette cependant, à l'échelle de la Métropole, l'absence d'une couverture de géophysique aéroportée systématique qui permettrait de définir la signature « profonde » des gisements et indices connus, orienter les recherches et, sans aucun doute, retrouver des objets similaires en d'autres secteurs. Tous les pays « miniers » (Canada, Australie, Afrique du Sud, etc.) se sont dotés depuis longtemps de ce type d'information, et le réactualisent en fonction de l'évolution rapide et de plus en plus performante des techniques géophysiques. Cette absence de couverture géophysique résulte largement des choix faits lors de la réalisation de l'Inventaire (cf. paragraphe 2.1). La réalisation d'une couverture géochimique a été guidée par la volonté de caractériser rapidement les cibles potentielles. Les données produites n'autorisent hélas qu'une vision très superficielle et partielle du potentiel minier du territoire national.

### **3.4. NOUVELLE HIERARCHISATION DES SUJETS MINIERES EN FRANCE METROPOLITAINE**

Compte tenu des éléments présentés ci-dessus, nous avons hiérarchisé les sujets en trois catégories de priorité, en fonction de leur réponse aux trois critères d'évaluation précédemment développés :

- intérêt économique du sujet dans le contexte actuel ;
- état d'avancement des connaissances sur le potentiel géologique du sujet ;
- localisation du sujet dans un district minier connu.

Les trois classes de priorité sont définies de la manière suivante :

- priorité 1 : sujet répondant favorablement aux critères d'évaluation ;
- priorité 2 : sujet ne répondant que partiellement, dans l'état actuel des connaissances, aux critères d'évaluation ;
- priorité 3 : sujet ne répondant pas, dans l'état actuel des connaissances, aux critères d'évaluation.

Les sujets que nous avons classés en priorité 1 ou 2 sont listés dans le *Tableau 1* ci-dessous, et l'ensemble des sujets, identifiés par substance et classe de priorité, est représenté sur la *Figure 3* ci-dessous. Il est important de noter que **cette hiérarchisation n'est pas figée et définitive. Elle résulte de l'état actuel des connaissances et pourra évoluer dans le futur.**

Ainsi, un sujet aujourd'hui classé en priorité 3 pourrait potentiellement, à la suite par exemple d'acquisition de nouvelles données, voir son intérêt réévalué et être ultérieurement reclassé en priorité 2, voire 1.

Priorité	Nom	Département	Substances
1	Antully	Saône et Loire	F, Ba
1	Arrens	Hautes-Pyrénées	Ba, Zn, Pb
1	Chessy-les-Mines	Rhône	Zn, Cu, Ba
1	Courcelles-Fré moy	Saône et Loire	F, Ba
1	Echassières	Allier	Sn, W, Li, Ta, Nb
1	Egreuil	Nièvre	F, Ba
1	Fumade	Tarn	W
1	Pierre-Perthuis	Yonne	F, Ba
1	Rouez	Sarthe	Pyr, Cu, Au
1	Salau	Ariège	W
1	Tréguennec	Finistère	Sn, Ta, Nb, Li, Be
2	Ambierle	Loire	Ba, F
2	Auxelles-Haut	Territoire de Belfort	W
2	Banciole	Hautes-Pyrénées	Zn, Pb
2	Beauvain	Orne	Mo, Cu, Zn, Pb, Au, Ag
2	Bentaillou	Ariège	Zn, Pb, Ag
2	Bodennec	Finistère	Zn, Cu, Pb, Ag
2	Carboire	Ariège	Zn, Pb
2	Coat-an-Noz (A)	Côtes d'Armor	W, Mo, Cu
2	Coat-an-Noz (B)	Côtes d'Armor	W, Fe, Cu
2	Costabonne	Pyrénées Orientales	W
2	Coutras	Gironde	U
2	Engualès	Aveyron	W
2	Estables	Haute-Loire	Ba, F
2	Ferrières	Tarn	W
2	Gareillas	Haute-Vienne	Au, Ag, As
2	Guerdérien	Côtes d'Armor	Zn, Pb, Ag
2	Kerhuo	Morbihan	Zn, Pb, Ag
2	La Baussonnière	Vendée	Sb
2	La Bunoudière	Orne	Au, Ag, Zn, Pb
2	La Coëfferie	Ille et Vilaine	Sb, Au
2	La Croix-de-Pallières	Gard	Pb, Zn, Ge
2	La Haie-Claire	Loire Atlantique	Zn, Au, Ag
2	La Petite-Faye - Lurat	Creuse	Au, As
2	La Porte-aux-Moines	Côtes d'Armor	Zn, Cu, Pb, Ag
2	La Télachère	Vendée	Sb, Au
2	Lanmeur	Finistère	Sn, Cu, Ag, Bi
2	Le Coudreau	Mayenne	Au, As
2	Le Grand-Fraud	Lot	Au, As
2	Le Monteil d'Entraigues	Corrèze	Ba, Pb, Ag
2	Le Serre	Aveyron	Pb, Zn, Ag
2	Les Brouzils	Vendée	Sb
2	Les Peyrouses	Puy de Dôme	Pb, Ag, Sn, Cu
2	Les Praciaux	Puy de Dôme	Ag, Pb, Zn, Au
2	Les Renauds	Nièvre	Ba, F
2	Leucamp	Cantal	W

Priorité	Nom	Département	Substances
2	Lopérec	Finistère	Au, As
2	Lucenay-les-Aix	Allier	Charbon
2	Mesnard-La-Barotière	Vendée	Au, Sb
2	Mézos	Landes	Lignite
2	Montebras	Creuse	Sn, Nb, Ta
2	Montredon-Labessonnié	Tarn	W
2	Nord-Ussel	Corrèze	Au, Sb
2	Pen Pourri - Ourdégon	Hautes-Pyrénées	Zn, Pb, Ag
2	Pierrefitte	Hautes-Pyrénées	Zn, Pb, Ba
2	Puy-les-Vignes	Haute-Vienne	W, Sn
2	Rosnoen	Finistère	Sb
2	Sussac	Haute-Vienne	Sn, Zn, Cu
2	Teilary	Pyrénées Atlantiques	Zn, Pb
2	Villeranges	Creuse	Au, Sb

*Tableau 1 - Liste des sujets miniers français classés en priorité 1 ou 2 dans le cadre de la présente étude.*

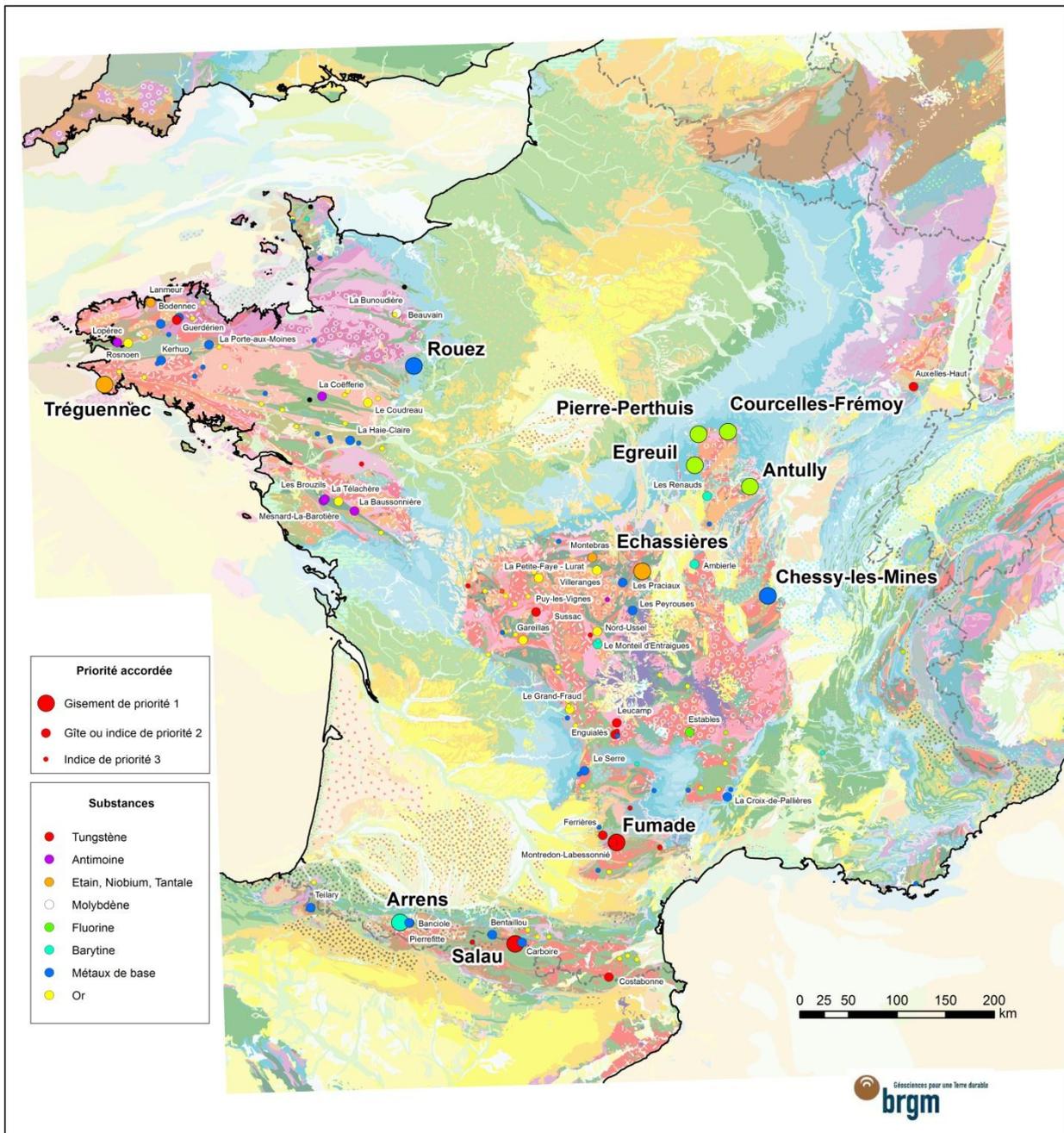


Figure 3 - Représentation géographique des sujets miniers français sélectionnés dans la présente étude, codés par substance et classe de priorité (hors substances énergétiques).

## 4. Les données de l'Inventaire minier

### 4.1. CONSTITUTION D'UNE BASE DE METADONNEES GEOGRAPHIQUES DES TRAVAUX DE GEOCHIMIE

Les résultats des travaux menés par les anciennes Divisions Minières du BRGM, dans le cadre de l'Inventaire minier, étaient consignés dans des notes techniques référencées ou inédites, des rapports BRGM et sous forme de fichiers numériques. Sauf exceptions, seuls les rapports étaient expédiés sur le site central du BRGM à Orléans. Par conséquent, le nombre total de notes et rapports relatifs à l'Inventaire reste à ce jour indéterminé. Étant donné le grand nombre de données, l'hétérogénéité des divers supports de stockage (qui ont dû suivre l'évolution des procédés d'archivage informatique), les transformations de format et l'absence des fichiers d'origine, les données connues de géochimie (« sédiments de ruisseau » et « alluvionnaire ») ont été regroupées par A. Lambert (2005) dans une base de données, mais qui reste incomplète. Les résultats de prospection géochimique sédiments de ruisseau inclus dans la base de données unique concernent 284 435 échantillons. La base a été complétée par 58 632 résultats analytiques correspondant au même type de prospection effectué par la SNEA(P), et qui ont été fournis au BRGM. La base de données ainsi constituée contient à ce jour un total de 343 067 échantillons de sédiments de ruisseau, ainsi que 96 924 échantillons de géochimie alluvionnaire. Il n'existe à ce jour aucune métadonnée relative à cette base, et c'est l'objectif du travail présenté ci-dessous.

#### 4.1.1. Les sources de données disponibles

Il existe *a priori* quatre sources de données disponibles pour constituer les couches de métadonnées :

- les rapports et notes techniques ;
- le fichier d'Index des anciens fichiers informatiques du BRGM ;
- la base de données bibliographique interne de la bibliothèque du BRGM ;
- la base de données Lambert (2005), hébergée sur les serveurs du BRGM.

#### ***Les rapports et notes techniques***

La reprise et l'indexation un à un des rapports et notes techniques est à l'évidence la meilleure approche, apportant en plus une vérification qualitative des données. Cependant, c'est une tâche longue qui n'a pu être mise en œuvre dans les délais impartis, d'autant plus que l'essentiel des notes techniques issues des anciennes divisions minières sont localisées dans les archives des directions régionales du BRGM.

#### ***Le fichier d'Index des anciens fichiers informatiques (Système VAX) du BRGM***

Le fichier d'Index de l'ancien système informatique du BRGM (système VAX) a été réalisé juste avant son démantèlement. Le fichier d'origine, au format texte, a été converti au format Excel pour le présent travail. Il contient une liste de 6 441 fichiers inclus dans les répertoires de travail et qui ont été sauvegardés. Ce chiffre ne correspond pas à l'intégralité des travaux réalisés dans le cadre de l'Inventaire car certaines bandes magnétiques, dégradées par le temps étaient devenues illisibles, entraînant la perte d'une partie des données brutes. L'index est renseigné

par quatre champs (*Figure 4*) : le nom du fichier, le pays d'où viennent les données, le type de travail (Alluvionnaire, Stratégique, Sondage, Tactique, Divers) et un champ libre qui peut contenir des indications sur la date de l'étude, le numéro de rapport associé, l'auteur, etc.

	A	B	C	D
607	ARCHA.SRB	FEFRANCE	STRA	STRA 6-NOV-91DEX002SYNTHESE ARGENTAT-LA CHATAI. 1991 base synergie va avec archa.b2d
608	ARCHA.SRD	FEFRANCE	STRA	STRA 6-NOV-91DEX002SYNTHESE ARGENTAT-LA CHATAI. 1991 .voir ARCHA.SRB ET ARCHA.B2D
609	ARCHAAL.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA 6-NOV-91DEX002SYNTH ARGENTAT-LACHATAIGNERIAE ALLUVIONNAIRE 1991 A.LAMBERT
610	ARDENNES.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA22-SEP-94DEX0073 FEUILLES DES ARDENNES
612	ARGENTAN.GEO	FEFRANCE	STRA	STRA 9-NOV-89V1725 GEOLOGIE FEUILLE ARGENTAN OCTOBRE 1989
613	ARGENTAN.RES	FEFRANCE	STRA	STRA 9-NOV-89V1725 RESEAU FEUILLE ARGENTAN OCTOBRE 89
614	ARGENTAT.HAB	FEFRANCE	STRA	STRA19-APR-91V2305 RESEAU ET HABILL. DE ARGENTAT.SRB : INV.319 A.LAMBERT
615	ARGENTAT.SRB	FEFRANCE	STRA	STRA19-APR-91V2305 BASE SYNER. BRIVE ARGENTAT ST CERÉ INV. 139 AVRIL 91 A.LAMBERT
616	ARGENTAT.SRD	FEFRANCE	STRA	STRA19-APR-91V2305 BASE SYNERGIE DE BRIVE ARGENTAT ST CERÉ.RAPPORT INV. 319 AVRIL 91 A.LAMBERT
625	ARREAU.RES	FEFRANCE	STRA	STRA16-NOV-90V2303 ARREAU FEUILLE 1072 RESEAU INV.318
631	ASPET.RES	FEFRANCE	STRA	STRA16-NOV-90V2303 ASPET RESEAU INV.318
641	ATHEE.FIE	FEFRANCE	STRA	STRA16-DEC-87V1716 P E R VIEUVILLE SECTEUR ATHEE STRA 10ECH/KM2 AU ICP
650	AULUS.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA19-APR-88V1717 AULUS LES BAINS FEUILLE COMPLETE
654	AURILLAC.FIE	FEFRANCE	STRA	STRA30-JUN-87V1714 AURILLAC
688	BAGNERES.GEO	FEFRANCE	STRA	STRA11-OCT-85V376 BAGNERES DE LUCHON-GEOLOGIE-INV.268
689	BAGNERES.RES	FEFRANCE	STRA	STRA16-NOV-90V2303 RESEAU BAGNERES DE LUCHON INV.318
690	BAGNERESLU.B2	FEFRANCE	STRA	STRA24-OCT-88V1718 BAGNERES DE LUCHON
790	BBN.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA23-DEC-93DEX005SYNTHESE BRIOVERIEN NORD BRETAGNE R 31079 DAM DEX 90
811	BELLAC.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA 7-MAR-91V2304 BELLAC FEUILLE 639, PLASMA INV.80, 1491 ECHS.
812	BELLEISL.FIE	FEFRANCE	STRA	STRA18-NOV-83V367 BELLE ISLE EN TERRE IBM
820	BESHELE	FEFRANCE	STRA	STRA24-OCT-88V1718 BORDURE CEVENOLE BESSEGES-ST HIPPOLYTE ANOMALIES(ELEMENTS)
821	BESHSYEM	FEFRANCE	STRA	STRA24-OCT-88V1718 BORDURE CEVENOLE BESSEGES-ST HIPPOLYTE ANOMALIES(SYMBOLS)
825	BESSEGES.FIE	FEFRANCE	STRA	STRA10-JUL-87V1714 BESSEGES
974	BRETNU01.FIE	FEFRANCE	STRA	STRA27-OCT-83V365 VOLCANO SED BRETAGNE IBM
975	BRETOUEST.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA22-SEP-94DEX007BRETAGNE OUEST
977	BRIANCON.RES	FEFRANCE	STRA	STRA12-JUN-85V361 RESEAU BRIANCON INV.266
1080	BURZET1.RES	FEFRANCE	STRA	STRA28-MAY-86V379 RESEAU F.BURZET ET LANGOGNE 1986 INV.276
1167	CAMPAN.RES	FEFRANCE	STRA	STRA16-NOV-90V2303 CAMPAN (PETIT RESEAU) INV.318
1194	CARMAUX.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA26-SEP-88V1718 FICHER EXTRAIT DE -SWTARN.FIE SEPT.1988
1206	CEPONGLIE.FIE	FEFRANCE	STRA	STRA 9-JAN-84V370 CEE(79=81)FEUILLES PONTGBAUD BOURG LASTICSELECTION DE PHASES IBM
1207	CERET.FIE	FEFRANCE	STRA	STRA12-MAY-87V1714 CERET AVEC COMPLEMENT AU
1233	CHANAC.B2D	FEFRANCE	STRA	STRA25-APR-89V1722 CHANAC HEXAMINES
1234	CHANAC.BAS	FEFRANCE	STRA	STRA25-APR-89V1722 CF CHANAC.B2D
1235	CHANAC.DEC	FEFRANCE	STRA	STRA25-APR-89V1722 CF CHANAC.B2D

Figure 4 - Exemple du fichier d'Index de l'ancien système VAX. Noter l'hétérogénéité mais l'intérêt de l'information contenue dans la colonne D.

Une requête sur les paramètres France et stratégique indique **862** références. Ce fichier très hétérogène contient de nombreuses erreurs de localisation et devra être retraité avant d'être utilisable. Ce retraitement complexe n'a pu être effectué dans le cadre du présent travail mais pourra être envisagé dans ses développements ultérieurs.

### La base de données bibliographique interne de la bibliothèque du BRGM

Une requête, effectuée sur la base bibliographique des rapports de la bibliothèque du BRGM, a permis d'identifier 359 rapports consacrés à l'Inventaire minier de la France. Les résultats de cette requête ont été compilés dans un fichier Excel qui contient dix champs (« N° ISRN » ou « NT », « titre », « auteurs », « Année », « Département », « géographie », « mot\_cles », « numérisé », « collation », « status »). Ce fichier a été mis en forme et corrigé, puis les données ont été rassemblées dans une base Access (Metadonnées\_Rapports\_INV\_BRGM.mdb ; *Figure 5*) afin d'être plus facilement interrogées par le logiciel SIG ArcGIS.

### La base de données Lambert (2005)

Cette base de données est constituée de 16 tables avec les données de géochimie sédiments et de géochimie alluvionnaire du BRGM et de la SNEA(P) (*Figure 6*). La recherche et l'extraction des données peuvent se faire par numéro de carte géologique BRGM ou numéro de carte géographique IGN, par région, département ou commune, par type d'analyse, par élément chimique ou par code de terrain (détails et structure des tables in Lambert, 2005). De plus, un champ contient la partie abrégée du numéro de rapport BRGM duquel proviennent les données.

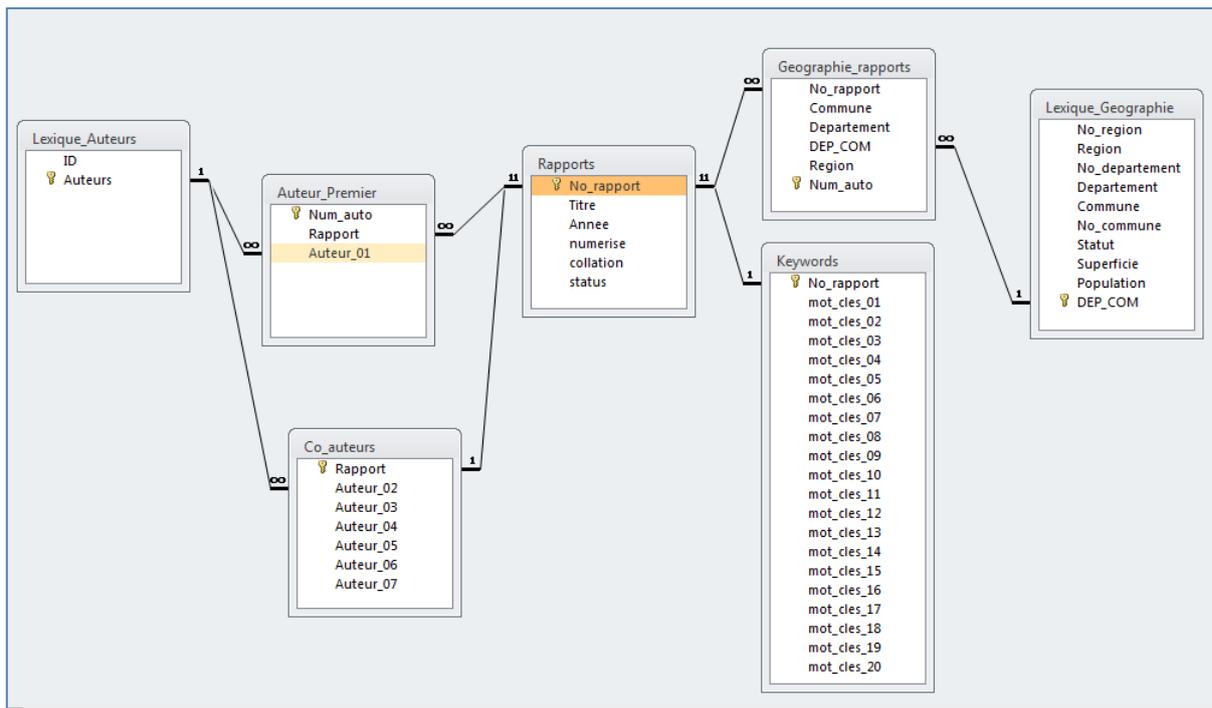


Figure 5 - Structure de la base de données des rapports consacrés à l’Inventaire et référencés à la bibliothèque centrale du BRGM.

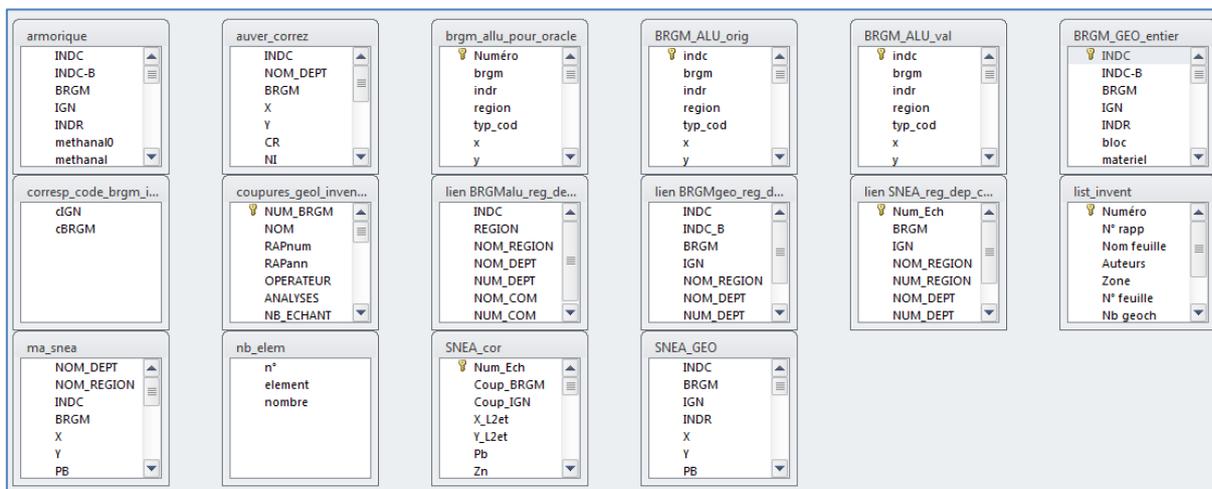


Figure 6 - Structure de la base de données Lambert (2005).

#### 4.1.2. Réalisation de la couche de métadonnées géographiques associée aux rapports

La réalisation de la couche de métadonnées géographiques associée aux rapports s’est faite en quatre étapes.

##### Première étape : géolocalisation des rapports

À partir des références issues de la bibliothèque du BRGM, un traitement a été effectué afin de localiser géographiquement la liste des rapports consacrés à l’Inventaire. Suivant l’information géographique disponible (information sur la commune et/ou le département et/ou la région)

chaque rapport a été associé à une emprise spatiale basée sur le découpage administratif de la France.

### Deuxième étape : géolocalisation des échantillons

À partir de la base de donnée Lambert (2005), une procédure de traitement a été mise au point afin d'associer les échantillons et résultats d'analyse au rapport dont ils proviennent (Figure 7). Pour chaque population d'échantillons associés à un rapport, un polygone contournant cette population a été généré. Ce polygone donne l'emprise géographique vraie du rapport associé. Malheureusement 60 200 des 284 435 échantillons de la base (soit 21 %) ne possèdent pas de numéro de rapport. Pour ces échantillons un polygone d'emprise géométrique maximale a été généré, qui est celui de la feuille de la carte géologique à laquelle ils appartiennent.

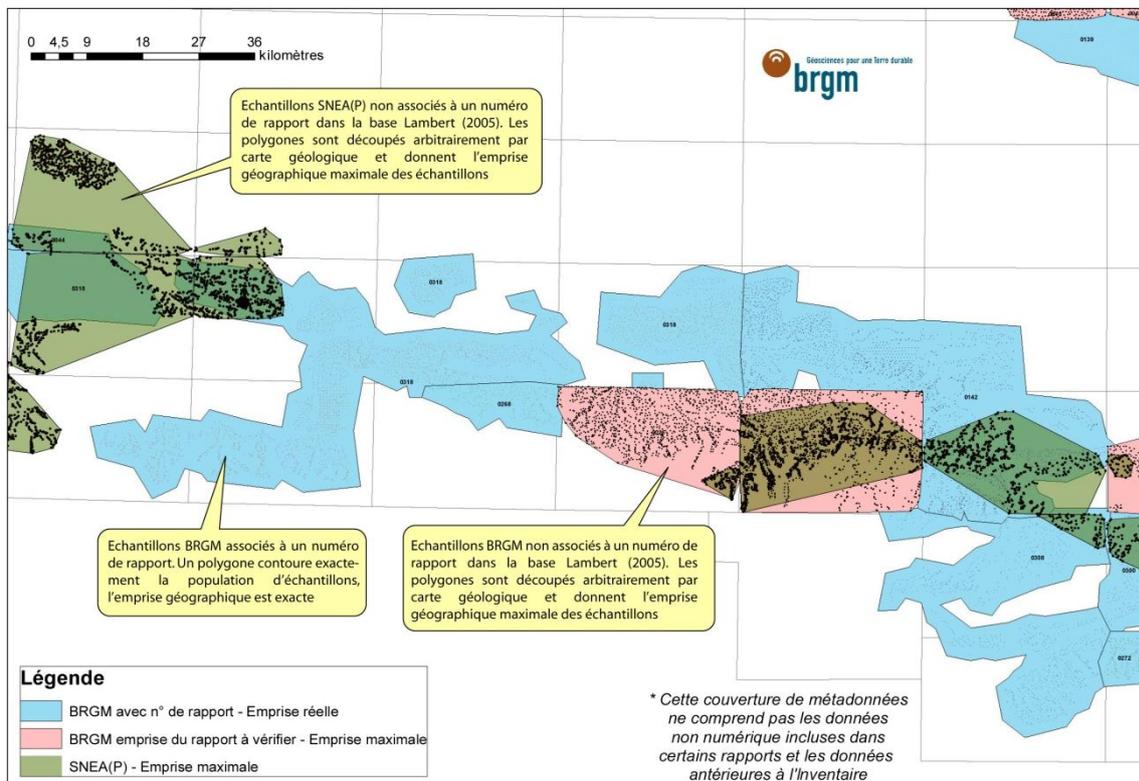


Figure 7 - Exemple de métadonnée relative à l'emprise géographique des échantillons (Pyrénées centrales et orientales).

### Troisième étape : croisement des emprises des rapports et des échantillons

Cette étape consiste en un croisement des emprises géographiques issues des étapes 1 et 2 (Figure 8). Elle a permis de valider définitivement l'emprise géographique de certains rapports (résultats identiques aux étapes 1 et 2). Elle a aussi permis de mettre en évidence un certain nombre de problèmes sur l'exhaustivité et le référencement des données, parmi lesquels nous citons les suivants :

- il existe de nombreux rapports intégrés dans la base Lambert (2005) et non référencés à la bibliothèque centrale du BRGM, ce qui implique que ces rapports devront être retrouvés (directions régionales ?) avant d'être exploités ;

- il existe des rapports apportant des nouvelles données (titre explicite) et dont le numéro n'existe pas dans la base Lambert (2005), ce qui indique que soit :
  - le numéro du rapport n'a pas été associé aux échantillons,
  - les données de ce rapport ont été intégrées dans un rapport ultérieur qui reprend l'ensemble des données de la zone et les synthétise,
  - les données numériques n'existent pas et devront être (re)-numérisées à partir du rapport « papier » d'origine.

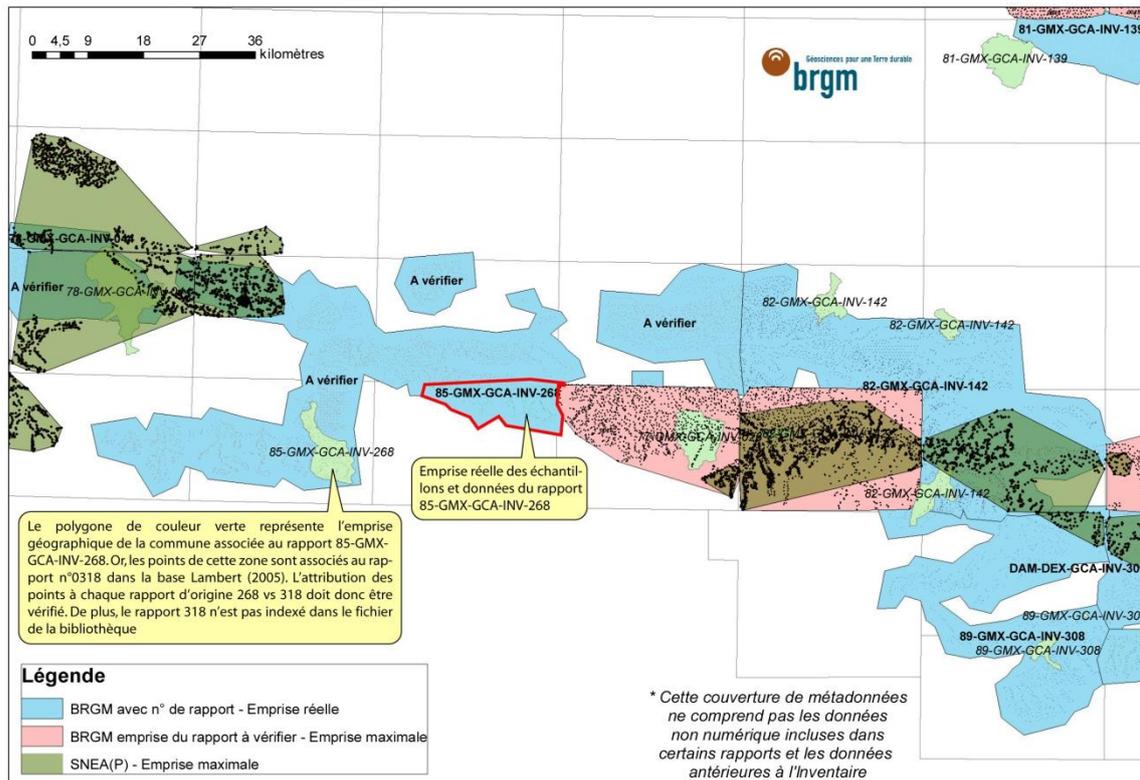


Figure 8 - Confrontation des emprises géographiques entre les données issues de la Bibliothèque et les données de la base Lambert (2005) (Pyrénées centrales et orientales).

#### Quatrième étape : réalisation des couches géographiques de métadonnées

Afin de gérer au mieux les conflits existant, et de renseigner les métadonnées géographiques associées aux données géochimiques de l'Inventaire minier, les couches suivantes ont été réalisées :

- **Une couche d'emprise géographique géochimie sédiment (Figure 9)**

Les polygones sont découpés de la façon suivante :

- si les échantillons ont un numéro de rapport dans la base Lambert (2005), le polygone contourne exactement tous les échantillons qui ont ce numéro de rapport référencé ;
- si les échantillons n'ont pas de numéro de rapport dans la base Lambert (2005), le polygone contourne largement les échantillons et correspond à l'emprise de la feuille au 1/50 000 de la carte géologique de la France contenant les échantillons ;

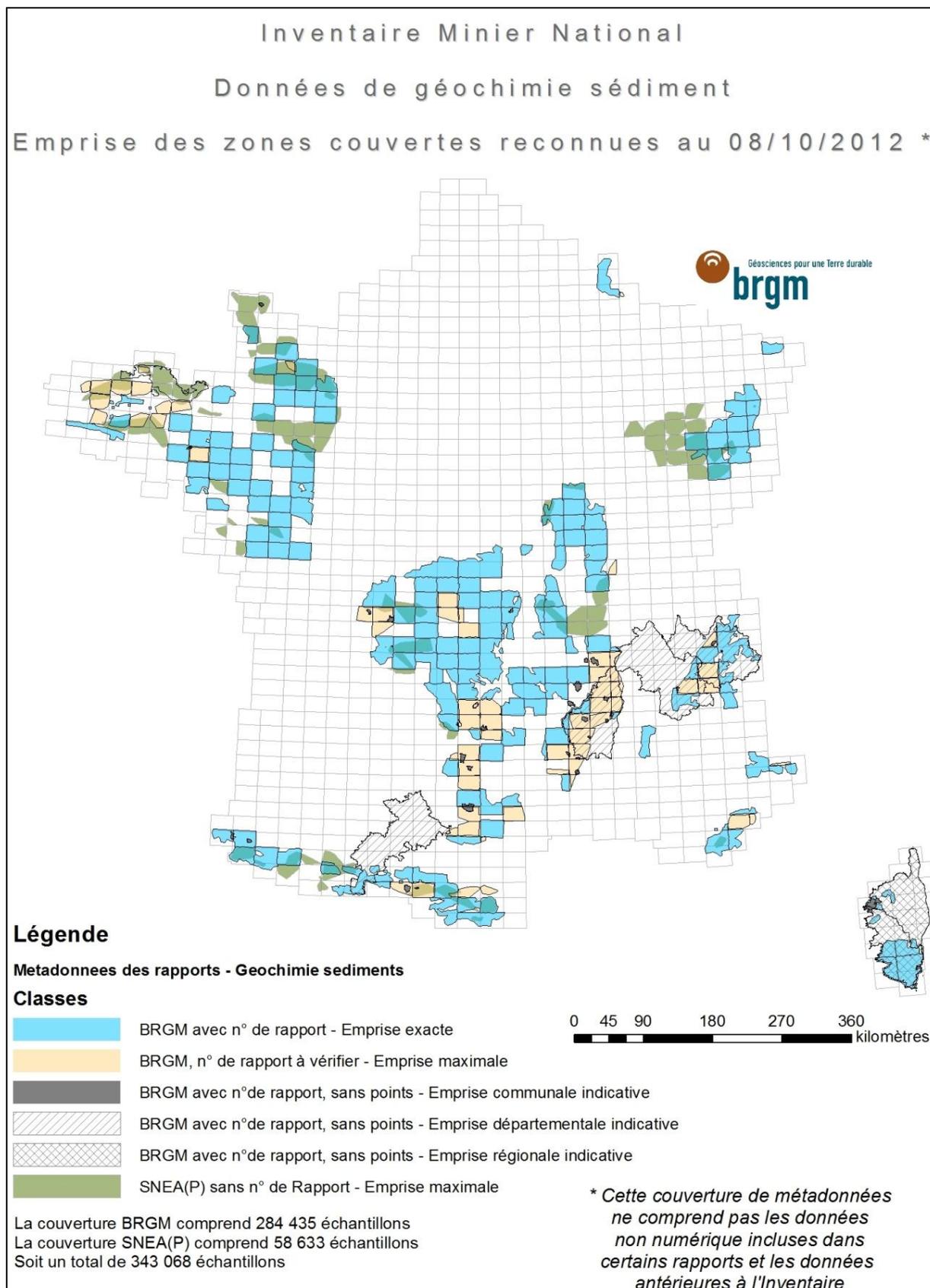


Figure 9 - Couche d'emprise géographique des rapports BRGM & SNEA(P) consacrés à la prospection géochimique.

- les rapports qui n'apparaissent pas dans la base Lambert (2005) ont pour emprise une commune, un département ou une région, suivant le niveau de détail de l'information disponible.

Cette couche contient ainsi l'emprise de 222 rapports BRGM associés à des données de géochimie sédiment et 21 emprises sans rapport associé, soit un total de 243 emprises. La géométrie des polygones se décompose comme suit :

- 173 rapports sont représentés par un polygone qui représente l'emprise réelle des échantillons ;
- 20 rapports sont représentés par un polygone qui représente l'emprise maximale des échantillons (feuille de la carte géologique) ;
- 2 rapports sont représentés par un polygone de région (emprise exagérée) ;
- 5 rapports sont représentés par un polygone de département (emprise exagérée) ;
- 22 rapports sont représentés par un polygone de commune (emprise sous-évaluée) ;
- 21 polygones d'emprise de données restent non liés à leur rapport d'origine (données présentes dans la base Lambert (2005) mais sans numéro de rapport associé).

- **Une couche d'emprise géographique géochimie alluvionnaire (*Figure 10*)**

Les échantillons de prospection alluvionnaire ne comportent pas de numéro de rapport dans la base Lambert (2005). À partir des données numériques disponibles dans la base, 207 polygones d'emprise maximale des échantillons ont été réalisés (découpage arbitraire par feuille de la carte géologique de la France).

Ces polygones ont ensuite été croisés avec les informations issues du fichier de la bibliothèque centrale du BRGM, ce qui a permis de réattribuer une emprise géographique des échantillons sur 78 polygones correspondant à 58 rapports. En effet, selon la géométrie de l'échantillonnage, plusieurs polygones disjoints peuvent correspondre aux données d'un seul et même rapport.

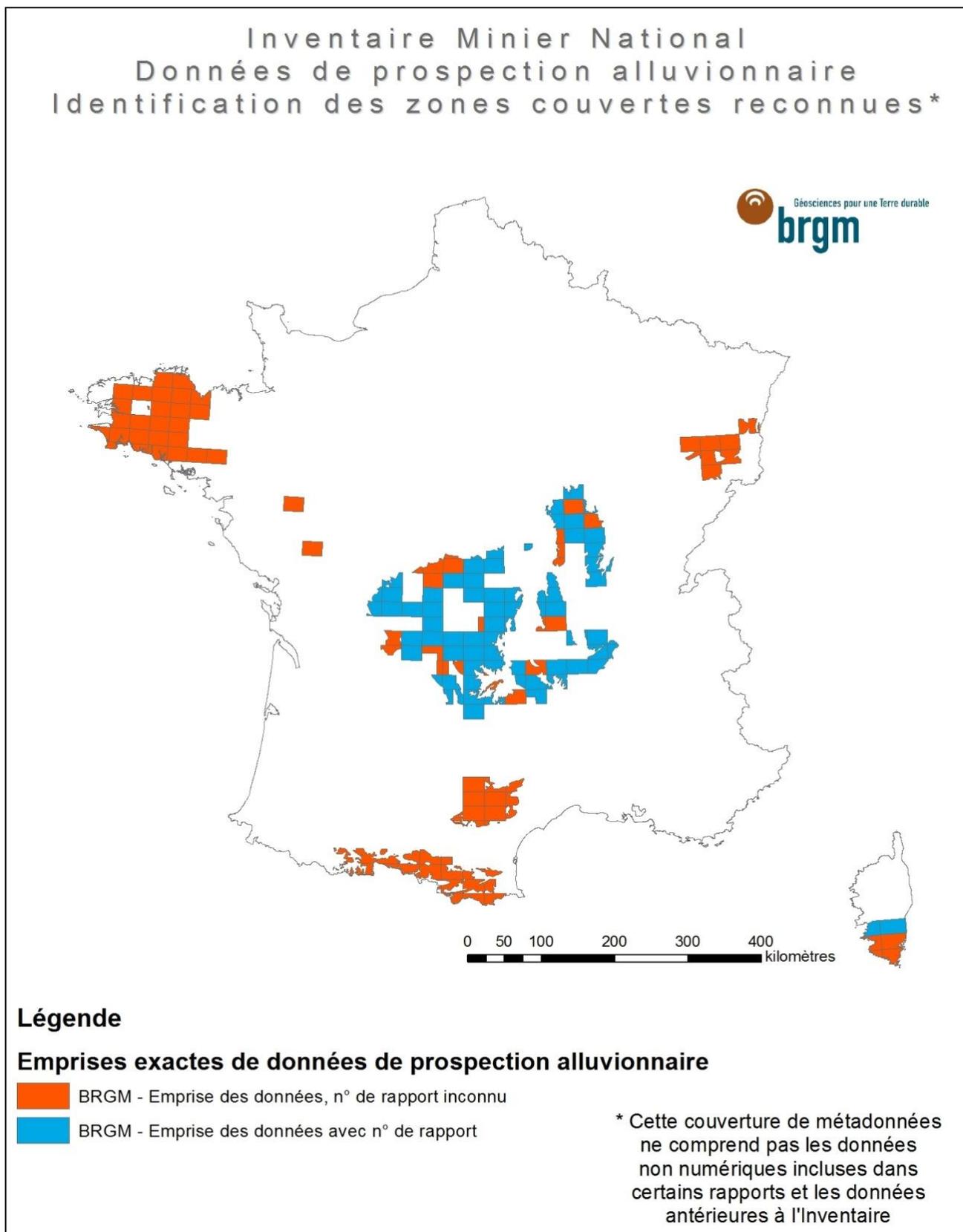


Figure 10 - Couche d'emprise géographique des données de prospection alluvionnaire sur les données numériques disponibles dans la base Lambert (2005).

#### 4.1.3. Données manquantes identifiées

Le travail présenté ci-dessus de réalisation des couches géographiques de métadonnées sur les travaux de l'Inventaire minier ont permis d'identifier certaines données manquantes, parmi lesquelles :

- données alluvionnaire Massif Armoricaïn (Guigues & Devisme, 1969) ;
- données alluvionnaires de la feuille 0276 (Massif Armoricaïn) ;
- données alluvionnaires des feuilles 1120 & 1121 (Corse) ;
- données géochimiques multiéléments de sédiments de ruisseau, feuilles de Lourdes, Laruns, Argeles, Ales, Cayres, Guillestre, Rocroi, Hirson, Falaise ;
- analyses Cu, Pb, Zn antérieures à l'Inventaire apparaissant dans la Synthèse Briovérien Nord-Bretagne (1990 BRGM R31079) ;
- analyses géochimiques multiéléments de sols de berges (Crozon à Saint-Brieuc, 4297 échantillons), rapport 76-SGN-156-GMX ;
- diverses analyses géochimiques apparaissant dans la synthèse du bassin de Châteaulin.

Plus généralement, les problèmes identifiés dans ce chapitre illustrent en partie **la complexité de la tâche consistant à collecter et mettre en forme, de manière exhaustive, les données de l'Inventaire minier français** – dont les plus anciennes ont près de 40 ans – en vue de leur réévaluation.

#### 4.1.4. Répartition spatiale des données, seuils de détection et conséquences

##### ***Répartition spatiale des échantillons vs répartition spatiale des analyses***

Les cartes de métadonnées géographiques présentées ci-dessus (*Figure 9* et *Figure 10*) montrent la **répartition spatiale des échantillons** à partir des données disponibles, et non la **répartition spatiale des analyses**. Il est important de ne pas faire la confusion entre ces deux notions, pour les raisons suivantes :

- l'analyse chimique multiéléments n'a pas été réalisée sur tous les échantillons et la liste des éléments analysés a varié durant le déroulement des travaux de l'Inventaire, ainsi que les seuils de détection associés ;
- le pourcentage d'échantillons analysés et les éléments analysés peuvent être hétérogènes au sein d'un rapport et d'un rapport à l'autre ;
- les techniques d'analyses ont varié au cours du temps (détails *in* Lambert, 2005 ; Barbier & Chery, 1995).

##### ***Inventaire quantitatif des éléments chimiques analysés***

À partir de l'ensemble des données de géochimie sédiment disponibles dans la base Lambert (2005), nous avons dressé un inventaire quantitatif des éléments chimiques analysés. Les résultats sont synthétisés dans la *Figure 11* ci-dessous. L'ensemble des analyses BRGM et SNEA(P) couvre un spectre de 44 éléments chimiques (deux méthodes d'analyse du fluor) plus l'estimation de l'eau contenue (perte au feu, PF). La lecture de la *Figure 11* montre une répartition en trois groupes des éléments analysés.

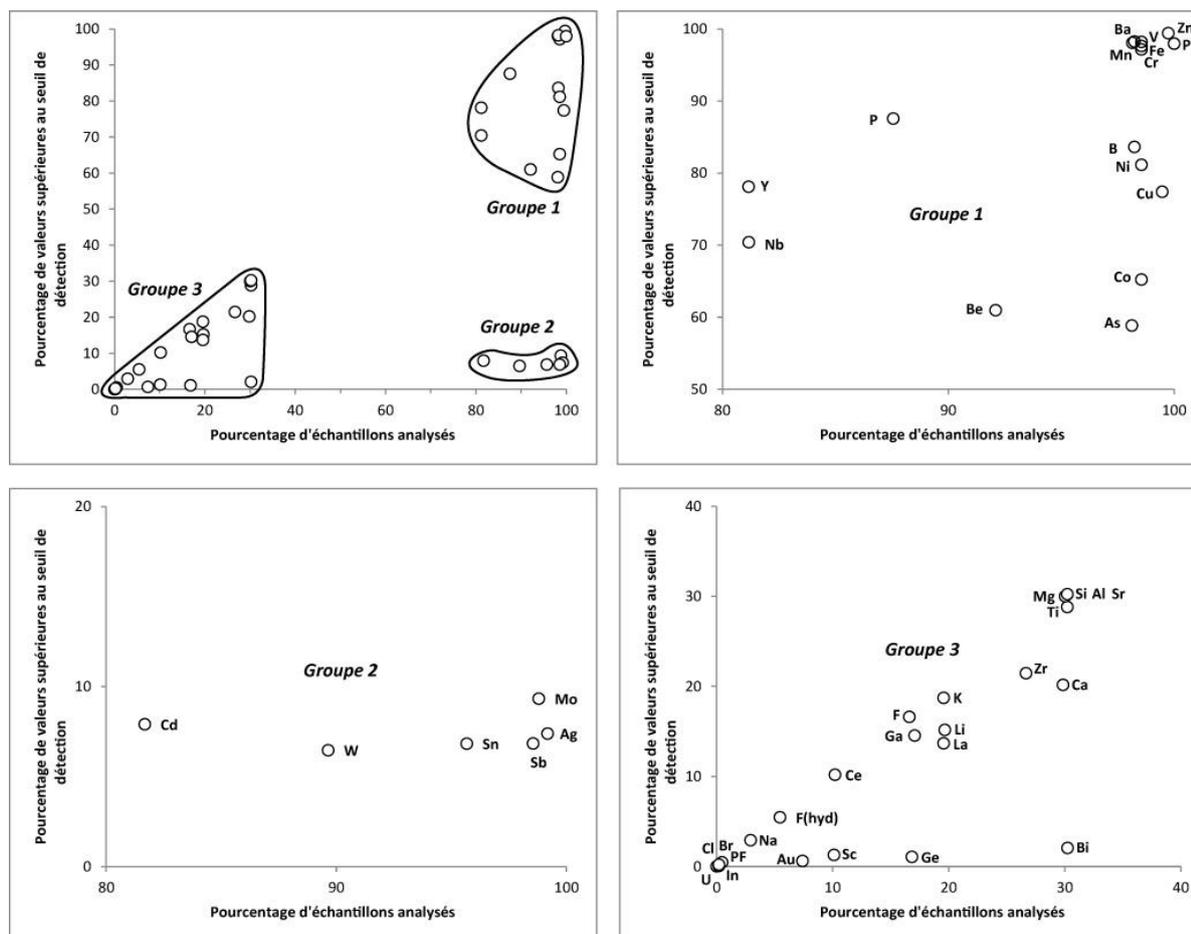


Figure 11 - Analyse quantitative des éléments chimiques analysés dans les échantillons de géochimie sédiment.

- **Groupe 1 – Les éléments qui ont été analysés quasi-systématiquement avec un seuil de détection très bas par rapport aux teneurs dans les sédiments.**

Ce groupe comprend seize éléments : Zn, Pb, V, Fe, Cr, Ba, Mn, B, Ni, Cu, Co, As, P, Be, Y, Nb. En première approximation, la répartition spatiale de ces éléments correspond à la répartition spatiale des échantillons. Il s'agit, relativement, de très bonnes couches d'information et des cartes d'interpolation de valeurs peuvent être réalisées.

- **Groupe 2 – Les éléments qui ont été analysés quasi-systématiquement avec un seuil de détection très haut par rapport aux teneurs dans les sédiments.**

Ce groupe comprend six éléments : Mo, Ag, Sb, Sn, W, Cd. La répartition spatiale des analyses correspond à celle des échantillons mais du fait de seuils de détection trop élevés, 10 % ou moins des données sont supérieures aux seuils de détection. On ne peut donc réaliser que des cartes de données ponctuelles à partir de ces éléments. Néanmoins ces informations ponctuelles peuvent être très intéressantes et complémentaires des données du groupe 1.

- **Groupe 3 – Les éléments qui ont été analysés dans moins de 30 % du total des échantillons**

Ce groupe comprend 22 éléments : Si, Al, Sr, Mg, Ti, Ca, Zr, K, Li, La, Ga, Bi, Ge, Ce, Sc, Au, Na, Br, In, Cl, U et F (analysé par deux méthodes différentes) et une estimation de la teneur en eau. La

répartition spatiale de ces analyses correspond à 30 % ou moins de la surface couverte par les échantillons. Ce groupe est par ailleurs très hétérogène avec pour certains éléments un seuil de détection très bas ou très haut par rapport à la teneur du sédiment. Ainsi, les données relatives à certains éléments peuvent faire l'objet de cartographies interpolées sur des zones restreintes (éléments majeurs) ou ne sont que très peu valorisables, uniquement sous la forme de point significatifs (ex : In, U, Cl, Br, F(hyf), Au, Sc).

#### **4.2. VALORISATION DES DONNEES DE L'INVENTAIRE RELATIVES AUX GISEMENTS ET INDICES**

La grande majorité des sujets miniers identifiés par l'Inventaire l'ont été à une époque où les outils informatiques étaient encore peu utilisés. Si les campagnes de géochimie stratégique ont été, dès l'origine, numérisées de manière à en faciliter le traitement et l'interprétation, il n'en est rien pour tout ce qui relève des travaux de développement d'indices : grilles de géochimie tactique, tranchées, puits, sondages percutants, sondages carottés, plans topographiques, travaux miniers de reconnaissance, etc.

Aujourd'hui, les rapports et les plans qui décrivent les travaux réalisés sont à l'état « papier », ou, pour le mieux, numérisés au format \*.pdf.

Le premier travail qu'il conviendrait de faire pour valoriser ces acquis serait de les rendre accessibles sous la forme de bases de données, compatibles à tout type de traitement par les logiciels SIG de type ArcMap et les logiciels de modélisation 3D de type GDM et Surpac. Cela nécessiterait un important travail préliminaire, mais permettrait de réellement valoriser les données, notamment par le biais des actions suivantes :

- localiser les rapports. Une recherche rapide auprès de la Bibliothèque Centrale du BRGM montre que les documents, lors de la cessation d'activité des Divisions Minières, ont été dispatchés entre les différentes Directions Régionales. D'autre part, le BRGM n'a en sa possession que les documents relatifs aux sujets sur lesquels il a travaillé. Les archives des sujets étudiés par d'autres sociétés : SNEA(P), SMMP, COGEMA, SOGEREM, etc. sont en possession des compagnies encore existantes, et/ou ont été déversées aux Archives Nationales. Au départ, il y a donc un travail préliminaire de localisation des documents ;
- numériser les plans et les géoréférencer. À l'image de ce qui est fait depuis plusieurs années dans le cadre de l'Après-Mine, il faut géoréférencer les plans : localisation des données ponctuelles (emplacements de sondage, points de prélèvement géochimique) et linéaire (tracés de galeries, de tranchées). Ce travail nécessitera des contrôles de terrain afin de géolocaliser avec précision les données reportées sur les plans ;
- pérenniser les données, et permettre leur traitement numérique avec les procédures actuelles d'estimation des ressources-réserves.

À terme, ce travail devrait permettre, notamment :

- d'établir des documents promotionnels des sujets, les rendre attractifs pour les bailleurs de fond et les sociétés minières susceptibles d'investir en France ;
- de classer certains gisements comme « stocks en terre », en veillant à ce que leur accès et leur exploitabilité éventuels ne soient pas compromis par l'urbanisation ou l'implantation d'autres infrastructures. Cette question relève d'une politique d'aménagement du territoire et de plans d'occupation des sols ; la préservation de telle ou telle ressource susceptible d'utilisation en cas de « crise durable » devenant alors un des paramètres de la gestion foncière.

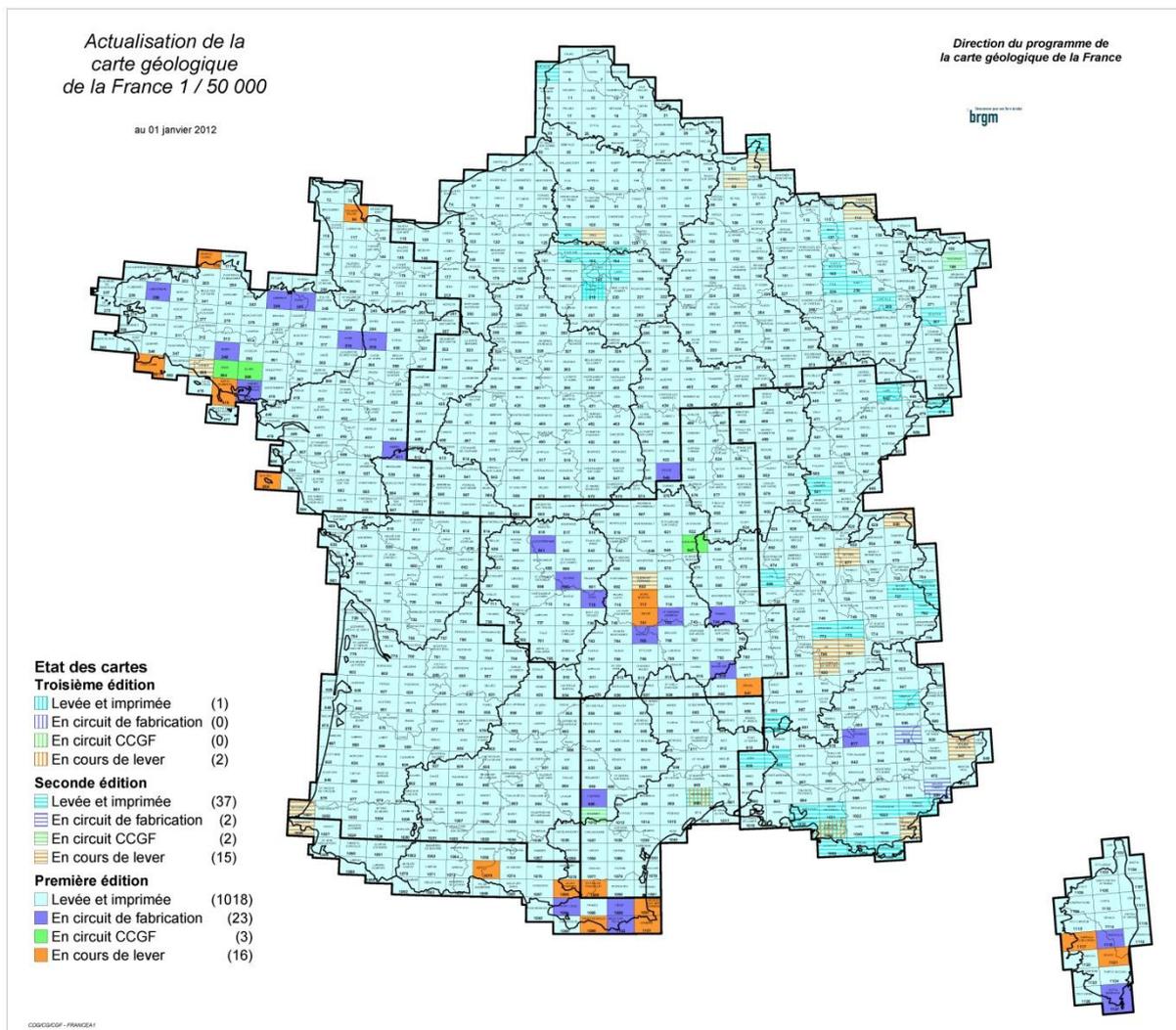


Figure 12 - Tableau d'assemblage de la carte géologique 1/50 000 et état d'actualisation à janvier 2012.

## 5. Données complémentaires hors-Inventaire

### 5.1. LES DONNEES GEOLOGIQUES

#### 5.1.1. Cartes géologiques

En France, la reconnaissance des formations rocheuses qui constituent le sous-sol du territoire fait depuis 1868 l'objet d'un programme national de recensement et de cartographie dans le cadre de l'établissement de la carte géologique de la France. Une première phase de cartographie s'est déroulée entre 1868 et 1968, à l'échelle de 1/80 000. Une seconde phase à 1/50 000, initiée en 1927, s'est achevée en 2010.

Le BRGM est responsable du levé et de la publication de la carte géologique à 1/50 000. Ce programme arrive à son terme avec plus de 1 000 cartes sur les 1 060 du programme édités à ce jour (*Figure 12*).

Parallèlement, au cours de la période 2001-2005 le BRGM a entrepris la numérisation et le stockage en banque de données géographiques de l'ensemble des cartes géologiques à 1/50 000. Actuellement toutes les cartes publiées sont disponibles au format SIG vecteur. Le programme d'harmonisation départementale des cartes géologiques s'adosse à la base de données vecteurs, plus de 60 départements ont été harmonisés depuis 2001, et stockées en base de données.

Outre les cartes de la France à l'échelle du 1/50 000 (1 041 feuilles disponibles), il existe des synthèses régionales à 1/250 000 (15 feuilles disponibles) et nationale à 1/1 000 000. L'usage des synthèses au 1/250 000 peut se révéler être plus approprié pour une étude donnée en fonction de son emprise et du niveau de détail requis.

#### 5.1.2. Banque de données du sous-sol (BSS)

Conformément à l'article 131 du Code minier « Toute personne exécutant un sondage, un ouvrage souterrain, un travail de fouille, quel qu'en soit l'objet, dont la profondeur dépasse dix mètres au-dessous de la surface du sol, doit être en mesure de justifier que déclaration en a été faite à l'ingénieur en chef des mines ». À ce titre, le BRGM a pour mission de recueillir les données relatives aux travaux souterrains, de les compiler dans la banque de données du sous-sol (BSS) et de mettre cette base de données à la disposition du public.

À fin 2011, le nombre total des ouvrages archivés dans la BSS est de 751 372, avec une densité de données variable sur le territoire national (*Figure 13*). Le total des documents numérisés s'élève à 2 314 261, soit une moyenne légèrement supérieure à 3 documents par ouvrage recensé. Tous ces documents sont accessibles sur le site internet du BRGM, sous forme de géorapports, et gratuitement sur le portail InfoTerre™.

En parallèle, 1 500 000 micro-fiches ont été réalisées dans les années 1980 à 1995, puis numérisées de 2006 à 2009. Elles sont progressivement intégrées dans les documents numériques de la BSS. À fin 2011, 390 000 étaient intégrées dans la BSS, soit environ 25 %.

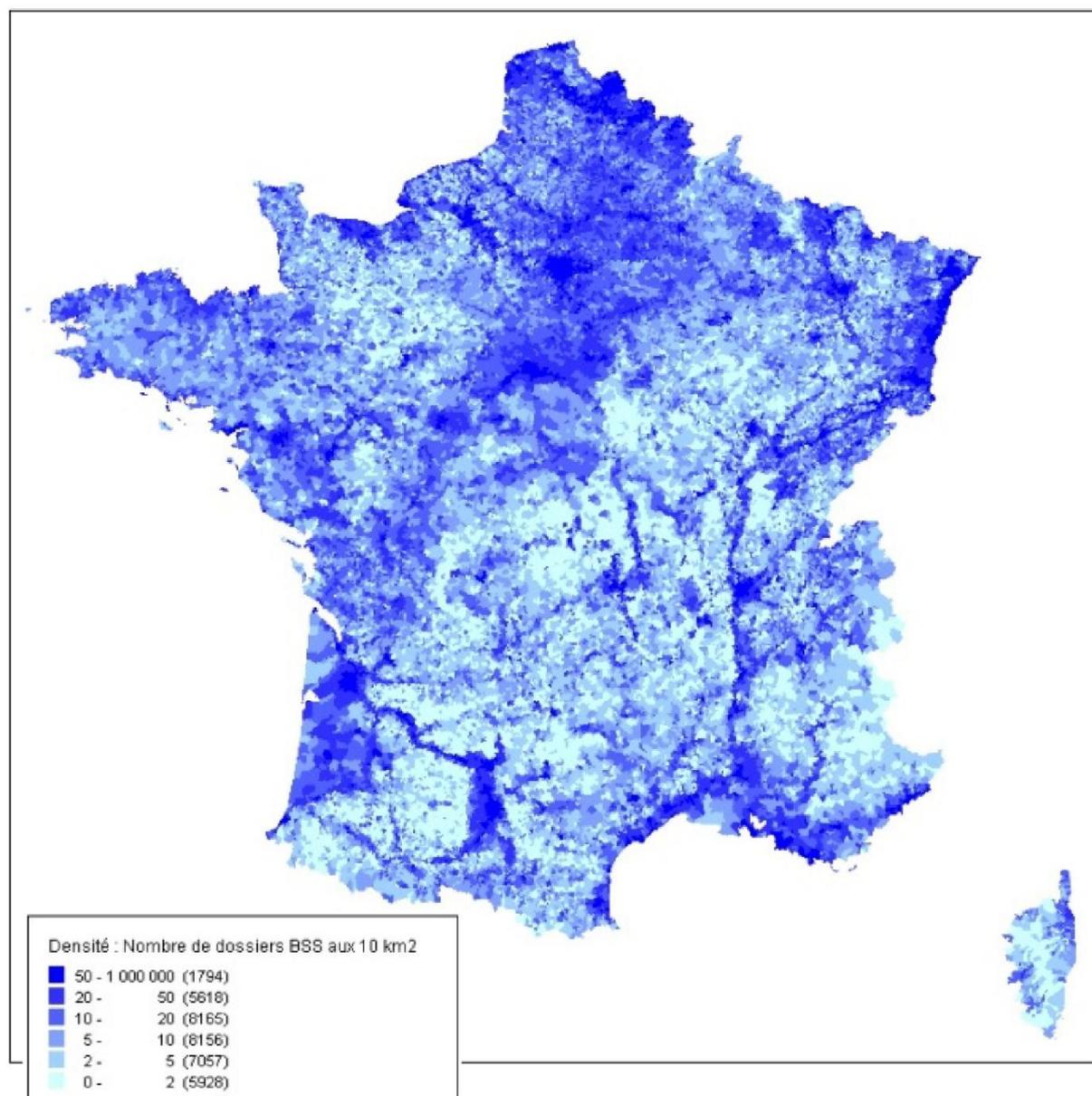


Figure 13 - Carte de densité des dossiers BSS (en nombre de dossiers par 10 km<sup>2</sup>) en France métropolitaine.

## 5.2. LES DONNEES GITOLOGIQUES

Dans le cadre de ses travaux de compilation et de mise à disposition des données du sous-sol, le BRGM a réalisé une base de données des « gisements, gîtes et indices », qui contient les gîtes, indices de minéralisation, et gisements exploités en France. Cette base de données est mise à disposition du public via le site internet SIG Mines France (<http://sigminesfrance.brgm.fr>) et le portail InfoTerre (<http://infoterre.brgm.fr>). Sa structure a inspiré la géodatabase développée dans le cadre du présent projet (voir chapitre 6 ci-après). De plus, depuis 2009 cette base de données a été mise à jour et étendue à l'ensemble de l'Union Européenne dans le cadre du projet Européen ProMine (Cassard *et al.*, 2012a). À fin 2012, cette base, baptisée « Gisement ProMine », recense 4 297 indices, gîtes ou gisements en France métropolitaine (Figure 14). Chaque objet de la base (indice, gîte ou gisement) est renseigné par une quarantaine de champs répartis en plusieurs catégories :

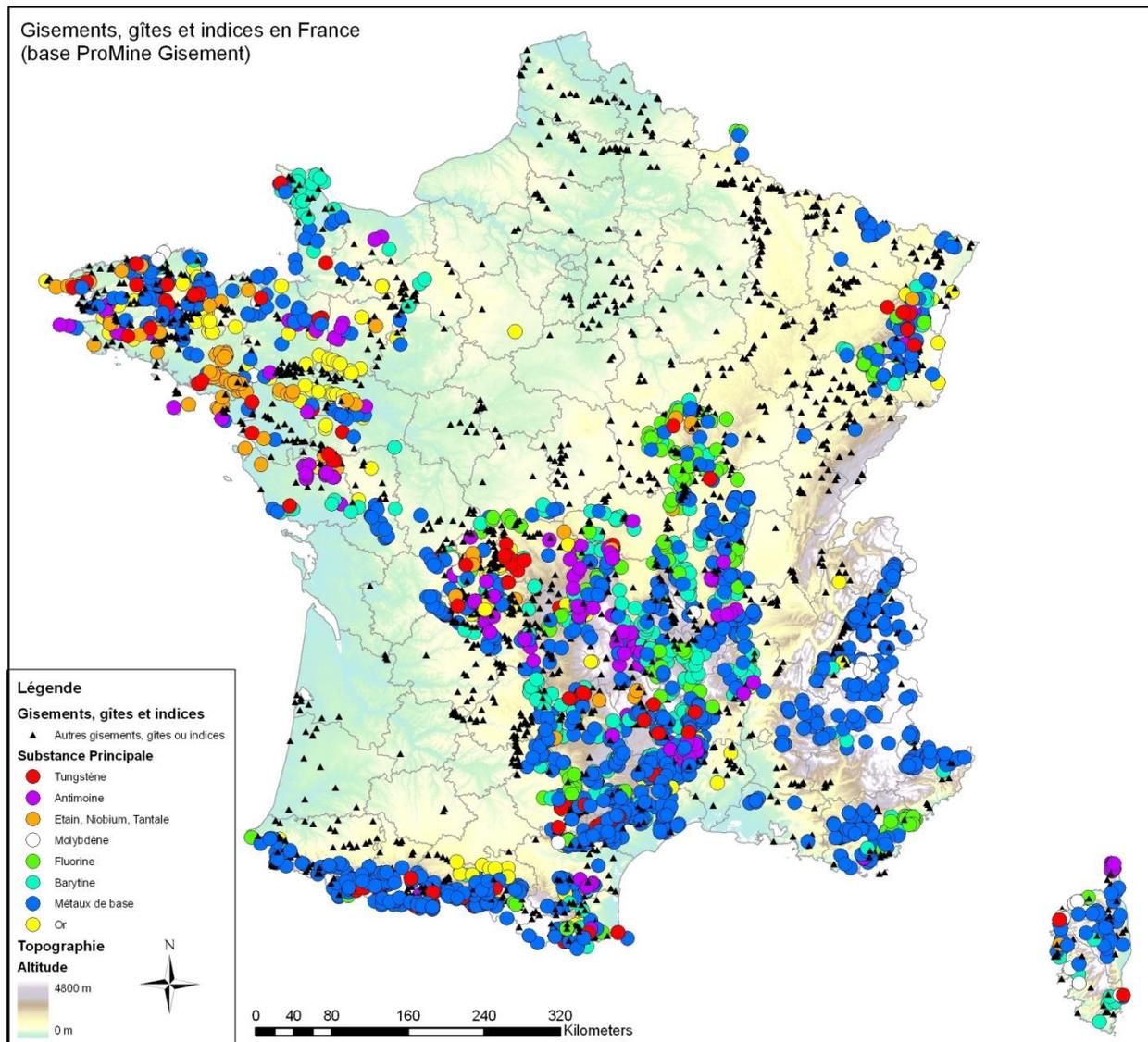


Figure 14 - Gisements, gîtes et indices en France métropolitaine, extraits de la base ProMine Gisement et codés selon la substance principale (hors substances énergétiques).

- informations générales, avec district minier, propriétaire (compagnie minière), statu, coordonnées géographiques (WGS84), auteur de la fiche et date de création, contrôleur de la fiche et date de contrôle, nom(s) de l'objet, commentaires, sources de la donnée, autre base de données (et identifiant dans cette base) décrivant l'objet ;
- informations gîtologiques, avec typologie, morphologie et géométrie de la minéralisation (azimuth, pendage, longueur, largeur et extension verticale) ;
- informations sur la minéralisation et son encaissant, avec âge stratigraphique (limite supérieure et inférieure) et radiométrique (avec méthode de datation, marge d'erreur et unité) de la minéralisation et de l'encaissant, minéralogie du minerai et de la gangue, altération(s) hydrothermale(s), nom de la formation et lithologie de l'encaissant ;
- informations économiques, avec type d'exploitation, substance principale et, par substance, type de minerai, production passée (avec teneur moyenne et année(s) de production), réserves (avec type de réserve, teneur moyenne, référence et date de l'information) et ressources (avec type de ressource, teneur moyenne, référence et date de l'information) ;

- informations sur les métaux rares, avec caractérisation de leurs porteurs (minéralogie, teneur, abondance) ;
- commentaires, iconographie et bibliographie.

La structure de la base de données est synthétisée dans le *Tableau 2* ci-dessous. Afin d'optimiser la gestion des données et leur traitement ultérieur, la plupart des champs qui ne contiennent pas des valeurs numériques (*i.e.* champs textuels) sont contrôlés par des lexiques (dont la plupart sont de type hiérarchique et permettent de tenir compte du niveau de l'information disponible). L'ensemble des champs n'est pas renseigné de manière exhaustive pour chaque enregistrement mais uniquement lorsque la donnée est disponible.

<p><b>1. General Information</b></p> <p><u>Lexicon guided fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Status: detailed information on mine, deposit, occurrence, showing</li> <li>▪ Country: link to list of countries</li> </ul> <p><u>Free text fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mining company (owner); Mining District</li> <li>▪ Longitude and Latitude (geographic WGS84, decimal degrees and degrees-minutes-seconds)</li> <li>▪ Ore deposit name(s): multi-entry field to list all possible names of the same deposit</li> <li>▪ Free comments</li> <li>▪ Author + date of entry, Controller + date of control</li> <li>▪ Links to other databases and numbering in these databases, URL + source of the mine site (if any)</li> </ul>
<p><b>2. Deposit information</b></p> <p><u>Lexicon guided fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deposit type(s): multi-entry field of deposit type hierarchical listing</li> <li>▪ Main morphology &amp; Deposit morphologies: multi-entry field of deposit morphology hierarchical listing</li> </ul> <p><u>Free text fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Azimuth, dip, length, width, down dip information associated with ore morphology</li> </ul>
<p><b>3. Information on mineralization + host rocks</b></p> <p><u>Lexicon guided fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mineralization stratigraphic age (upper and lower limit)</li> <li>▪ Ore mineralogy, Gangue mineralogy, Hydrothermal alteration: multi-entry fields</li> <li>▪ Host rock lithologies: multi-entry field &amp; Host rock stratigraphic age (upper and lower limit)</li> </ul> <p><u>Free text fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mineralization absolute age, Host rock absolute age (with error + dating method from lexicon), Host rock formation name</li> </ul>
<p><b>4. Economic information</b></p> <p><u>Lexicon guided fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Exploitation type(s): multi-entry field</li> <li>▪ Main commodity</li> <li>▪ Multi-commodity window: per commodity: <ul style="list-style-type: none"> <li>- ore type; production and grade units</li> <li>- former production, grade of former production, duration of former production</li> <li>- reserve, type of reserve (proven, probable, measured, ...), grade of reserve, year of estimate, classification code used</li> <li>- resource, type of resource (proven, probable, measured, ...), grade of resource, year of estimate, classification code used</li> </ul> </li> </ul> <p>automatic calculation of i) former production, ii) reserves, iii) resources and iv) deposit size class</p>
<p><b>5. High-Tech Metals</b></p> <p><u>Lexicon guided fields:</u></p> <p>Per commodity</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Characterization of high-tech metals hosts (mineralogy, grade, abundance)</li> </ul> <p>⇒ Possibility to create a link with the Anthropogenic Concentration (AC) database</p>
<p><b>6. Comments</b></p> <p><u>Free text fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ General comments on geology, general comments on economy, mine site infrastructure</li> </ul>
<p><b>7. Iconography</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Illustrations (pictures, maps, sections, etc ...) related to the deposit</li> </ul>
<p><b>8. Bibliography</b></p> <p><u>Dynamic lexicon guided fields:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geological reference(s), economic reference(s)</li> </ul>

*Tableau 2 - Structure de la base de données ProMine Gisement, telle que décrite dans les métadonnées de la base (<http://ptrarc.gtk.fi/ProMine/default.aspx>).*

### 5.3. LES DONNEES GEOCHIMIQUES

Au cours des années 2000, deux projets européens ont été menés dans le but d'établir des bases de références géochimiques communes : les projets FOREGS et plus récemment GEMAS.

#### 5.3.1. Projet FOREGS

Le concept d'un Atlas géochimique européen a pris naissance à la suite de l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986. Les différents états voisins de l'ex-URSS se sont alors rendu compte qu'il n'existait aucune base de référence commune et fiable sur la dispersion naturelle des éléments radioactifs avant l'accident pour évaluer l'impact régional, voire continental, des polluants atmosphériques induits par cette catastrophe.

Un essai de corrélation entre les différentes bases nationales s'est avéré impossible vu la diversité des milieux analysés, des méthodes de traitement des échantillons et de procédures analytiques.

Après dix années de tests (1988-1998) pour optimiser le choix des milieux de prélèvement, des éléments à doser et des méthodes d'analyses (*Figure 15*), et pour trouver les compromis en terme de coûts et de spatialisation de l'information, la décision de lancer l'opération était prise en 1998 par les directeurs des services géologiques européens rassemblés dans l'EuroGeoSurvey. Le projet FOREGS (FORum of European Geological Surveys) a alors vu le jour. Le financement sera assuré par chaque service européen.

Les phases d'échantillonnage normalisé, de traitement des échantillons et d'analyse ont duré quatre ans.

Les services géologiques de 26 pays ont été impliqués dans ce programme : Albanie, Allemagne, Autriche, Belgique, Croatie, Danemark, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Pays-Bas, Norvège, Pologne, Portugal, République Tchèque, Slovaquie, Slovénie, Espagne, Suède, Suisse et Royaume-Uni. La coordination du projet et la cartographie ont été réalisées par le Service Géologique de Finlande.

Pour limiter le coût global de l'opération, une approche stratégique aléatoire, à très faible densité a été adoptée pour l'échantillonnage : l'Europe est divisée en cellules carrées de 160 km de côté calquées sur celles du GTN (Global Terrestrial Network, Darnley *et al.*, 1995). Dans chaque cellule 5 sites sont tirés au hasard. À proximité de ces sites, un drainage dans un bassin inférieur à 100 km<sup>2</sup> est sélectionné. En aval, dans le drainage majeur qui englobe le précédent un limon d'inondation est sélectionné (bassin de 1 000 à 6 000 km<sup>2</sup>). Au total, il y a donc pour la France 122 sites échantillonnés pour les eaux de rivière, les sédiments actifs et les sols et 114 sites pour les limons d'inondation (*Figure 16*).

Sur chaque petit bassin de moins de 100 km<sup>2</sup>, les matrices suivantes ont été prélevées :

- les eaux de surface codées W : trois flacons conditionnés en fonction des éléments à doser. Les mesures pH, conductivité électrique (EC), alcalinité totale (méthode Hach) et radiométrie (comptage total) sont faites sur site ;
- les sédiments actifs tamisés sur place à < 150 µm, codés S : composite de cinq prises en amont du point ;



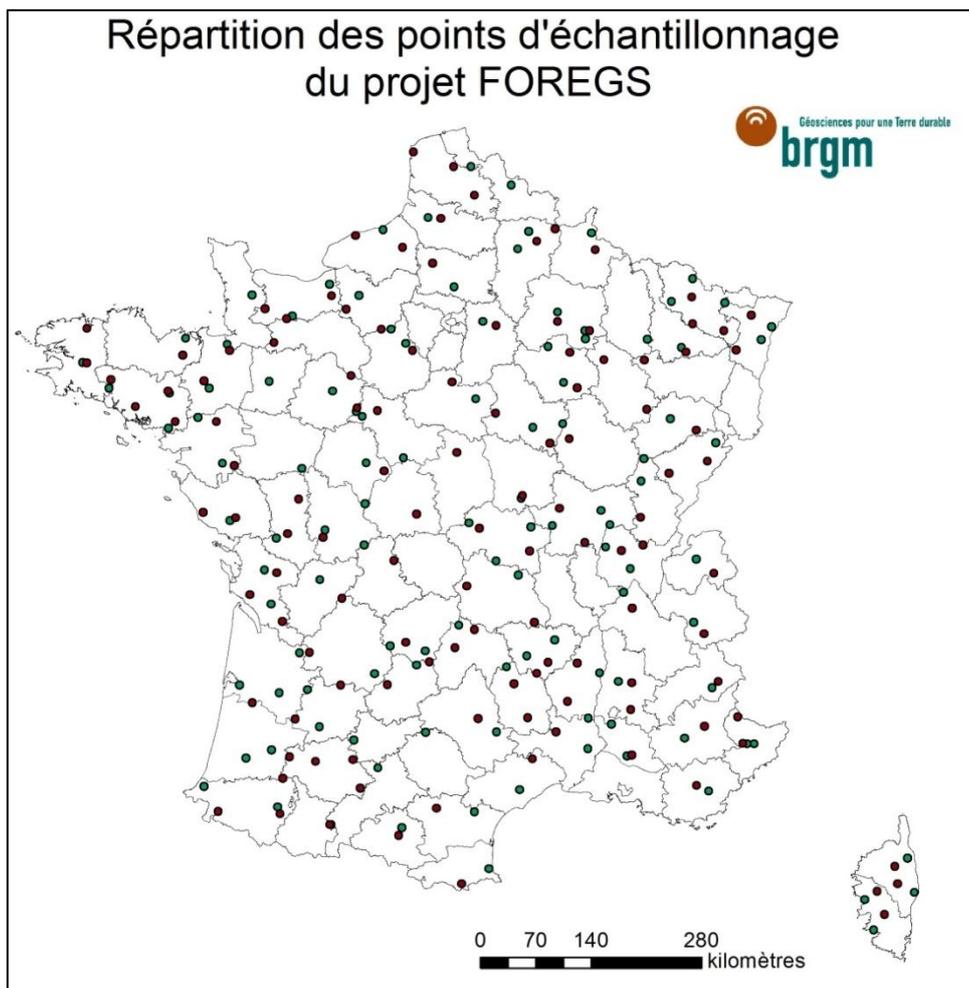


Figure 16 - Répartition des points d'échantillonnage du projet FOREGS.

### 5.3.2. Projet GEMAS

Faisant suite au projet FOREGS et à une demande conjointe de l'administration de REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) et de l'EU Soil Protection Directive pour une meilleure connaissance de la qualité des sols à l'échelle européenne, le projet GEMAS (Geochemical Mapping of Agricultural Soils of Europe) a pour but de fournir des données géochimiques harmonisées sur les sols cultivés et les prairies naturelles européens.

En 2008 et début 2009, les services géologiques de 34 pays européens ont ainsi participé à la collecte d'échantillons sur une surface de 5,6 millions de km<sup>2</sup>, à une densité de un échantillon par 2 500 km<sup>2</sup>. Le projet est dirigé par le NGU (Service géologique norvégien).

Les échantillons ont été prélevés sur deux horizons de sol selon un protocole agréé entre les partenaires du projet. Chaque échantillon est un composite d'au moins cinq sous-échantillons prélevés aux coins et au centre d'un rectangle de 10 x 10 m.

Ainsi, 436 échantillons prélevés sur le territoire métropolitain ont été analysés, ce qui correspond à 218 sites d'échantillonnage (Figure 17).

Tous les échantillons ont été préparés par le Service Géologique de Slovaquie. Les analyses ont ensuite été réparties entre différents laboratoires (Tableau 3).

Type	Laboratoire
C total et S	NGU
Capacité d'échange Cationique	SGUDS
Carbone Organique Total (TOC)	KIWA (ex. FUGRO)
pH CaCl <sub>2</sub>	NGU
XRF (41 éléments) et LOI	BGR
Tailles de grains	KIWA (ex. FUGRO)

Tableau 3 - Répartition des différents types d'analyses entre les laboratoires du projet GEMAS.

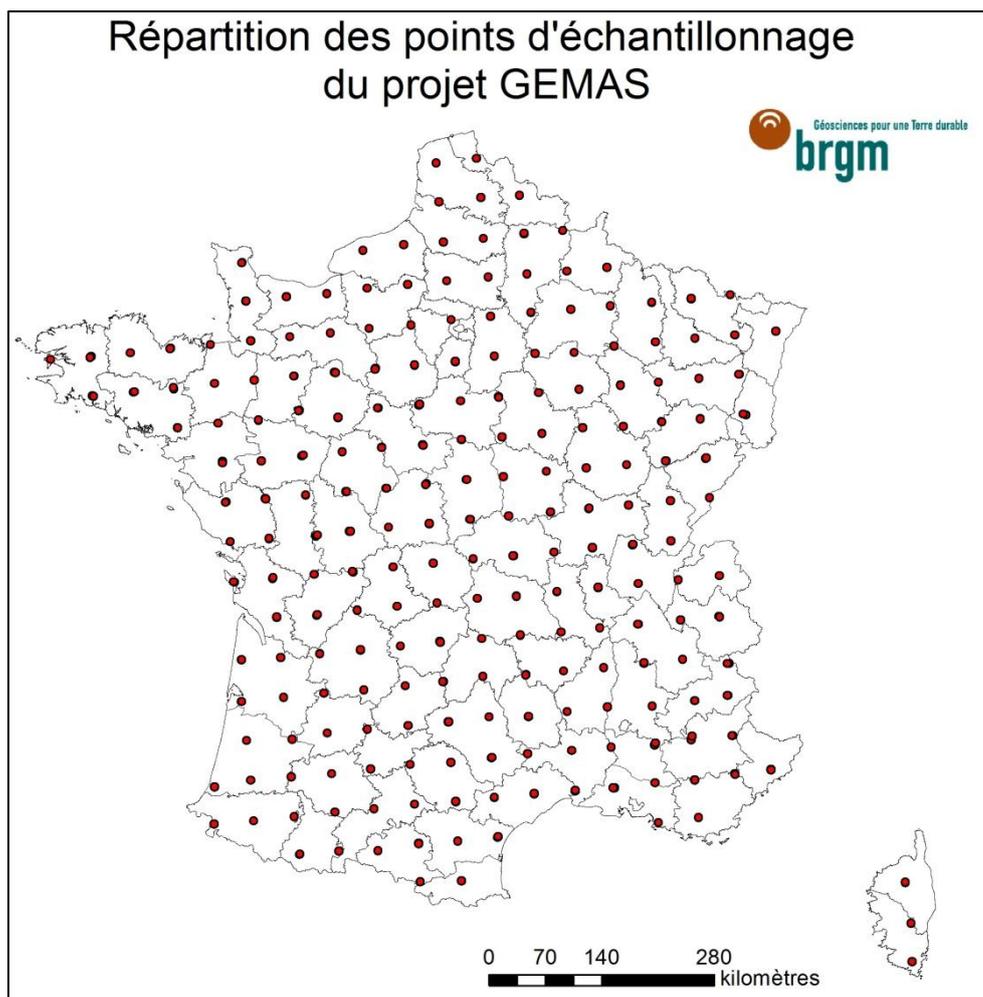


Figure 17 - Répartition des points d'échantillonnage du projet GEMAS.

#### 5.4. LES DONNEES GEOPHYSIQUES

L'acquisition de données géophysiques sur le territoire français a débuté dans les années 1950, principalement pour les besoins de l'exploration minière et pétrolière. Des levés systématiques visant à mettre en place une infrastructure nationale homogène et complète en gravimétrie et aéromagnétisme et plus récemment en radiométrie aéroportée, ont été parallèlement conduits en particulier, par le BRGM, l'Institut de Physique du Globe de Paris, l'INAG et l'INSU. Les données actuellement disponibles concernent les méthodes suivantes :

- **La gravimétrie**, qui consiste à déterminer les anomalies de la pesanteur occasionnées par l'inégale répartition des densités dans le sous-sol. Elle a des applications dans de nombreux domaines (recherche fondamentale, métrologie, géodésie, navigation, géologie régionale, recherche minière, aménagement, etc.). Elle permet d'observer des phénomènes d'échelle et d'amplitude très variables (du modèle global à la microgravimétrie), grâce à des appareils (gravimètres relatifs de prospection, gravimètres absolus, gravimètres à supra-conducteur pour des mesures en continu, etc.) et à des vecteurs variés (gravimétrie satellite, aéroportée, marine, sol). Le territoire français dispose aujourd'hui d'un maillage de 420 000 stations gravimétriques. Leur répartition hétérogène (*Figure 18*) ne permet pas d'interpoler les données avec le même degré de précision sur l'ensemble du territoire. D'après le code minier, les données gravimétriques sol sont, la plupart du temps, publiques. Elles sont généralement disponibles sous forme numérique.
- **Les méthodes aéroportées**, magnétisme, radiométrie spectrale gamma et électromagnétisme, permettent une couverture rapide et détaillée de larges zones. Sensibles, respectivement, aux variations des propriétés magnétiques, de rayonnement gamma, et de résistivité du sous-sol, elles ont des applications en recherche minière, géologie régionale et aménagement. Sur l'ensemble du territoire français, on ne dispose que d'une couverture magnétique de basse résolution, datant de 1964. Par ailleurs, des levés régionaux, de méthodes, résolution et sensibilité variables, ont été effectués pour les besoins de l'exploration minière et pétrolière. Des couvertures magnétiques et radiométriques d'infrastructure multi-objectif, haute sensibilité et haute résolution ont été enfin réalisées plus récemment (Massif Central, Massif Armoricain). Il en résulte que la couverture du territoire national est hétérogène (*Figure 19*), tant en termes d'emprise que des méthodes employées. Les données des études aéroportées sont généralement publiques mais ne sont pas toujours disponibles sous forme numérique.
- De nombreuses campagnes de **géophysique sol (hors gravimétrie)** ont été réalisées, principalement pour l'exploration minière ou pour des besoins d'aménagement. Les résultats de ces études sont disponibles sous forme de rapports d'étude, rapports BRGM ou rapports archivés par le BRGM au titre du code minier. Publiques ou confidentielles, selon les objectifs, ces données sont rarement disponibles sous forme numérique.
- **Des synthèses géophysiques** et géologiques régionales ont été également réalisées, pour la connaissance géologique du territoire, dans le cadre des programmes Géologie profonde de la France et GéoFrance3D, de programmes de prospection et Inventaire minier, ou autres. Ces synthèses ont permis d'élaborer des couches d'information valorisées et des documents interprétés, généralement disponibles sous forme de rapports et publications.

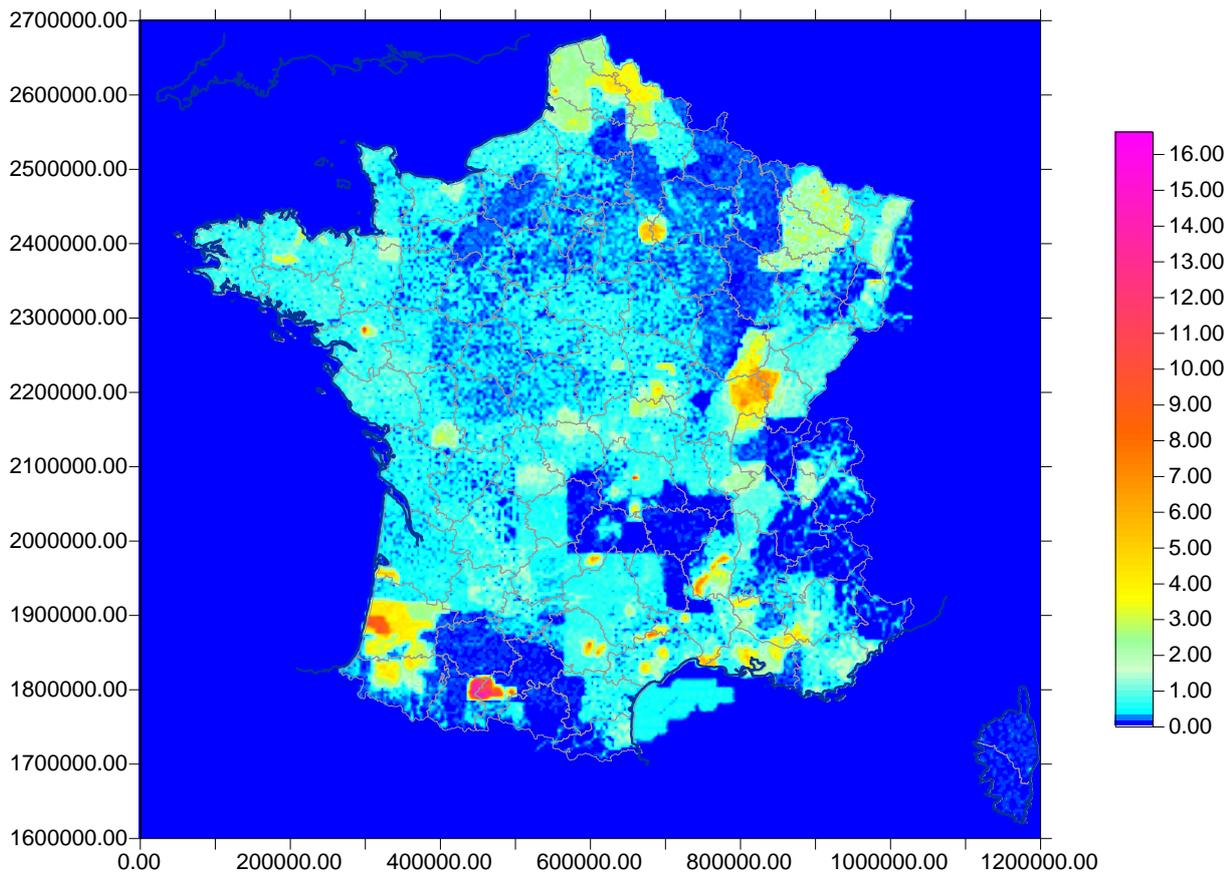


Figure 18 - Carte de densité des stations gravimétriques (en nombre de stations par km<sup>2</sup>) en France métropolitaine.

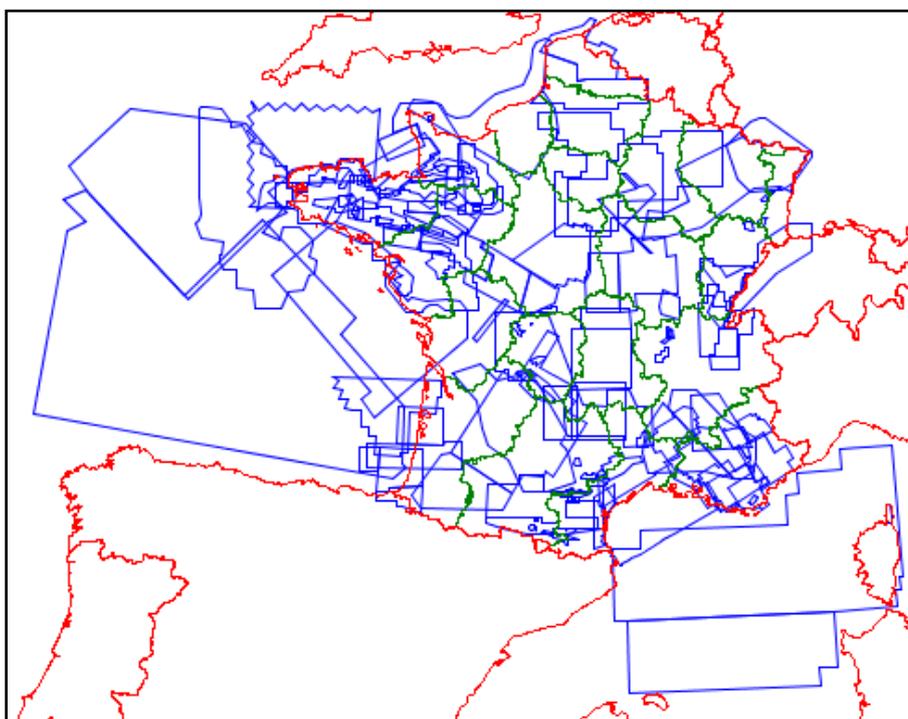


Figure 19 - Carte d'emprise des différentes campagnes d'acquisition de données magnétiques aéroportées en France.

## 5.5. LES DONNEES ENVIRONNEMENTALES ET LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX À PRENDRE EN COMPTE

La France, par ses engagements nationaux, européens et internationaux s'est inscrite dans un schéma de conciliation entre protection et mise en valeur de l'environnement et du patrimoine culturelle et historique, développement économique et progrès social.

Le Code Minier étant actuellement sous projet de refonte, notamment pour l'intégration des paramètres environnementaux, la présente description se base sur les Schémas Départementaux les plus récemment publiés (pour exemple : <http://andrea.nfrance.com/~eq40782/1-5762-Schema-du-31.php>), ainsi que sur le Schéma Départemental d'Orientation Minière de la Guyane (publié en 2011) pour dresser l'inventaire des zones où l'ouverture d'une exploitation minière est interdite ou soumise à de fortes contraintes.

Avec le soutien du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, le Muséum National d'Histoire Naturelle met à disposition de tous, via internet, les données de la base nationale des espaces protégés.

Les couches SIG des espaces protégés (à l'exception des espaces naturels sensibles) sont disponibles à l'adresse suivante : <http://inpn.mnhn.fr/telechargement/cartes-et-information-geographique>.

L'adresse <http://inpn.mnhn.fr/carto/metropole> permet de voir avec plus de précisions où se situent les espaces protégés.

Cependant, l'utilisation de ces données n'a pas pu être menée au cours de cette étude en raison d'une méconnaissance de leur existence, du temps et des délais impartis.

### 5.5.1. Au titre des paysages et du patrimoine

- **Sites classés et inscrits**

La loi du 2 mai 1930 sur la protection des monuments naturels et les sites (articles L 341-1 et suivants du code de l'environnement) permet de protéger durablement des éléments isolés ou des ensembles paysagers remarquables dont la conservation ou la préservation présente, au point de vue « artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque » un intérêt général.

Deux niveaux de protection sont prévus :

- le classement, qui correspond à une protection forte, permet d'assurer un contrôle strict du site par un régime d'autorisation spéciale pour toute modification apportée à son état ou son aspect ;
- l'inscription, qui constitue une garantie minimale de protection, permet d'assurer une surveillance du site en soumettant tout changement d'aspect du site à déclaration préalable.

Le principe de préservation des caractéristiques du site laisse néanmoins la possibilité d'exercer des activités n'affectant pas l'aspect du site. Ainsi, la prospection aérienne et l'exploitation souterraine peuvent être envisagées.

Les listes des sites classés et inscrits sont disponibles auprès des DREAL.

Un fichier national des sites classés (format XLS) a été téléchargé sur le site <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>, mais il n'est pas géoréférencé.

- **Les zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP)**

Les ZPPAUP (zone de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager) ont été créées par la loi du 7 janvier 1983, constituent des servitudes d'utilité publique. Elles visent à définir en accord entre l'État et les collectivités les modalités de gestion d'un secteur urbain d'intérêt patrimonial. Elles ont pour effet de suspendre l'application des servitudes de site inscrit ou d'abords de monuments historiques. Les travaux de construction, de démolition, de transformation ou de modification de l'aspect extérieur des immeubles sont soumis à autorisation spéciale accordée par l'autorité compétente en matière de permis de construire après avis de l'ABF (Architecte des Bâtiments de France).

La loi 2010.788 du 12 juillet 2010 dans ses articles 28 à 31 définit les aires de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine (AVAP) qui remplaceront la ZPPAUP. À compter de l'entrée en vigueur de cette loi (14 juillet 2010), les ZPPAUP existantes ne continuent à produire leur effet que pendant une durée de cinq ans. Avant cette échéance, elles doivent être transformées en AVAP ou retomberont sous le régime des protections antérieures lorsqu'elles préexistent (abords MH [Monuments Historiques] ou sites inscrits).

- **Les aires de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine (AVAP)**

Comme la ZPPAUP, l'AVAP constitue une servitude d'utilité publique. Elle a pour effet de suspendre l'application des servitudes de site inscrit ou d'abords de monuments historiques. Elle est un instrument dédié à la protection et à la mise en valeur du patrimoine bâti et des espaces dans toutes ses composantes (architecturale, urbaine, paysagère, historique et archéologique) associées à des objectifs de développement durable. Elle peut être établie par une ou plusieurs communes ou un établissement public de coopération intercommunale (s'il est compétent en matière d'urbanisme), avec l'assistance de l'ABF, sur tout espace présentant un intérêt patrimonial. Tous les travaux ayant pour objet ou pour effet de transformer ou de modifier l'aspect d'un immeuble, bâti ou non, compris dans le périmètre d'une AVAP, sont soumis à une autorisation préalable délivrée par l'autorité administrative compétente, après avis de l'ABF.

- **Les sites archéologiques**

La carte archéologique nationale, sous responsabilité du Ministère de la Culture et de la Communication recense l'ensemble des sites archéologiques présents sur le territoire. Cette carte est disponible auprès des DRAC. Les sites paléontologiques du Quaternaire s'apparentent aux sites archéologiques. Toute découverte réalisée au cours de travaux doit être immédiatement signalée au maire de la commune concernée. Si l'emprise d'un projet concerne un site archéologique majeur, un avis défavorable sera certainement émis. Une prise en charge des fouilles archéologiques de sauvetage, conduites sous contrôle du service régional archéologique pourrait éventuellement permettre la mise en œuvre de travaux miniers. Dans le cas où le projet s'inscrirait dans un contexte archéologique particulièrement dense, une prospection systématique préalable à toute phase de décapage est prescrite.

- **Paysages de grande sensibilité ou à valeur économique**

- **Zone d'appellation d'origine**

Toute autorisation d'exploitation de carrières est soumise, dans les vignobles classés appellation d'origine contrôlée, vin délimité de qualité supérieure et dans les aires de production de vins de pays, à l'avis du ministre en charge de l'Agriculture, après avis de l'Institut National

de l'Origine et de la qualité et de l'Office national interprofessionnel des vins (Article L.512-6 du Code de l'environnement).

### 5.5.2. Au titre de la protection de la nature

- **Cœurs des Parc nationaux (Figure 20)**

Les parcs nationaux sont des espaces protégés soumis à une réglementation spécifique (articles L331 et R331 du code de l'environnement) qui assure la sauvegarde de leur patrimoine naturel et culturel reconnu comme exceptionnel. La France en compte 10 en 2012. Les parcs nationaux sont organisés en deux secteurs géographiques distincts, où s'applique une réglementation différente. Le « cœur » du parc est un secteur où la réglementation stricte doit permettre d'assurer la protection du patrimoine naturel. L'« aire d'adhésion », est un secteur où les communes sont encouragées à protéger leur environnement afin d'atteindre les objectifs de protection du cœur, tout en assurant un développement économique viable.

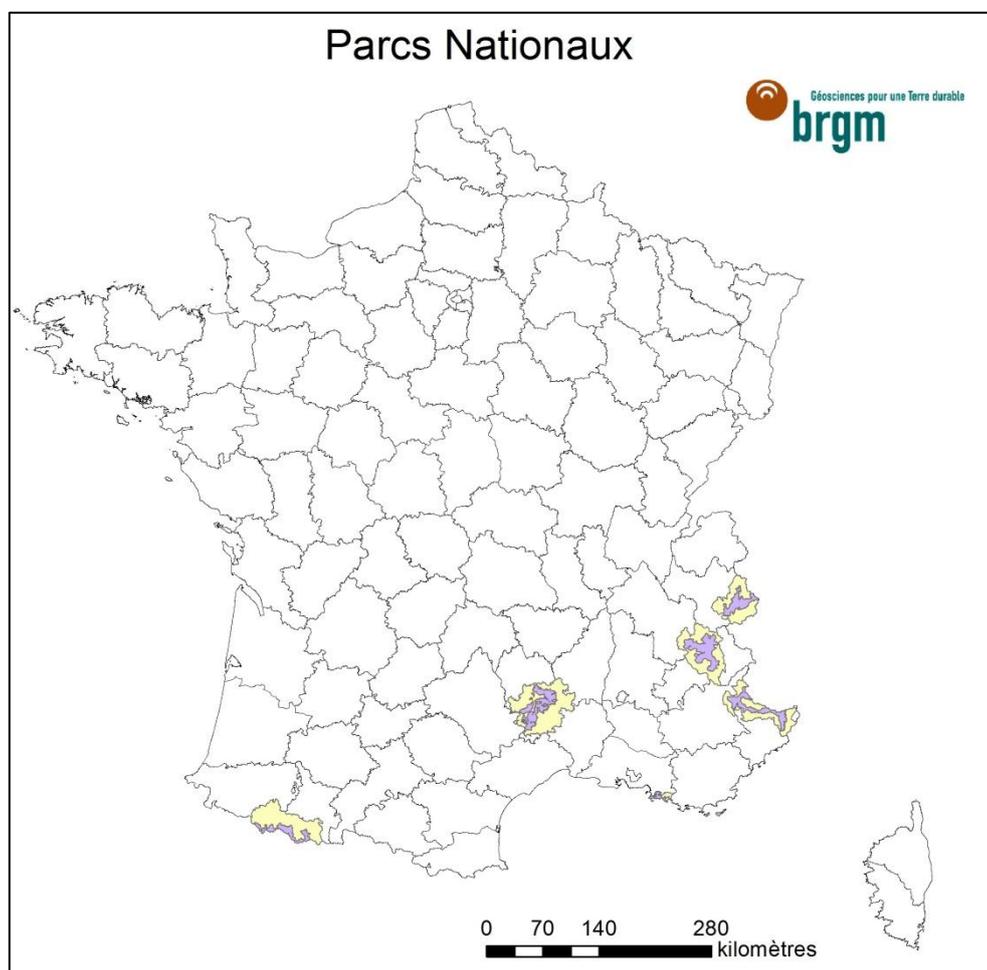


Figure 20\* - Parcs nationaux (en mauve) et aires d'adhésion de parcs nationaux (en jaune) du territoire métropolitain.

\* Cette carte ne prend pas en compte les parcs nationaux d'outre-mer (Guyane, Guadeloupe, Réunion), ni ceux des Calanques et de Port Cros.

Ainsi, l'article L.331-4-1 du code de l'environnement stipule que « les activités industrielles et minières sont **interdites** dans le cœur d'un parc national ».

Les superficies des cœurs de parc sont de l'ordre de 45 000 (exemple du Parc national des Pyrénées) à moins de 105 000 ha (exception faite du Parc Amazonien de Guyane qui couvre 2 millions d'ha) pour une aire d'adhésion de 150 000 à 300 000 ha (1,36 millions d'ha pour le Parc Amazonien de Guyane).

- **Arrêtés préfectoraux de protection de biotope (Figure 21)**

Ce type d'arrêté couvre une aire géographique bien délimitée, dont les conditions particulières (géologiques, hydrologiques, climatiques, sonores...) sont nécessaires à l'alimentation, la reproduction, le repos de certaines espèces. L'arrêté préfectoral de protection de biotope a ainsi pour vocation la conservation de l'habitat d'espèces protégées et se base sur les articles L.411-1 et L.411.2 du code de l'environnement. Il promulgue l'interdiction de certaines activités susceptibles de porter atteinte à l'équilibre biologique des milieux et/ou à la survie des espèces protégées y vivant. Ils couvrent tous des superficies très différentes, la majeure partie d'entre eux (64 %) se situant en-dessous de 50 ha, un quart entre 250 et 1 000 ha. Ces arrêtés couvrent en métropole environ 124 000 ha, soit 0,22 % du territoire national métropolitain.

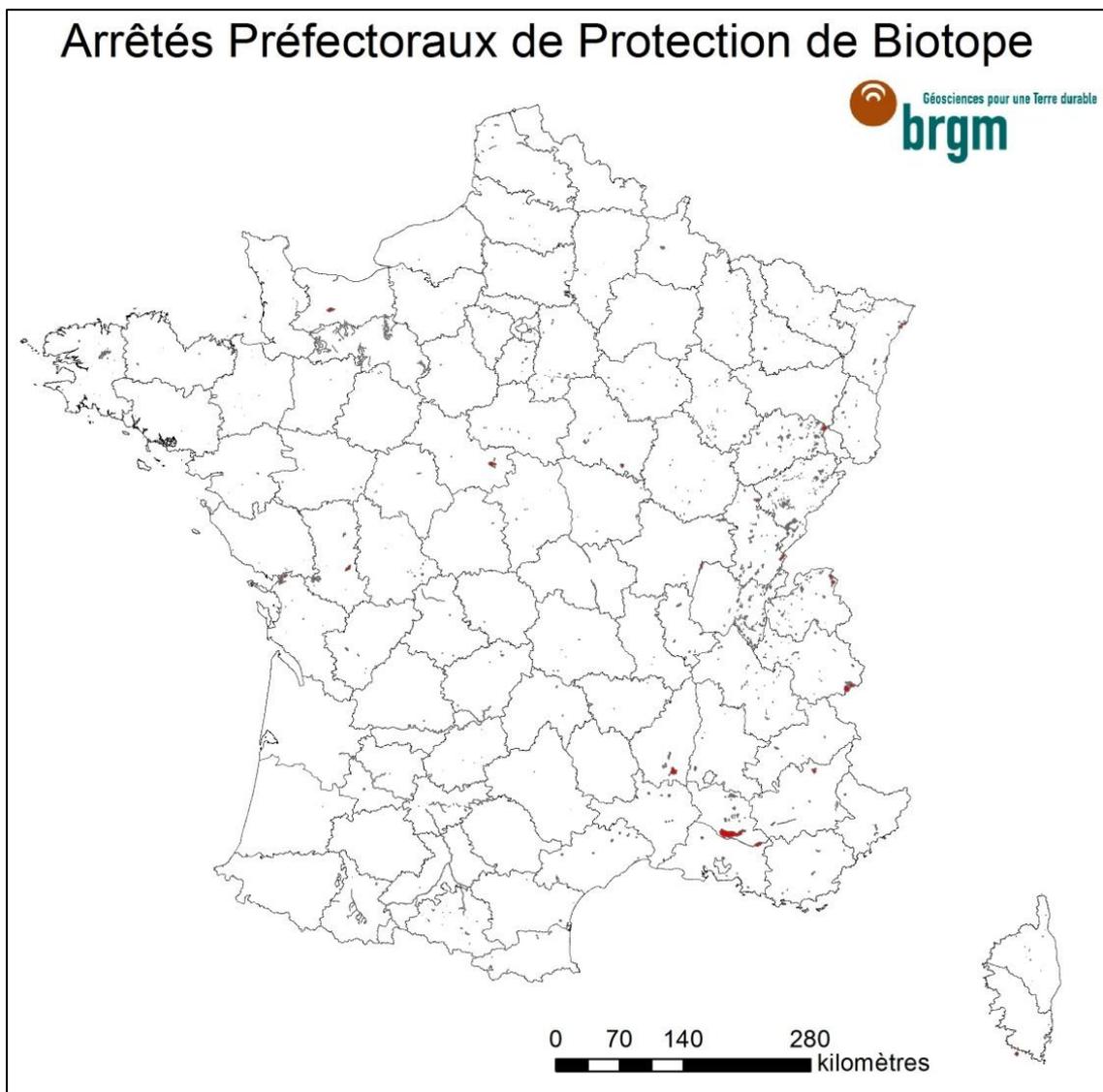


Figure 21 - Carte de répartition des arrêtés préfectoraux de protection de biotope.

- **Réserves naturelles nationales**

L'article L.332.3 du code de l'environnement prévoit que l'acte de classement d'une réserve naturelle nationale peut réglementer ou interdire diverses activités, dont l'exécution de travaux, les activités minières et l'extraction de matériaux concessibles ou non.

On peut également préciser qu'à ce jour le nombre de réserves est le suivant :

- 165 réserves naturelles nationales (RNN) représentant environ 2,75 millions ha (dont près de 480 000 ha hors RN des terres australes françaises) ;
- 6 réserves naturelles de Corse (RNC) sur 83 426 ha ;
- 119 réserves naturelles régionales (RNR) sur 30 380 ha ;

(RNC et RNR = chiffres Réserves Naturelles de France).

Les réserves naturelles nationales sont des « territoires d'excellence » pour la préservation de la diversité biologique et géologique, terrestre ou marine, de métropole ou d'outre-mer. Elles visent une protection durable des milieux et des espèces en conjuguant réglementation et gestion active. Les réserves naturelles nationales forment ainsi des noyaux de protection forte le plus souvent au sein d'espaces à vocation plus large tels que les parcs naturels régionaux, les sites Natura 2000 et les parcs naturels marins.

Elles sont complémentaires des réserves naturelles régionales et de Corse, des parcs nationaux et des arrêtés préfectoraux de protection de biotope, avec lesquels elles constituent l'essentiel du réseau national des espaces naturels à forte protection réglementaire. Elles se distinguent toutefois des arrêtés de protection de biotope par la mise en œuvre d'une gestion patrimoniale. Elles diffèrent également des parcs nationaux, qui ont généralement vocation à protéger des espaces plus vastes, et dont les missions recouvrent la protection de la biodiversité, mais aussi la conservation et la valorisation des patrimoines paysagers et culturels. Elles couvrent des surfaces de 0,6 ha (Réserve géologique du Toarcien) à plusieurs dizaines de milliers d'hectares (ex. : les Bouches de Bonifacio, 79 460 ha essentiellement marins), avec les plus grandes en métropole, les Hauts Plateaux du Vercors (16 600 ha), la Camargue (13 000 ha) ou la Haute Chaîne du Jura (10 800 ha).

- **Zones humides (Ramsar, *Figure 22*)**

Depuis 1986, la France qui a ratifié le traité de Ramsar (du nom de la ville iranienne où s'est tenue la convention de 1971 sur les zones humides) s'est engagée pour la protection des zones humides de son territoire. 42 sites ont ainsi été reconnus d'importance internationale, ce qui représente 3 510 000 ha classés en métropole et outre-mer. La plupart des zones sont déjà protégées en totalité ou partiellement par d'autres statuts (parcs, réserves, sites Natura2000).

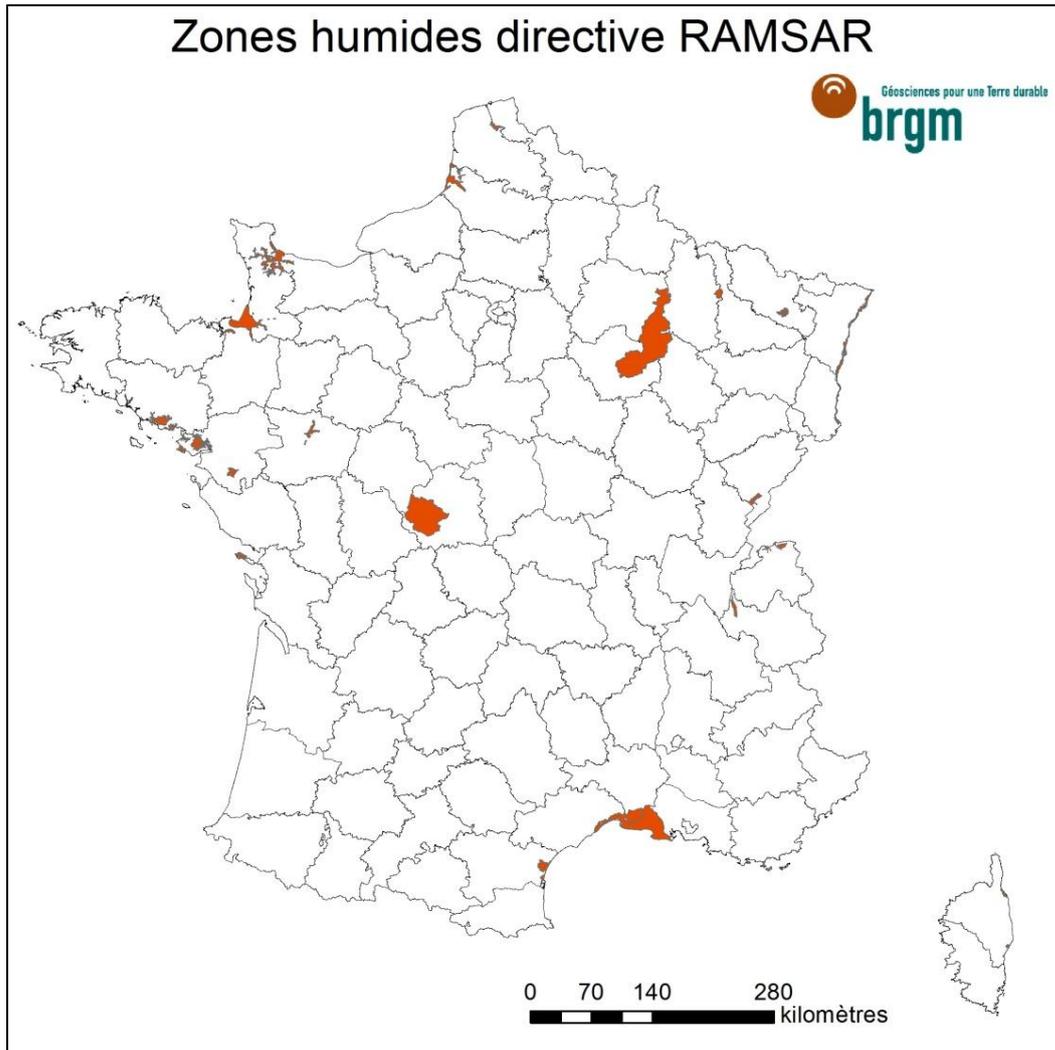


Figure 22 - Cartographies des zones humides protégées du territoire métropolitain (RAMSAR).

- **Espaces Remarquables du littoral**

Découlant de la Loi Littoral (1986), les acteurs publics de l'organisme sont dans l'obligation de protéger les espaces naturels remarquables du littoral. En pratique, la loi contraint les communes à déclarer l'impossibilité de construction de ces espaces. La loi interdit de plus toute construction et installation nouvelle à moins de 100 m du rivage en dehors des zones urbanisées.

- **Sites du Conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres (CELRL)**

Cet établissement, créé en 1975, intervient sur les cantons côtiers en métropole, en outre-mer ainsi que dans les communes riveraines des estuaires, des deltas et des lacs de plus de 1 000 hectares. Il acquiert des terrains fragiles ou menacés à l'amiable, par préemption, ou exceptionnellement à la suite d'opérations d'expropriation. Des biens peuvent également lui être donnés ou légués, voire affectés lorsqu'il s'agit du domaine de l'État. En décembre 2012, le Conservatoire du littoral assurait la protection de 152 000 hectares, représentant 1 500 km de rivages soit plus de 12 % du linéaire côtier.

### **5.5.3. Au titre de la gestion de l'eau**

- **Lits mineurs ou espaces de mobilités des cours d'eau**

Conformément à l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994, l'extraction de matériaux est interdite dans le lit mineur des cours d'eau et dans les plans d'eau traversés par ces cours d'eau.

Plusieurs SDAGE imposent également de fortes contraintes pour les extractions dans l'ensemble du lit majeur.

- **Réservoirs biologiques pré-identifiés au Schéma Départemental d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE)**

Les réservoirs biologiques sont définis par la loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques et correspondent à des cours d'eau, portions de cours d'eau ou canaux nécessaires au maintien ou à l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau d'un bassin versant. Les emprises de ces zones sont disponibles auprès des agences de l'Eau.

Les masses d'eau en très bon état écologique introduites au titre de la directive cadre sur l'eau (DCE), également identifiées dans les annexes des SDAGE, présentent une extraction minière qui n'est pas compatible avec un objectif de non-dégradation.

- **Périmètre de protection immédiate et rapprochée des captages d'eau potable**

La protection des points de prélèvements d'eau destinée à la consommation humaine relève de plusieurs articles du Code de la Santé Publique. Autour d'un captage est déterminé un périmètre de protection immédiat et un périmètre de protection rapproché où peuvent être interdites ou réglementées toutes activités de nature à nuire à la qualité des eaux, et le cas échéant un périmètre de protection éloigné. Ce périmètre peut de plus prendre en compte les bassins versants en amont des captages superficiels ainsi que les bassins versants en amont des zones de vies des populations ayant un usage direct de la ressource en eau.

### **5.5.4. Au titre de l'usage des sols**

- **Plan Locaux d'Urbanisme (PLU)**

Les PLU (ex-POS, Plans d'Occupation des Sols) sont les principaux documents locaux de planification urbaine. Ils fixent les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols. Conformément au Code de l'Urbanisme, le règlement d'un PLU peut interdire ou soumettre à des conditions particulières l'exploitation de carrières et des dispositions particulières concernant les réaménagements post-exploitation. Le PLU doit également protéger les richesses du sous-sol. Les données sont disponibles au niveau des collectivités locales.

### **5.5.5. Au titre du patrimoine naturel**

- **Aires d'adhésion des Parcs Nationaux (*Figure 20*)**

La charte pour son application prévoit des mesures de préservation du patrimoine naturel et culturel (voir également § 5.5.2).

- **Parcs Naturels Régionaux (Figure 23)**

Les parcs naturels régionaux (PNR) sont créés à l'initiative des régions souhaitant mettre en place un projet de territoire fondé sur la protection et la mise en valeur du patrimoine naturel et culturel et des paysages, sur un périmètre pertinent et cohérent. La création d'un PNR est approuvée par l'État, qui prononce le classement du territoire du parc par décret du Premier ministre pour une durée de douze ans renouvelable. La charte du parc définit le projet de protection et de développement du territoire et les règles que se donnent les signataires pour la mise en œuvre de ce projet.

Ces derniers sont tenus d'en respecter les orientations et d'en appliquer les mesures dans l'exercice de leurs compétences respectives, notamment celles qui seraient définies dans le champ de l'exploitation minière. Ainsi, si les PNR ne sont pas associés à des règles particulières de protection de la faune et de la flore, les chartes de PNR peuvent déterminer des orientations et des vocations par zones qui, par le biais des décisions de l'État et des collectivités signataires, auront une incidence sur les activités ayant un impact environnemental dans les zones concernées du parc.

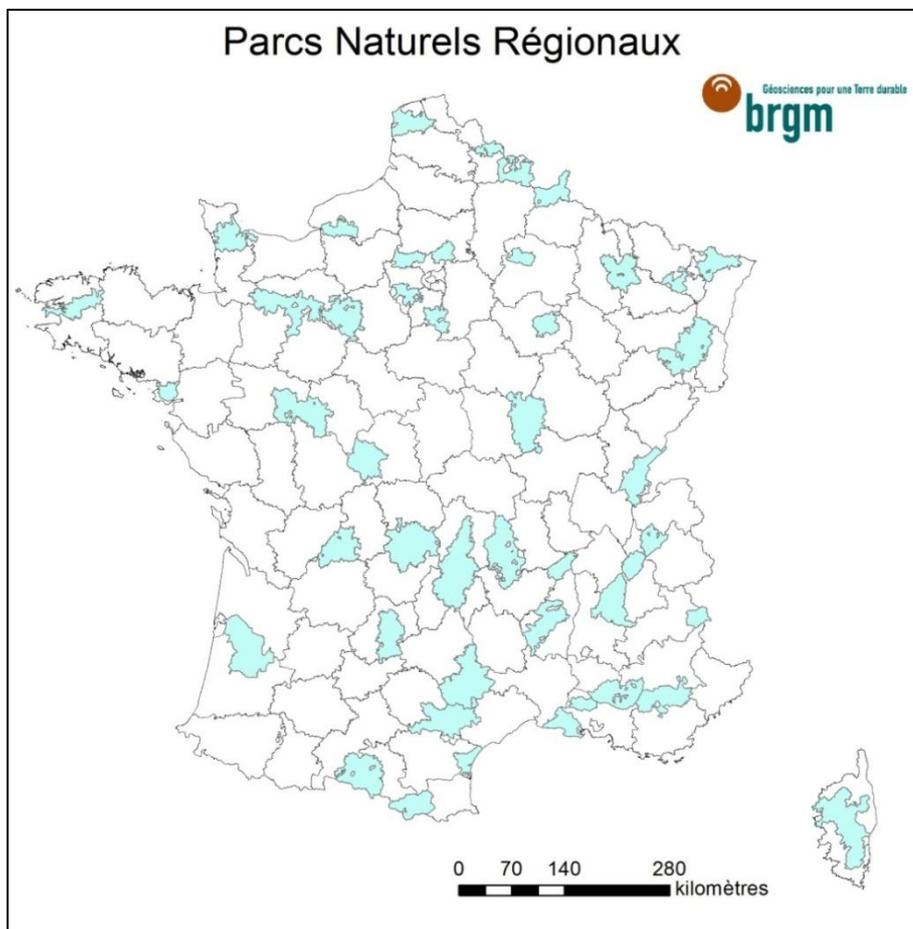


Figure 23 - Cartographie des Parcs Naturels Régionaux du territoire métropolitain.

- **Réserves naturelles régionales**

La compétence de classement et de gestion des Réserves Naturelles Régionales est confiée aux Conseils régionaux. Ceux-ci définissent leur propre politique de classement des sites naturels.

- **Les continuités écologiques de la trame verte et bleue**

En application de l'article R.371-16 du code de l'environnement, la trame verte et bleue est un réseau formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques identifiées par les schémas régionaux de cohérence écologique ainsi que par les documents de l'État et des collectivités à qui cette compétence est reconnue par la loi (documents d'urbanisme, SDAGE, SAGE...).

Ces continuités écologiques sont composées de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques les reliant, elles visent à assurer une cohérence écologique entre les espaces naturels, agricoles ou forestiers d'un territoire notamment pour permettre aux espèces animales et végétales de se déplacer pour assurer leur cycle de vie et favoriser leur capacité de déplacement.

L'identification de ces éléments dans les schémas régionaux de cohérence écologique en cours d'élaboration et adoptés est disponible auprès des co-élaborateurs des schémas : les DREAL et les conseils régionaux.

Ces schémas définissent des objectifs de préservation ou de remise en bon état pour chaque élément de trame verte et bleue. Ils peuvent par ailleurs contenir des orientations, préconisations et engagements vis-à-vis d'activités humaines pouvant inclure les activités minières.

- **ZNIEFF de type 1 (*Figure 24*)**

L'inventaire des Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) défini par la circulaire du 14 mai 1991 est un outil de connaissance du patrimoine naturel qui ne constitue pas une mesure de protection juridique directe. Toutefois, l'un de ses objectifs est l'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire. Les ZNIEFF de type 1 sont des sites identifiés et délimités parce qu'ils contiennent des espèces ou au moins un type d'habitat de grande valeur écologique, locale, régionale, nationale ou européenne.

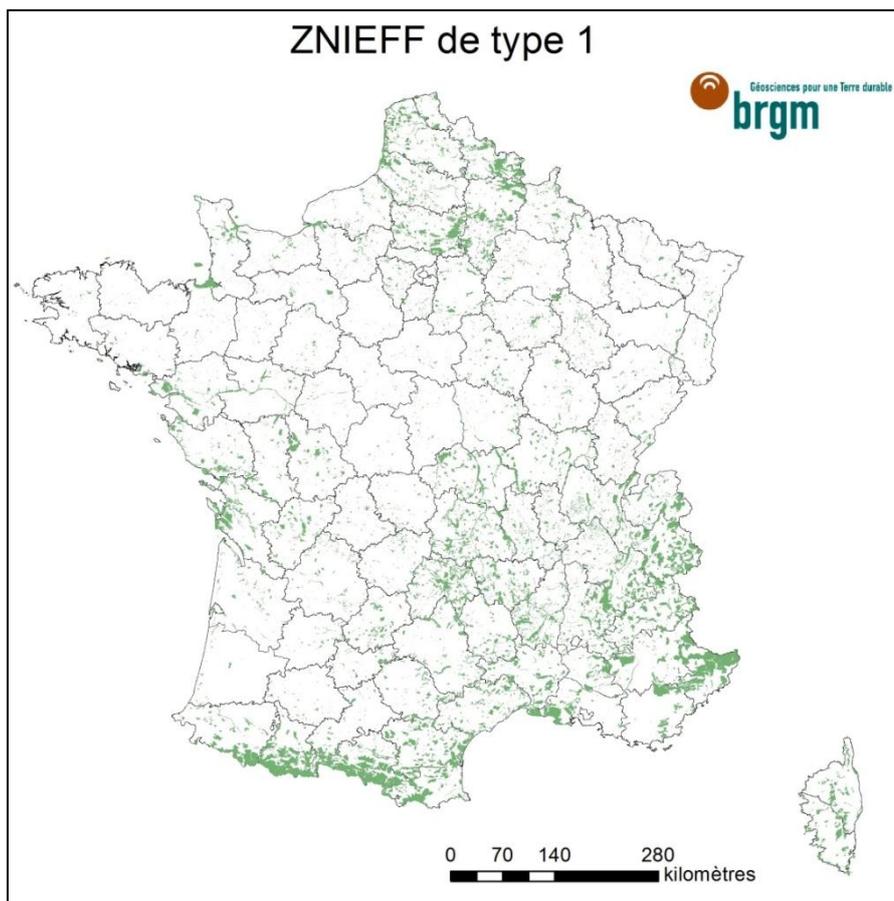


Figure 24 - Cartographie des Zones classées ZNIEFF1 du territoire métropolitain.

- **ZNIEFF de type 2 (Figure 25)**

Les ZNIEFF de type 2 concernent les grands ensembles naturels, riches et peu modifiés avec des potentialités biologiques importantes qui peuvent inclure plusieurs zones de type 1 ponctuelles et des milieux intermédiaires de valeur moindre mais possédant un rôle fonctionnel et une cohérence écologique et paysagère.

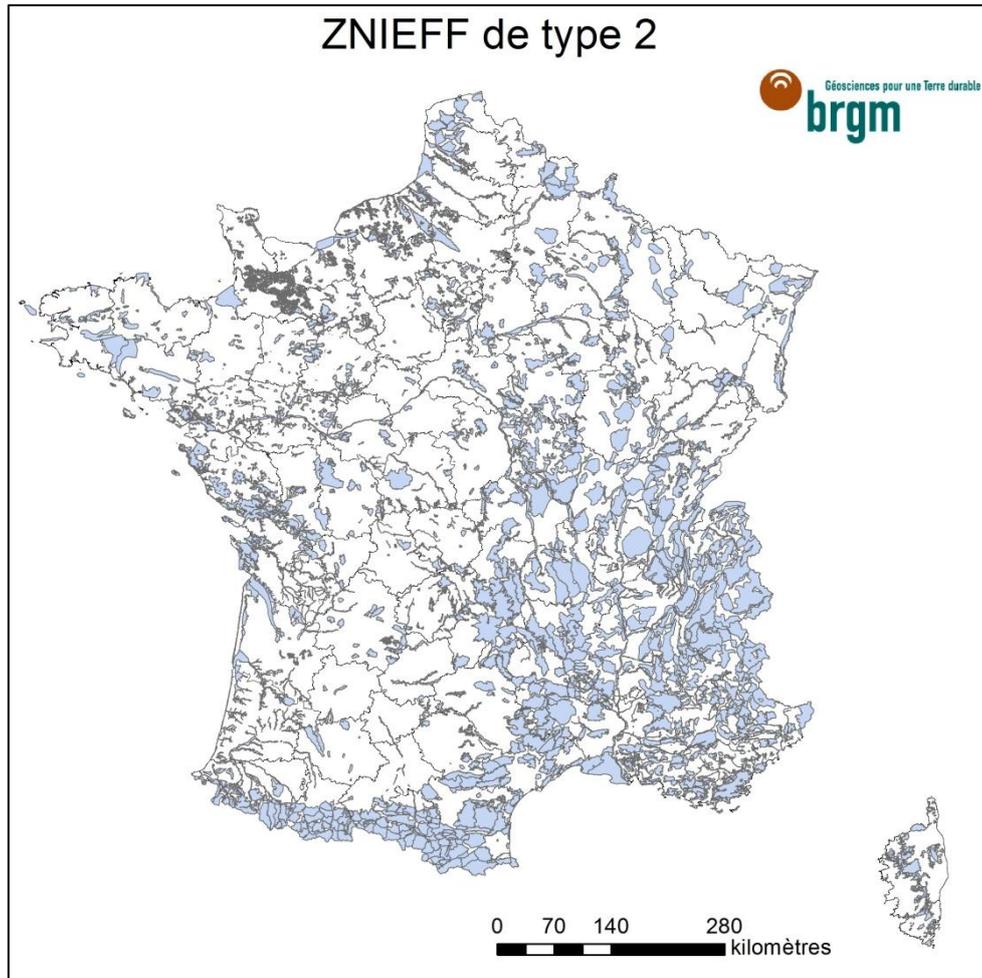


Figure 25 - Cartographie des zones classées ZNIEFF2 du territoire métropolitain.

- **Réserves de biosphère (Figure 26)**

Elles sont une reconnaissance par l'UNESCO de zones modèles conciliant la préservation de la biodiversité et le développement durable, dans le cadre du programme sur l'Homme et la biosphère (MAB). La gestion dépend de la juridiction nationale et s'appuie sur des structures gestionnaires d'espaces naturels telles que les parcs naturels régionaux, parcs nationaux ou association. Elles sont organisées en trois zones : aires centrales, zones tampons et zones de transition (également dites de coopération). La désignation d'un espace en réserve de biosphère ne génère pas, par elle-même, de contrainte spécifique, mais se superpose à des outils œuvrant à la préservation de la biodiversité et au développement durable des territoires.

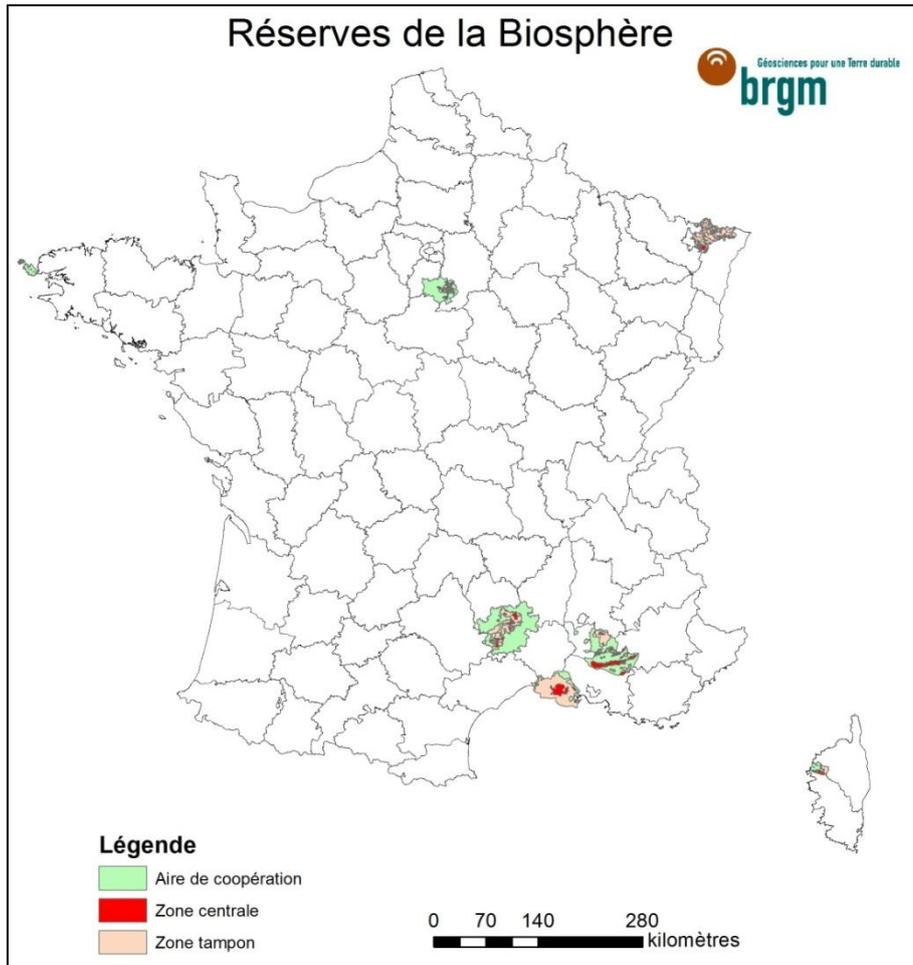


Figure 26 - Cartographie des réserves de la Biosphère.

- **Les sites Natura 2000 (zones Spéciales de Conservation et zones de Protection Spéciale) (Figure 27)**

L'article L.414.4 du Code de l'Environnement définit la nécessité d'une évaluation des incidences au regard de la conservation des sites Natura 2000 pour tout projet d'activité, prévu à l'intérieur ou à l'extérieur d'un site Natura 2000, et qui est susceptible de l'affecter de manière significative.

L'évaluation des incidences a pour but de vérifier la comptabilité d'une activité avec les objectifs de conservation des sites Natura 2000. Elle est ciblée sur les habitats naturels et espèces pour lesquels les sites Natura 2000 ont été désignés et est proportionnée à la nature et à l'importance des incidences potentielles du projet.

Les activités soumises à évaluation des incidences Natura 2000 sont listées sur une liste nationale figurant à l'article R.414-19 du code de l'environnement et des listes locales arrêtées par les préfets de département et les préfets maritimes ; ce système de listes est en outre complété par une clause de sauvegarde (article L.414-4 IV bis du Code de l'Environnement).

Les projets pourront être autorisés si les enjeux de conservation des sites Natura 2000 ne sont pas menacés. Dans le cas contraire, ils ne pourront être autorisés que s'ils répondent à certaines conditions et sous réserve de la mise en œuvre de mesures compensatoires, après informations ou avis de la Commission européenne.



Figure 27 - Cartographie des sites Natura 2000.

Le réseau Natura 2000 concerne des sites naturels ou semi-naturels de l'Union Européenne ayant une grande valeur patrimoniale (1 753 sites en France en incluant l'espace marin), par la faune et la flore exceptionnelles qu'ils contiennent. La constitution du réseau Natura 2000 a pour objectif de maintenir la diversité biologique des milieux, tout en tenant compte des exigences économiques, sociales, culturelles et régionales dans une logique de développement durable, et sachant que la conservation d'aires protégées et de la biodiversité présente également un intérêt économique à long terme.

Les sites Natura 2000 sont désignés au titre soit de la directive « oiseaux » (zone de protection spéciale), soit de la directive « habitats, faune, flore » (zone spéciale de conservation).

Les zones de protection spéciales (ZPS) concernent la conservation d'habitats des espèces d'oiseaux figurant à l'annexe de la directive « oiseaux » ainsi que les espèces migratrices non visées à cette annexe et dont la venue en France est régulière. 384 ZPS ont été notifiées au titre de la directive « oiseaux » correspondant à une superficie terrestre de 4,35 millions d'hectares, soit 8 % du territoire national métropolitain, auxquels s'ajoute une superficie marine de l'ordre de 3,46 millions d'hectares.

Les zones spéciales de conservation (ZSC) concernent la conservation des types d'habitats naturels et des habitats d'espèces figurant à l'annexe de la directive « habitats-faune-flore ». La

France a proposé à la Commission 1 369 sites au titre de la directive « habitats-faune-flore », totalisant une superficie de 4,66 millions d'hectares terrestres, soit 8,5 % du territoire national métropolitain, auxquels s'ajoute une superficie marine de l'ordre de 2,68 millions d'hectares.

Certains sites Habitats (ZSC) et Oiseaux (ZPS) se recouvrent partiellement.

- **Réserves Biologiques**

Les réserves biologiques concernent les forêts relevant du régime forestier et gérées à ce titre par l'Office national des forêts (ONF).

En fonction des objectifs recherchés, deux types de réserves biologiques peuvent être créés :

- d'une part, les réserves biologiques intégrales (RBI), qui sont consacrées à la libre évolution d'écosystèmes forestiers, et qui ne font l'objet d'aucune exploitation forestière ;
- d'autre part, les réserves biologiques dirigées (RBD), qui ont pour objectif la conservation des éléments remarquables du patrimoine naturel (habitats, espèces) des forêts gérées par l'ONF, et qui, contrairement aux RBI, font l'objet d'une gestion conservatoire active pour la restauration et l'entretien des écosystèmes.

Certaines d'entre elles sont interdites d'accès. Leur superficie varie de moins d'un hectare à plusieurs milliers d'hectares.

- **Les Espaces Boisés à Conserver (EBC)**

Les EBC sont définis par le Plan d'Occupation des Sols. Ils peuvent s'appliquer aussi bien à des arbres isolés, des haies ou réseaux de haies, qu'à des espaces boisés plus conséquents. Seule une procédure lourde de révision du Plan d'Occupation des Sols par la commune pourrait permettre un déclassement.

- **Les forêts de protection**

Ce statut a été créé en 1922 pour lutter contre l'érosion des sols en montagne, et la défense contre les risques naturels (avalanches, glissements de terrain...) ainsi que contre l'envahissement des eaux et des sables en zone côtière. Il a été élargi en 1976, par la loi sur la protection de la nature, aux forêts dont le maintien s'impose soit pour des raisons écologiques, soit pour le bien-être de la population pour les forêts péri-urbaines. À ce jour, **150 410 ha sont concernés par ce statut**, soit 1 % de la surface forestière métropolitaine.

- **Les Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) (Figure 28)**

Les ZICO sont des sites d'intérêt majeur qui hébergent des effectifs d'oiseaux sauvages jugés d'importance communautaire. Leur inventaire a été établi par le ministère en charge de l'environnement suite à l'adoption de la directive européenne dite « Directive Oiseaux ». Les ZICO les plus appropriées à la conservation des espèces les plus menacées font désormais totalement ou partiellement partie du réseau Natura 2000 au niveau des Zones de Protection Spéciales (ZPS).

- **Espaces Naturels Sensibles Départementaux**

La loi n°85-729 du 18 juillet 1985 donne compétence aux départements pour mettre en œuvre une politique de protection, de gestion et d'ouverture au public des Espaces Naturels Sensibles.

Cette loi n'induit pas de contraintes réglementaires, en revanche, le développement d'un projet minier sur un site concerné nécessitera la consultation du Conseil général.

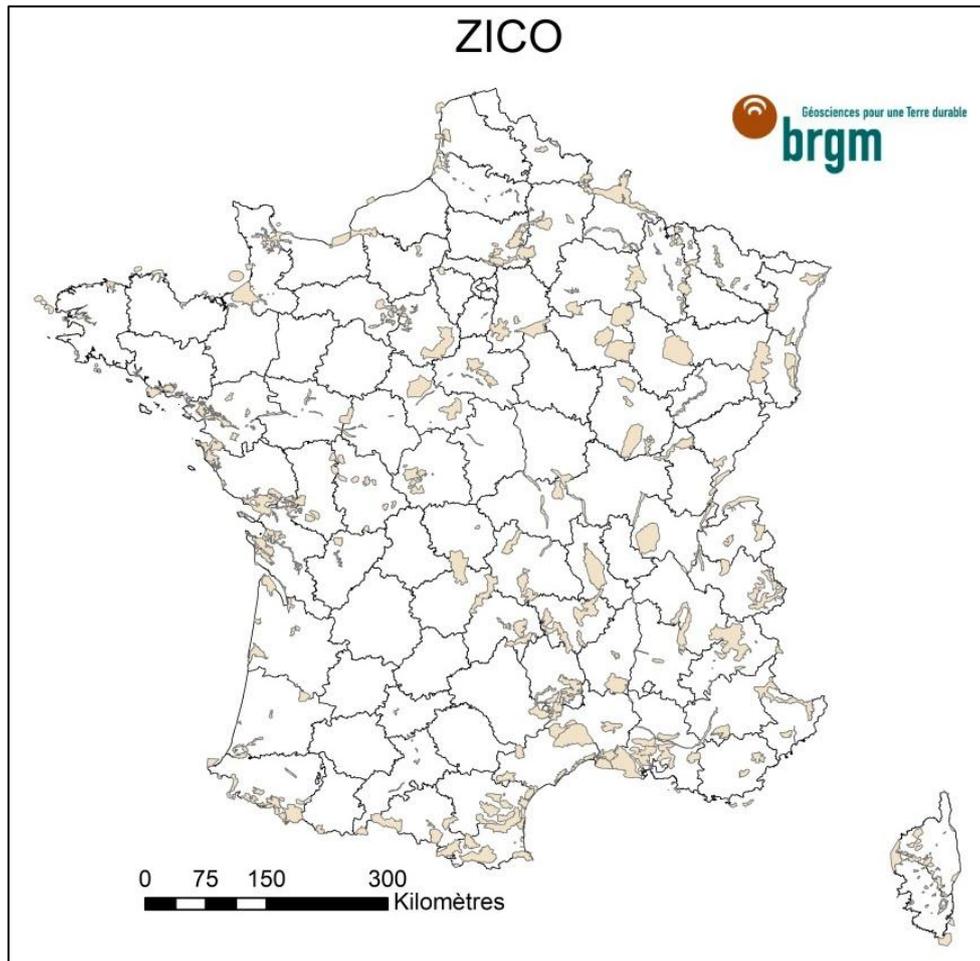


Figure 28 - Cartographie des zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO).



## 6. Développement d'un Système d'Information Géographique national

### 6.1. STRUCTURATION DES GEODATABASES

Afin de faciliter leur gestion et exploitation, les données numériques disponibles (de l'Inventaire minier et hors Inventaire minier) ou produites (e.g. métadonnées géographiques) ont été regroupées et compilées dans une géodatabase nationale sous ArcGIS. Cette géodatabase, nommée **Sig\_Mines\_France.gdb**, a été construite sur le modèle de celle du SIG Mines France et couvre l'ensemble du territoire. Toutes les données élémentaires sont géoréférencées et donc directement utilisable par les systèmes d'information géographique. Les données utiles pour la zone d'étude test ont été extraites de la base nationale et intégrées dans une géodatabase régionale afin d'effectuer les traitements (voir paragraphe 8.2). Ultérieurement, les données issues de ces traitements, ainsi que les études détaillées de prospectes (*cf. infra*, Tâche numéro 2, paragraphe 7.2) seront intégrées dans le SIG national.

### 6.2. DETAIL DES CLASSES D'ENTITES

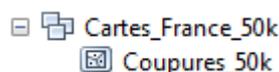
La base principale comprend un certain nombre de jeux de classes d'entités (*Figure 29*). Chacun d'eux contient une ou plusieurs classes d'entités, regroupées par thématique. Leur nom a été choisi de manière suffisamment explicite pour renseigner le contenu de la classe.



Figure 29 - Les classes d'entités de la géodatabase Sig\_Mines\_France, couvrant le territoire national et contenant les données numériques disponibles.

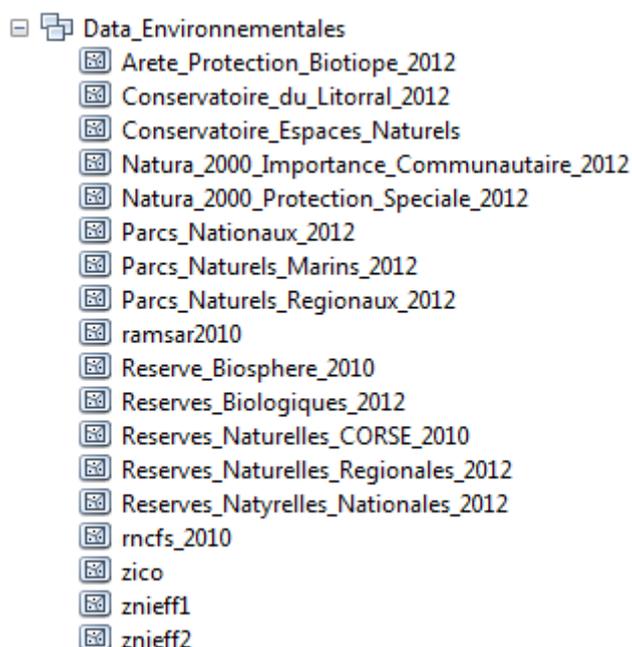
### 6.2.1. Le découpage au 1/50 000 de la France

Ce jeu contient le tableau d'assemblage<sup>5</sup> de la carte géologique de la France à 1/50 000 avec, par feuille, le nombre et la qualité des analyses géochimiques réalisées au titre de l'Inventaire minier.



### 6.2.2. Les données environnementales

Ce jeu contient toutes les zones de contraintes environnementales, pouvant avoir un impact sur l'activité humaine. Lorsqu'elle est connue, l'année d'actualisation de la donnée figure dans le nom de la classe.



### 6.2.3. Le fond géographique

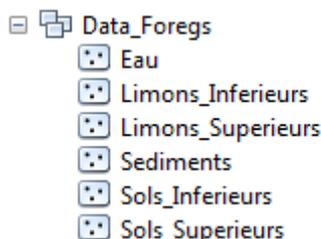
Le fond géographique utilisé se compose des unités territoriales : communes, départements et régions.



<sup>5</sup> Il n'était pas envisageable d'intégrer la totalité des coupures au 1/50 000 dans le SIG national. En revanche, il était indispensable d'avoir le tableau d'assemblage des coupures au 1/50 000, de nombreux travaux de l'Inventaire étant identifiés/référencés à partir de ces coupures.

#### 6.2.4. Données du FOREGS

Ce jeu contient les résultats des analyses géochimiques effectuées en France dans le cadre du programme européen FOREGS.



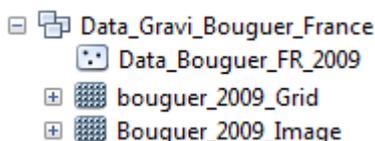
#### 6.2.5. Données GEMAS

Ce jeu contient les résultats des analyses de sols conduites par le GEMAS (Groupement d'Études Méthodologiques pour l'analyse des sols).



#### 6.2.6. Données de géophysique, gravimétrie

Ce jeu contient : 1) les données ponctuelles des 420 000 stations gravimétriques du territoire français et 2) une carte interpolée de ces données à la maille du kilomètre.



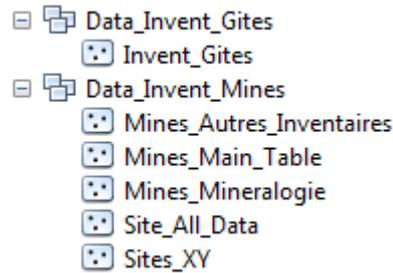
#### 6.2.7. Données alluvionnaires Inventaire minier

Ce jeu est constitué des données brutes (points) et de l'emprise minimale de leurs zones d'emprise (polygones).



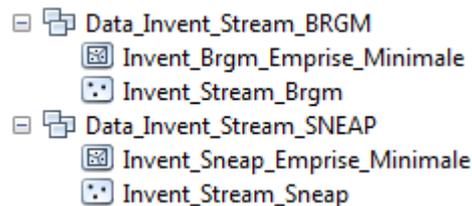
#### 6.2.8. Mines, gisements et indices miniers

Cette catégorie est constituée de deux jeux de classes d'entités qui sont 1) les gîtes et indices, et 2) les mines existantes ou anciennes.



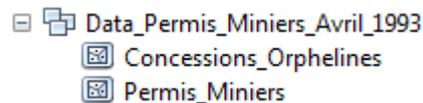
### 6.2.9. Données géochimiques de l'Inventaire minier

Deux opérateurs ont réalisés les analyses de sédiments de ruisseau pour l'Inventaire minier : le BRGM et la SNEA(P). Comme les éléments analysés et les techniques analytiques étaient différents, nous avons distingué les données produites par chaque institution dans deux jeux de classes d'entités distincts.



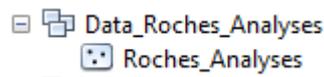
### 6.2.10. Permis miniers et concessions orphelines

Ce jeu contient les données actualisées à avril 1993 des permis miniers par le BRGM (Service des Ressources Minérales), date à laquelle celui-ci a transféré l'ensemble de son actif minier à LaSource et n'a plus assuré le suivi des titres miniers en France pour le compte du ministère.



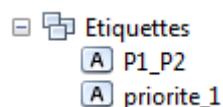
### 6.2.11. Analyses roches

Ce jeu contient les données d'analyses de roches disponibles (source : SIG Mines France, [http://sigminesfrance.brgm.fr/sig\\_roches.asp](http://sigminesfrance.brgm.fr/sig_roches.asp)).



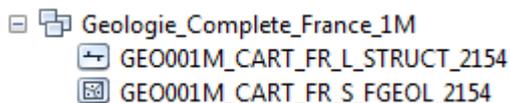
### 6.2.12. Etiquettes

Ce jeu contient les étiquettes au format annotations pour les noms des gisements classés en priorité 1 et en priorité 2.



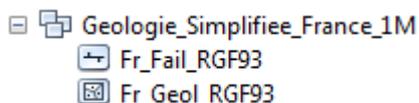
### 6.2.13. Géologie complète de la France au 1 / 1 000 000

Ce jeu contient les données de la carte géologique complète de la France à l'échelle du 1 / 1 000 000 en deux classes d'entités distinctes, linéaire pour les éléments structuraux et surfacique pour la géologie.



### 6.2.14. Géologie simplifiée de la France au 1 / 1 000 000

Ce jeu contient les données de la carte géologique simplifiée de la France à l'échelle du 1 / 1 000 000. Cette carte géologique très synthétique ne comprend que huit classes lithologiques.



### 6.2.15. Métadonnées

Cette catégorie est constituée de trois jeux de classes d'entités qui sont : 1) les métadonnées des campagnes de géophysique aéroportée ; 2) les métadonnées des forages et lignes sismiques de l'industrie pétrolière du BEPH (Bureau Exploration-Production des Hydrocarbures du MEDDTL) et 3) les métadonnées géographiques des travaux de géochimie de l'Inventaire minier détaillées dans le chapitre 4.1 du présent rapport.



### 6.2.16. Tables simples non géoréférencées

Ces deux tables sont : 1) le classement par ordre de priorité des 157 gîtes et indices retenus et 2) le lexique pour les états des titres miniers en France.





## 7. Description de la méthodologie proposée

### 7.1. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE

La mise au point du déroulé méthodologique pour la reprise des données de l'Inventaire recouvre en pratique deux actions :

- établir la liste des tâches / actions à accomplir, avec (i) la description - aussi exhaustive que possible - de leur contenu et du résultat ou livrable attendu, et (ii) leur enchaînement (fonctionnement en parallèle ou séquentiel), en veillant à la logique du déroulement et à l'introduction de points de validation des choix ou des résultats ;
- s'assurer en parallèle de la faisabilité de la méthodologie proposée. Pour cela, la réalisation des tâches suggérées a été entreprise, faisant apparaître ici ou là des contraintes à prendre en compte, ce qui a permis d'affiner certaines parties du déroulé. Ce travail était d'autant plus indispensable qu'un test d'application / validation grandeur nature devait être effectué sur une zone à définir.

Le déroulé méthodologique peut être divisé en deux grandes phases : (i) la préparation des données qui inclut les tâches 1, 2, 3 et 4 et (ii) le traitement des données avec les tâches 5, 6, et 7 (voir tableau pages suivantes).

En pratique, la préparation des données a été largement entamée. Ce travail, qui sera à compléter lors des études ultérieures, constitue un socle sur lequel pourront s'appuyer les futures actions.

- **Tâche 1 : inventaire des données**

Loin d'être triviale, cette tâche est probablement l'une parmi les plus difficiles. Si nombre de couches de données ne posent pas de problème particulier, étant déjà au format digital, tel n'est pas le cas de toutes les données issues de l'Inventaire. La très grande majorité des travaux de l'Inventaire est antérieure à l'informatisation, aussi les résultats sont consignés dans des rapports et des cartes sur support papier, dont la valeur scientifique et l'intérêt sont inégaux (rapports de synthèse, rapport d'avancement), sans que l'on puisse rejeter ou négliger tel ou tel document (un sondage peut être décrit en grand détail dans un rapport d'avancement, avec une excellente information sur les intersections minéralisées, information qui pourra n'être reprise que partiellement dans un rapport de synthèse). Or, ces documents représentent plusieurs centaines de mètres linéaires (voire plusieurs milliers selon une estimation de P. Lebreton, note interne BRGM). Si un certain pourcentage de ces rapports a été digitalisé et indexé (à la fois dans le cadre de la mise en place d'une politique de l'archivage et aussi pour des besoins divers), il reste à exploiter une masse considérable de documents. La tâche 1 avait donc pour objectif d'établir un catalogue de métadonnées qui ne peut prétendre – loin s'en faut – être exhaustif en ce qui concerne l'Inventaire. Il sera complété au fur et à mesure des besoins futurs du projet qui amèneront à rechercher, exhumer, scanner..., de nouveaux documents.

- **Tâche 2 : Réévaluation métallogénique des prospectifs issus de l'Inventaire dans le contexte économique actuel**

En 2012, cette tâche s'est attachée à identifier, sur la base des travaux de synthèse antérieurs et en prenant en compte le contexte économique actuel, les sujets, groupes de sujets, ou zones qui mériteraient de retenir l'attention (voir paragraphe 3.4). Lors des études ultérieures, il s'agira de mieux définir le degré de connaissance des zones susceptibles d'être retenues en exploitant

les rapports dédiés et en synthétisant les informations spatiales (géologie locale, contrôles structuraux, anomalies, travaux de surface et de subsurface...) dans une couche qui viendra alimenter le SIG national et sera reprise dans le SIG régional. De même, les documents exploités à cette occasion viendront alimenter la couche « Métadonnées » décrite précédemment. En pratique, il serait souhaitable que plusieurs cibles soient pré-sélectionnées en accord avec le commanditaire de manière à : (i) éviter des études peu judicieuses et (ii) éviter de perdre du temps si une des cibles se révélait impropre à une étude plus détaillée (données insuffisantes, peu fiables...).

- **Tâche 3 : Application du filtre « Filières industrielles / emplois »**

Cette tâche a été placée à ce niveau – et non avant la tâche portant le n° 2 – de manière à ne pas « entraver » et limiter la revue des sujets possibles sur les plans métallogénique et minier (ce qui aurait vraisemblablement réduit de manière significative le nombre des sujets potentiellement intéressants et aurait laissé à cette étude un arrière-goût d'inachevé). D'un autre côté, le « filtre » Filières industrielles (et emplois) est fondamental. Les experts s'accordent à reconnaître (Ch. Hocquard, comm. pers.) que concernant les matières premières primaires, on ne devrait raisonner qu'en terme de chaîne d'approvisionnement (mine, précurseur, métal, alliages/compounds, semi-produits, composants). (...) Rechercher et exploiter en Europe des gisement de métaux rares pour devoir exporter les produits miniers sans pouvoir les valoriser en Europe ne résout en rien les risques d'approvisionnement. En fait, si c'est pour exporter les produits miniers hors de l'Europe, il vaut mieux disposer en Europe des capacités de transformation et importer les produits miniers de pays stables. Il ne faut donc pas confondre l'enjeu majeur de l'approvisionnement avec celui des sociétés minières. Aujourd'hui, un gisement économique identifié sur le territoire national ne devrait être exploité que si une « supply chain » complète permet de le valoriser jusqu'aux produits utilisables par l'industrie manufacturière (à l'instar du projet « Mine to Magnet » pour les terres rares aux Etats-Unis). » Ch. Hocquard conclut que « le raisonnement ne devrait donc pas débiter par l'amont géologique, mais venir de l'aval, c'est-à-dire de la meilleure connaissance des capacités des filières européennes de transformation. » On notera (i) que l'on pourrait bien entendu dans cette communication remplacer le nom « Europe » par le nom « France », que (ii) la conclusion va un peu à l'encontre de ce qui a été adopté pour la position de la tâche 3 dans le déroulé (les raisons en sont données) et (iii) qu'elle n'envisage pas le développement de nouvelles filières.

Ce filtre a été pris en compte pour le choix de la zone testée en 2012 (voir § 7.1) et devra être redéfini pour chaque nouvelle substance (ou groupe de substances) étudiée. *Pour le volet « Emplois » lié à ce filtre « Filières », un appui du MEDDE/Bureau des Ressources Minérales sera sollicité afin de bénéficier des sources d'information les plus pertinentes.*

- **Tâche 4 : Développement du SIG national « Méthodologie Reprise Inventaire » [métadonnées et données] au format ArcGIS**

Toutes les données acquises précédemment au cours de la réalisation des tâches 1 et 2 sont venues alimenter un SIG d'échelle nationale. Si plusieurs couches d'information peuvent être considérées comme définitives (couches « Données générales », certaines couches "Données détaillées" telle que la Géochimie Inventaire), d'autres, en revanche, évolueront et seront complétées au fur et à mesure des études futures (Métadonnées, Géophysique Inventaire à valeur locale, Données sur les prospectifs issus de la réévaluation...). Enfin, certaines couches à valeur générale (e.g., Couches « Environnement et zones protégées »), mais nécessitant un important travail de compilation, seront à achever en 2013. Ainsi, le développement du SIG qui représente le cœur du système et la plateforme à partir de laquelle les traitements pourront être lancés est déjà largement engagé.

Un **point de validation des choix** est affiché en fin de tâche 4 (plutôt qu'en fin de tâche 3) car la possibilité de visualiser l'ensemble des paramètres relatifs au choix d'une zone à éventuellement réétudier est un facteur essentiel. Il marque la fin de la phase de préparation des données et le passage à la phase de traitement. En pratique, ce point de validation marquera la fin d'un processus de concertation initié au cours des tâches 2 et 3 : le travail de réévaluation métallogénique (tâche 2) ne peut être entrepris que sur un lot de « cibles » *a priori* agréées par le commanditaire (afin d'éviter des travaux inutiles ou non prioritaires – cf. supra). Il s'agira donc ici de s'assurer, via un dialogue experts / commanditaire, de la faisabilité du traitement (nombre de données suffisant, qualité des données, possibilité de monter un modèle de données efficace...) afin d'arrêter un (ou des) choix définitif(s).

- **Tâche 5 : Étude régionale**

Il s'agit ici d'engager la phase dite « de traitement ». Cette phase comportera notamment la création d'un SIG régional dédié à la zone étudiée. Ce SIG sera dans une large mesure créé par extraction du SIG national de manière à n'utiliser que les données pertinentes indispensables au calcul des cartes de potentiel et/ou de prédictivité. Ce SIG pourra éventuellement être complété par des données adaptées à l'échelle (ou encore à la résolution) du traitement, comme par exemple un fond géologique au 1/250 000. Si nécessaire, des réanalyses d'échantillons peuvent être envisagées à ce stade afin de confirmer (ou infirmer) des anomalies et rechercher la présence d'éléments non analysés à l'époque. Si les résultats intermédiaires obtenus en cours de traitement le justifiaient, un ré-échantillonnage terrain ciblé devrait pouvoir être entrepris. Le traitement des données s'appuie sur un modèle de données qui est fonction de la typologie des minéralisations recherchées, de leur modalité de formation ou de piégeage (contrôle magmatique, structural...) et de leur signature attendue (signature géochimique et géophysique), et qui fera appel aux données contenues dans les couches thématiques idoines. Ce modèle de données est utilisé pour calculer les cartes dites de « prédictivité » dont le principe est d'apprendre à partir des gisements et indices existants d'une typologie donnée pour en déduire les zones à prospecter en priorité. L'approche BRGM repose sur le traitement statistique des données combiné à une supervision par un expert, de manière à éliminer les artefacts de calcul dès leur apparition (*e.g.*, Billa *et al.*, 2004 ; Roy *et al.*, 2006 ; Cassard *et al.*, 2008). La méthodologie de calcul, largement dépendante du set de données initial, n'est donc pas paramétrable *a priori*. De plus, elle sera également différente si la substance recherchée est la substance principale du gisement ou simplement une substance connexe (par exemple Ge dans les gisements de Zn ou Re dans les porphyres à Cu-Mo). Dans ce dernier cas, il ne s'agira plus de rechercher des extensions aux zones connues, mais d'identifier et de hiérarchiser, par un ensemble de requêtes sur la base de données « Gisements et indices », les gisements qui pourraient être potentiellement porteurs (et pour lesquels la substance n'aurait pas encore été identifiée ; *e.g.* Cassard *et al.*, 2012b).

- **Tâche 6 : Application du « masque » environnemental et réglementaire et introduction de la dimension sociétale**

Cette tâche a pour objet de moduler l'approche purement scientifique en défalquant les zones « protégées » ou présentant des contraintes particulières des cartes de potentiel ou de prédictivité et en surimposant à ces résultats les données relatives aux populations ainsi que celles relatives aux infrastructures. Le document obtenu devrait donc fournir une vision aussi réaliste que possible, « opérationnelle », du potentiel minéral de la zone étudiée.

- **Tâche 7 : Validation des résultats par le commanditaire**

Ce second point de validation est l'occasion de présenter les traitements et de commenter les résultats. Si ces résultats sont jugés satisfaisants (indépendamment du fait qu'ils fournissent

une vision optimiste ou au contraire pessimiste), ils feront alors l'objet de la rédaction d'une note de synthèse incluant la description des traitements mis en œuvre et des résultats obtenus, accompagnée des données digitales utilisées sur CD-ROM au format ArcGIS. *A contrario*, si des paramètres retenus pour le traitement semblaient améliorables (modalités à définir au cas par cas), un retraitement pourrait alors être envisagé.

Le déroulé méthodologique présenté ici est décrit ci-après sous forme (i) de tableau permettant de visualiser de manière synthétique le contenu de chaque tâche, et (ii) de « flow chart » (Figure 30) montrant que l'enchaînement des tâches n'est pas que séquentiel, plusieurs d'entre elles pouvant être menées de front. Par ailleurs, il a été vu (1<sup>er</sup> point de validation) que le découpage en tâches adopté pour faciliter la présentation du déroulé méthodologique est moins « strict » qu'il n'y paraît de prime abord et que le bon sens et la concertation ont évidemment toute leur place.

## 7.2. LE DEROULE METHODOLOGIQUE SOUS FORME SYNTHETIQUE

N° Tâche / Action	→ Résultat / Livrable
<b>1 - Inventaire des données</b>	
- Géologie : feuilles au 1:50 000, cartes harmonisées, régolithe (?), fond au 1:1M	
- Géophysique : données publiques (large couverture), données acquises dans un cadre particulier (e.g., AREVA (?)) – couverture spécifique	
- Travaux Inventaire (I) : Rapports : liste aussi exhaustive que possible, hiérarchisation (valeur locale ou synthèse), géoréférencement	
- Travaux Inventaire (II) : Couvertures : Géochimie stream – sol, alluvionnaire, Anomalies et prospects issus de l'Inventaire, Travaux de géophysique (couverture réduite)	
- Travaux Inventaire (III) : Couverture : Travaux d'exploration : tranchées, puits, sondages destructifs et carottés, travaux miniers de reconnaissance (couverture réalisée au fur et à mesure des besoins, en fonction des pré-sélections opérées dans la tâche N° 2)	
- Gisements et indices France (base BRGM exhaustive incluant les prospects issus de l'Inventaire)	
- Géochimie hors Inventaire : FOREGS, GEMAS	
- Aspects environnementaux et réglementaires : Zones protégées + (?) nouveau code minier	
→ Catalogue de métadonnées spatialement géoréférencées → Catalogue des zones problématiques (données perdues, éléments chimiques non utilisables, ...) et des données orphelines (rapports non indexés, ...)	
<b>2 - Réévaluation métallogénique des prospects issus de l'Inventaire dans le contexte économique actuel</b>	
- Réexamen des études antérieures, compléments bibliographiques, ... Prise en compte des	

sujets miniers hors-Inventaire dans un souci d'exhaustivité. Recherche, si nécessaire, de données externes auprès d'autres opérateurs (avec l'appui du MEDDE/Bureau des Ressources Minérales).

- Pré-sélection des cibles susceptibles de présenter un intérêt dans le contexte actuel (évaluation multicritère : situation géographiques et contraintes, intérêt de la substance principale, intérêt des substances connexes (connues ou potentielles), tonnage (déjà) démontré, teneurs obtenues, type de minerais et éventuellement résultats de premiers tests de traitement, extension / continuité de la minéralisation, ...)

- Pour chaque cible, alimentation du catalogue de métadonnées et synthèse des données sous ArcGIS : constitution d'une couche d'informations géoréférencées (emprise zone minéralisée, tranchées, sondages, ...) intégrable dans le SIG national "Méthodologie Reprise de l'Inventaire"

→ Hiérarchisation "géologique" des cibles potentiellement intéressantes dans le contexte actuel

### 3 – Application du filtre "Filières industrielles / emplois"

- Prise en compte des données relatives à l'aval industriel français et européen
- Évaluation du rôle des substances impliquées en termes d'emploi

→ Priorisation raisonnée des cibles potentiellement intéressantes

4 – Développement du SIG national "Méthodologie Reprise Inventaire" [métadonnées + données] au format ArcGIS.  
(SIG évolutif, alimenté progressivement à partir de l'exhumation de données de l'Inventaire peu utilisées et nécessitant une mise en forme)

- Couches "Métadonnées Inventaire" : Rapports, Géochimie (stream + alluvionnaire), Travaux Inventaire (Géophysique, PEX, tranchées, sondages, travaux miniers)
- Couches "Données Générales" : Fond géologique, Gisements et Indices, Géochimie (FOREGS, GEMAS), Hydrogéochimie, Géophysique "large couverture/régionale"
- Couches "Données Détaillées" : Géochimie Inventaire (résultats stream + alluvionnaire), Géophysique Inventaire ("couverture réduite"), Données sur les prospects issus de la réévaluation
- Couches "Environnement et zones protégées" : Parcs nationaux et régionaux, zones Natura 2000, ...
- Couches "Sociétales" : Informations sur les populations (localisation, importance, type d'habitat, activités, ...) et les infrastructures (réseau routier, ...)

→ SELECTION DES SUBSTANCE(S) ET DES ZONE(S) PAR LES EXPERTS  
→ VALIDATION DES CHOIX PAR LE COMMANDITAIRE

## 5 – ETUDE REGIONALE (TEST 2012 : TUNGSTENE (W) - SUD MASSIF CENTRAL)

- Compléments analytiques (ré analyse de certains échantillons pour contrôle et éventuelle recherche de nouveaux éléments). Le choix des échantillons s'appuiera dans la mesure du possible sur des tests statistiques.
- Constitution d'un SIG dédié à la zone d'étude, sous-ensemble du SIG national précédent
- Analyse par les experts des combinaisons de couches thématiques à effectuer = **Modèle de données** applicable à la zone choisie pour (1) la ou les substance(s) recherchée(s) et (2) la ou les typologie(s) de gisements attendue(s) (déjà connues ou possibles à découvrir)
- Traitements géostatistiques (*e.g.*, CAH, variogrammes, ...) sur les données géochimiques et/ou géophysiques, sur la distribution des indices et des anomalies
- Traitements de type "densité" ou "potentiel" sur la couche des gisements & indices (optionnel – faisabilité liée à la quantité de données disponibles sur la zone)
- Croisement des données retenues pour le modèle, issues directement du SIG et/ou prétraitées lors des deux étapes précédentes : la méthodologie appliquée variera en fonction de la substance, du type de gisement, du nombre et de la qualité des données, des résultats des prétraitements et des informations transposables à partir de la couche "Données sur les prospects issus de la réévaluation". Il s'agira donc d'une méthodologie dédiée, non paramétrable a priori.

→ Carte de « prédictivité » du potentiel minéral de la zone étudiée  
→ Hiérarchisation des cibles identifiées

## 6 – Application du "masque" environnemental et réglementaire et introduction de la dimension sociétale

- Défalcation des zones protégées
- Défalcation des surfaces présentant des contraintes particulières
- Introduction des informations relatives à la population et aux infrastructures

→ Carte de « prédictivité » opérationnelle du potentiel minéral de le zone étudiée

## 7 – Validation des résultats par le commanditaire

- Présentation du détail des méthodes mises en œuvre et des résultats - Discussion
- Demande éventuelle de modification des paramètres utilisés – Retour à la tâche N° 5

### → APPROBATION FINALE

- Remise d'une note de synthèse incluant la description des traitements mis en œuvre et les résultats obtenus, et accompagnée des données digitales utilisées sur CD-ROM au format ArcGIS
- Les données brutes et calculées viendront alimenter les bases de données du futur système d'information sur les matières premières minérales

Remarques :

1 - Certaines tâches (notamment les tâches 1, 2 et 3, et pro parte la tâche 4) peuvent être menées de front.

2 - Le développement du SIG national « Méthodologie Reprise Inventaire » ne sera pas totalement achevé à l'issue de l'étude méthodologique 2012, certaines couches demandant un important travail de recherche et de compilation (e.g., données géophysiques, zones et sites protégés...). En outre, les données détaillées relatives aux travaux d'exploration réalisés sur certains indices ne seront incorporées que progressivement (en fonction des hiérarchisations / priorisations effectuées dans les tâche 2 et 3).

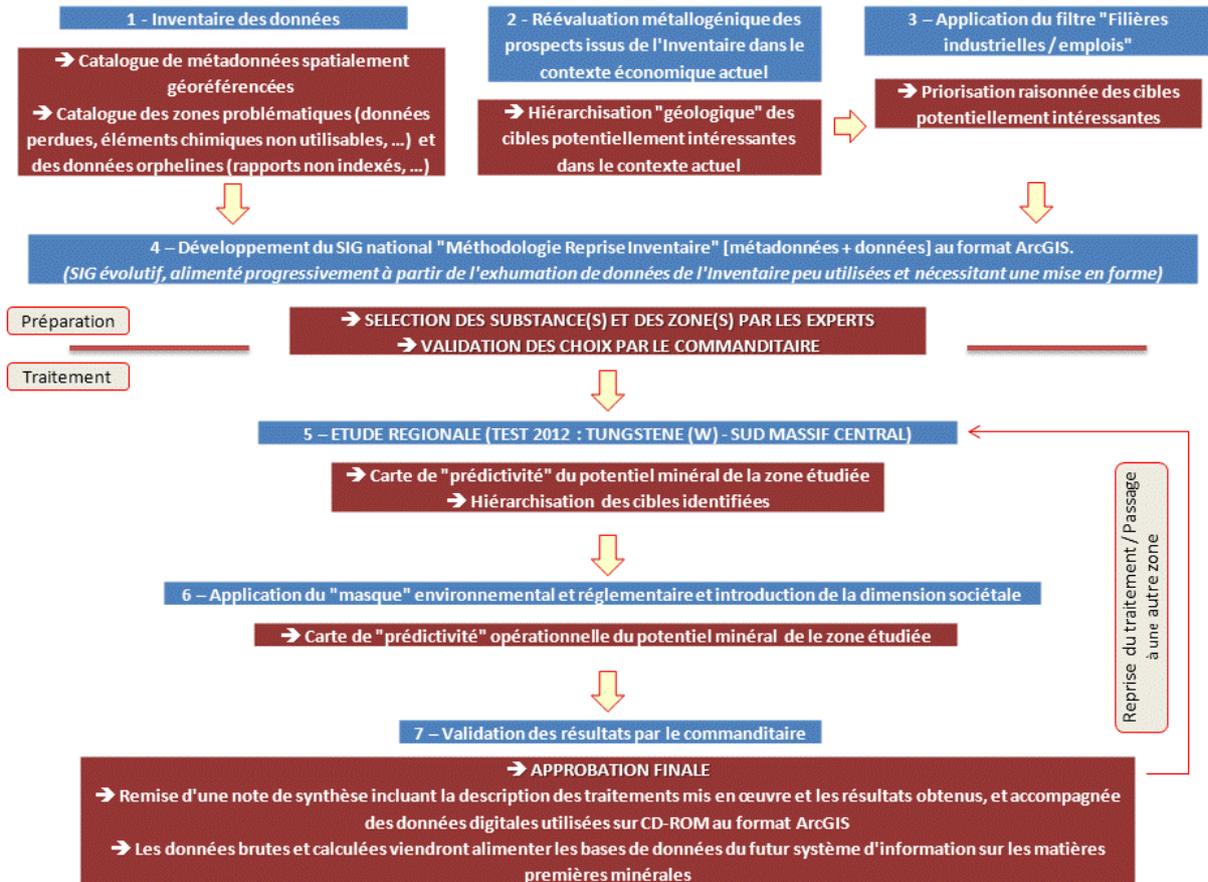


Figure 30 - Présentation synthétique du déroulé méthodologique montrant l'enchaînement des différentes tâches.



## 8. Application à une zone test : les gisements de tungstène du sud du Massif Central

### 8.1. CHOIX DE LA ZONE TEST

Dans le but de définir la zone et la substance sur lesquelles un test de réévaluation a été initié suivant la méthode définie précédemment, plusieurs critères ont été pris en compte :

- besoins industriels français et européens ;
- criticité de la substance ;
- existence d'acteurs nationaux et européens pour le traitement du minerai et sa transformation en produits dérivés ;
- existence d'un potentiel minier avéré (exploitation historique et existence de gisements/ indices non-exploités).

L'argumentaire suivant présente l'intérêt du tungstène (W) qui a été choisi pour cette étude. Il reprend les conclusions présentées par le « Panorama 2011 du marché du tungstène » (Audion et Labbé, 2012).

Avec des propriétés de dureté et de ténacité, le tungstène a une large gamme d'application dans le secteur industriel, en particulier sur certains domaines stratégiques (Défense) et de hautes technologies (alliages et superalliages utilisés dans des environnements de hautes températures notamment les turbines des moteurs d'avion).

Les substitutions sont généralement moins performantes et parfois plus onéreuses.

En 2010, la Chine était très largement le premier consommateur de tungstène (55 %) (*Figure 31*), mais l'Europe était positionnée au troisième rang avec 12,4 %.

Les risques sur l'approvisionnement en tungstène sont évalués comme « forts », principalement à cause de la position largement dominante de la Chine dans la production de tungstène primaire (*Figure 33*).

Les entreprises françaises de transformation du tungstène, notamment *Eurotungstène* (groupe *Eramet*) et l'ancien *Cime-Bocuze* (filiale de l'autrichien *Plansee*) dépendent de l'importation de produits intermédiaires chinois.

Les industries françaises consomment du tungstène sous forme d'alliages (motoristes pour l'aéronautique, de l'espace et de la défense), de carbures cémentés (machines-outils mais aussi toutes les industries utilisatrices d'outils de coupe et d'usinage, de travaux publics, etc.). L'importance économique du tungstène pour l'industrie française, qui montre de forts besoins, a ainsi été évaluée à « très forte » (*Figure 33*).

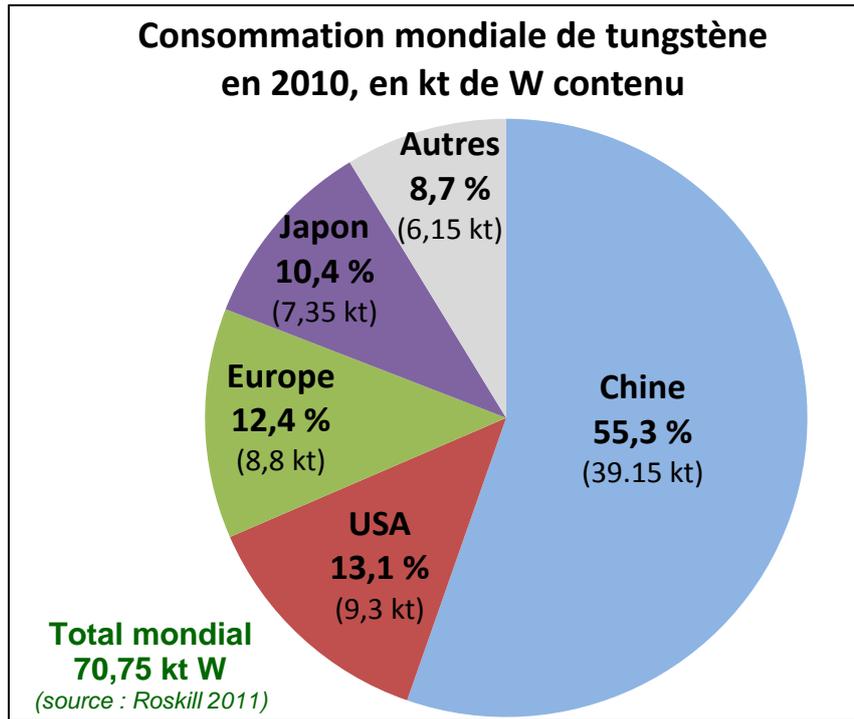


Figure 31 - Répartition géographique de la consommation de tungstène (primaire) en 2010 (extrait de Audion et Labbé, 2012).

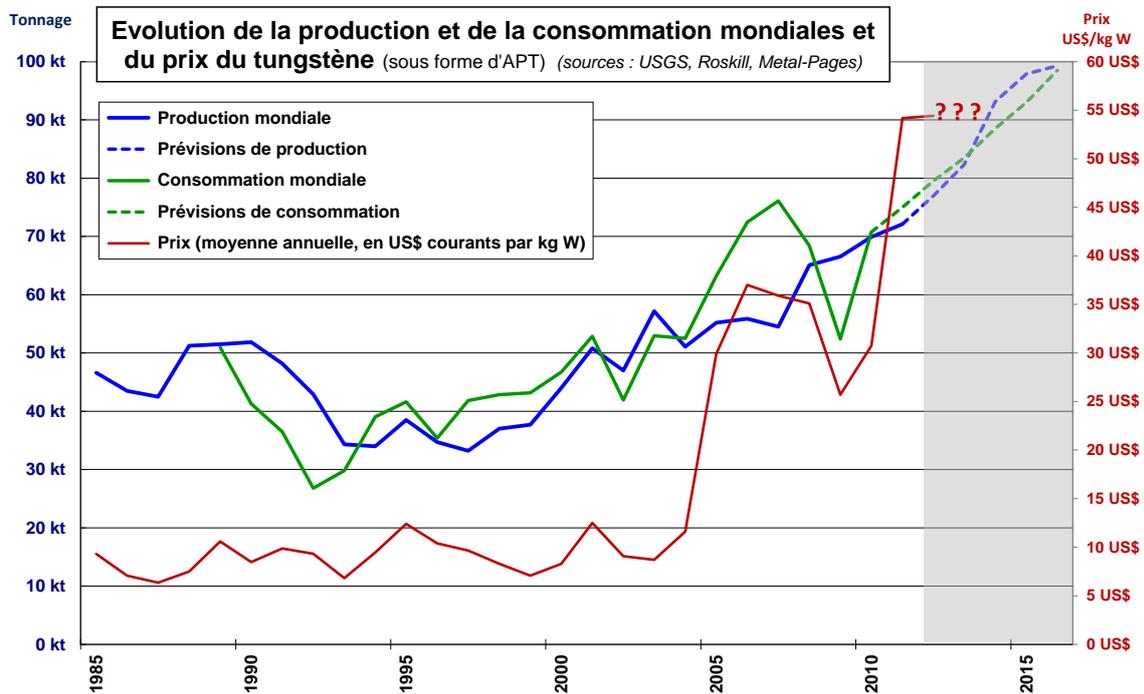


Figure 32 - Évolution récente de la production et de la consommation primaire et des prix du tungstène depuis 1985, et tendances d'évolution pour 2012-2016 (extrait de Audion et Labbé, 2012).

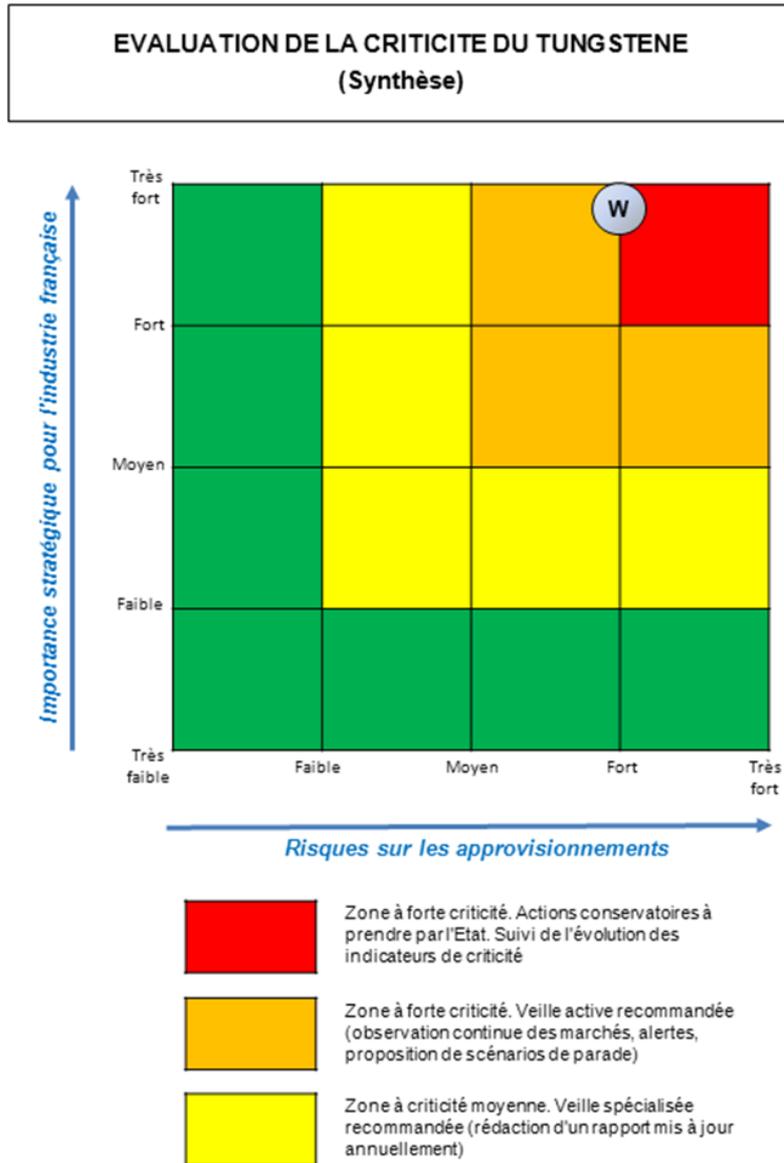


Figure 33 - Évaluation de la criticité du tungstène (Extrait de Audion et Labbé, 2012).

La France métropolitaine dispose de nombreux indices et de quelques gisements de tungstène dont treize ont été exploités à des degrés divers au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Ces exploitations ont fermé vers la fin des années 80 à la suite de la baisse des cours liés à la montée en puissance de la production chinoise. Depuis, les prix ont pratiquement été multipliés par 10 (Figure 32).

Les principaux gisements français sont des champs de veines à quartz-wolframite associés aux granites hercyniens dans le Massif Central (Montredon-Labessonié, Leucamp, Engualès, Puy-les-Vignes, Échassières) et le Massif Armoricaïn (Montbelleux), et des skarns à scheelite, dans les Pyrénées (Salau) ou l'Esterel (La Favière). Cinq d'entre eux ont produit plus de 1 000 t de tungstène (Salau, Puy-les-Vignes, Échassières, Leucamp et Engualès).

Trois gisements ont encore des ressources connues supérieures à 10 kt de trioxyde de tungstène (WO<sub>3</sub>) : Montredon-Labessonié et Fumade dans le Tarn (respectivement priorité 2 et 1 – cf. supra) et Coat-an-Noz dans les Côtes d'Armor. Les deux premiers gisements se localisent au nord de la Montagne Noire, où de nombreux autres indices ont été mis en évidence au cours de l'Inventaire (Michard, 1990). C'est donc cette zone à fort potentiel en

tungstène qui a été choisie pour effectuer un premier test de réévaluation des données existantes.

L'exploitation de ce type de gisement est à faible impact environnemental du fait d'un potentiel de drainage minier acide faible (lié à la nature des minéralisations).

Par ailleurs, l'existence d'industriels français présents dans le traitement des produits amont du tungstène (ammonium paratungstate (APT), oxydes de tungstène, ferrotungstène) laisse envisager la possibilité du redéveloppement d'une filière française.

L'exploitation de gisements européens, au Portugal (Mine de Panasqueira, 799 t de W métal produites en 2010), par la société japonaise *Sojitz*, en Espagne (Mine de Los Santos, 807 t de W métal produites en 2011), par la société canadienne *Almonty Industries*, et en Autriche (Mine de Mittersill, dans la province de Salzbourg, 972 t de W métal produites en 2010), par la société autrichienne *Wolfram Berghau und Hütte (WBH, filiale du suédois Sandvik AB)* montre que les conditions économiques actuelles du marché du tungstène semblent favorables pour le développement d'une industrie extractive européenne.

## 8.2. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE – DONNEES EXISTANTES

### 8.2.1. Contexte géologique : la Montagne Noire

La Montagne Noire, qui constitue la bordure la plus méridionale du Massif Central (*Figure 34*) correspond à un segment externe de la chaîne varisque européenne. Elle est principalement composée de terrains d'âges Néoprotérozoïque supérieur à Paléozoïque inférieur, plus ou moins métamorphisés et de roches granitiques.

À l'est et au nord-est, ces formations sont recouvertes par les bassins permien de Lodève et de Saint-Affrique, et au sud et à l'ouest par les formations tertiaires du Bassin aquitain et du bas-Languedoc. Au nord, les formations passent en continuité cartographique aux séries métamorphiques de l'Albigeois.

La Montagne Noire est divisée en trois domaines allongés selon l'axe ENE – WSW (*Figure 35*) :

- le versant nord, composé d'écaillés paléozoïques déversées vers le sud-est, les Monts de Lacaune, et recouvert au nord-ouest par les nappes métamorphiques de l'Albigeois : la nappe de Saint-Salvi de Carcavès, elle-même surmontée au nord par la nappe de Saint-Sernin-sur-Rance ;
- le versant sud, formé de terrains métasédimentaires datés du Cambrien au Viséen et déversés vers le sud en vaste plis couchés. D'est en ouest, les unités de Cabrières, de Faugères, de Montpeyroux, du Pardailhan et du Minervoies sont distinguées ;
- entre ces deux versants, la zone axiale est un vaste antiforme en forme de dôme dissymétrique d'allongement NE-SW, composé de roches de haut degré métamorphique (gneiss, migmatites, micaschistes) et de granites.

D'un point de vue lithostratigraphique, les versants nord et sud montrent un développement important de formations datées du Cambrien, qui débutent avec des alternances grésopélitiques, dites des Grès de Marcory (K1). Les termes supérieurs de cette série passent à des alternances typiques grésocarbonatées (K1-2). Le terme sommital du Cambrien inférieur s'achève par des formations carbonatées (K2). La partie supérieure de ces formations est caractérisée par des schistes noirs localement à nodules phosphatés. Comme nous le verrons

plus tard, ces formations du Cambrien inférieur ont constitué les « pièges » des minéralisations à tungstène, en relation avec la mise en place de granites tardi-varisques qui les recourent.

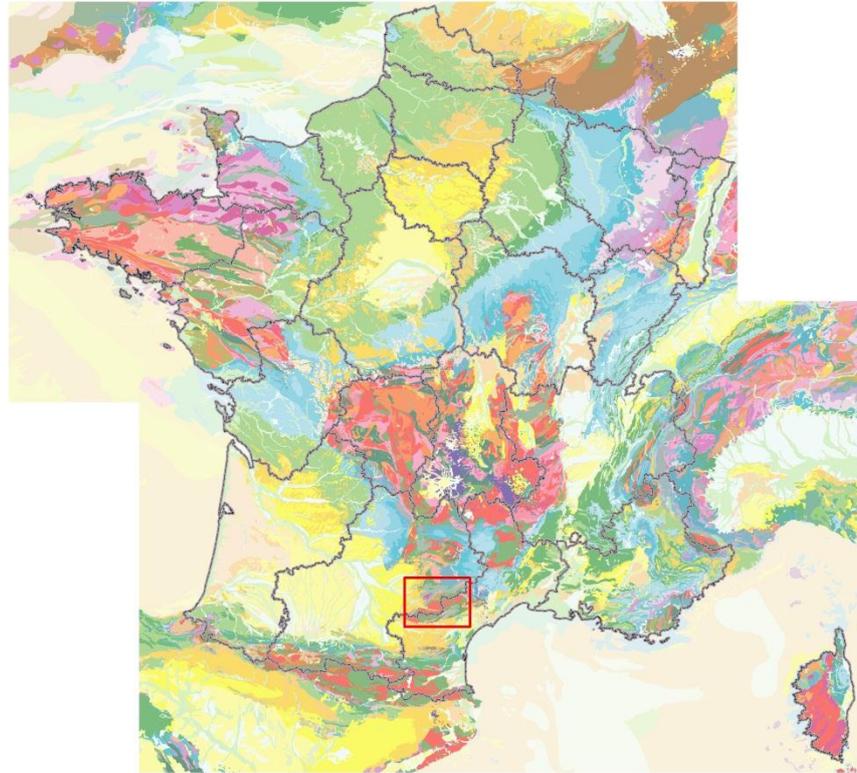


Figure 34 - Localisation et emprise de la zone de test choisie (le fond est constitué par la carte géologique de France au 1/1 000 000).

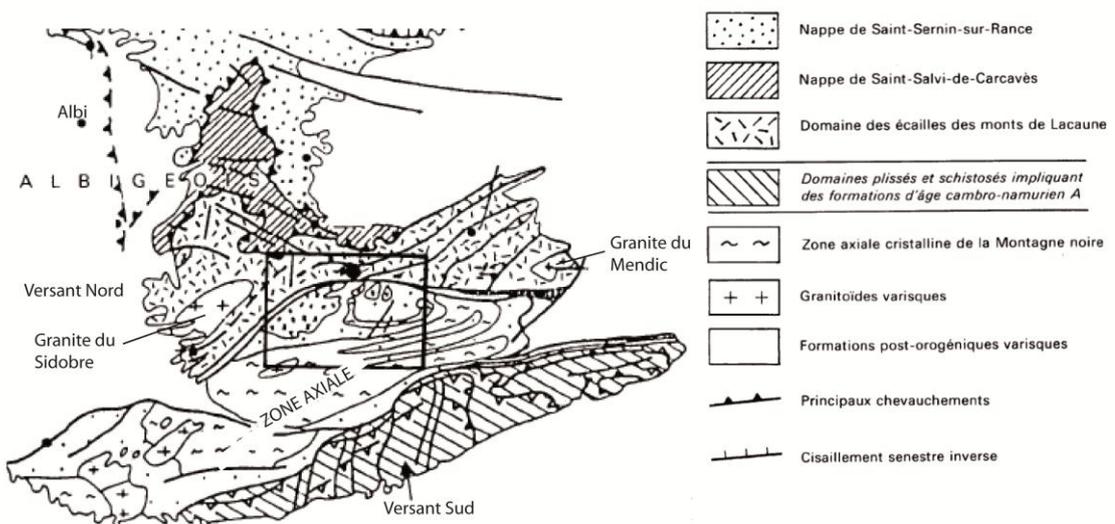


Figure 35 - Grands traits structuraux de la Montagne Noire (Demange et al., 1995).

La Zone Axiale est caractérisée par un ensemble structural globalement homogène, constitué de trois séries :

- la série orthogneissique de Nore à la base ;
- les séries de Cabardès, Saint-Pons et de la Salvétat (généralement dénommés sous le terme schistes X) ;
- la série du Roc Suzadou.

Les séries de Cabardès, Saint-Pons et de la Salvétat se décomposent en deux groupes :

- un groupe inférieur à gneiss plagioclasiques (calciques), métavolcanites acides, niveaux carbonatés, niveaux graphiteux ;
- un groupe supérieur, monotone et strictement grésopélitique.

### **8.2.2. Rappel historique succinct sur la production minière de la Montagne Noire**

D'un point de vue économique, la Montagne Noire est une province minière importante dans l'histoire de notre pays, avec un certain nombre de mines importantes (*Figure 36*) :

- en métaux de base (Zn, Pb, Cu) : la production cumulée serait d'environ 600 000 t de Zn, provenant pour plus de la moitié de la mine de Saint-Salvy, le reste étant partagé entre les gisements de La Rabasse, de Peyrebrune et de petites exploitations des carbonates cambriens (La Loubatière, la Caunette, Villeneuve-Minervoies, Brusque...). Il convient d'ajouter à cela les 30 200 t de Cu produites à Salsigne ;
- plus de 700 t d'argent (majoritairement des mines de Salsigne, Saint-Salvy, de La Rabasse et de Peyrebrune) ;
- Salsigne a de plus été pendant toute la fin du XX<sup>e</sup> siècle la mine d'or la plus importante d'Europe de l'Ouest, avec une production totale de 120 t d'or, 397 000 t d'arsenic et 1 708 t de bismuth ;
- pour les métaux rares, la mine de Saint-Salvy a produit 730 t de germanium ;
- le district de Montredon-Labessonnié a permis la production de 700 t de tungstène ;
- des exploitations de barytine de Villeneuve, Font d'Arques, Saint-Privat et Peyreblanque) ont produit plus d'1 Mt.

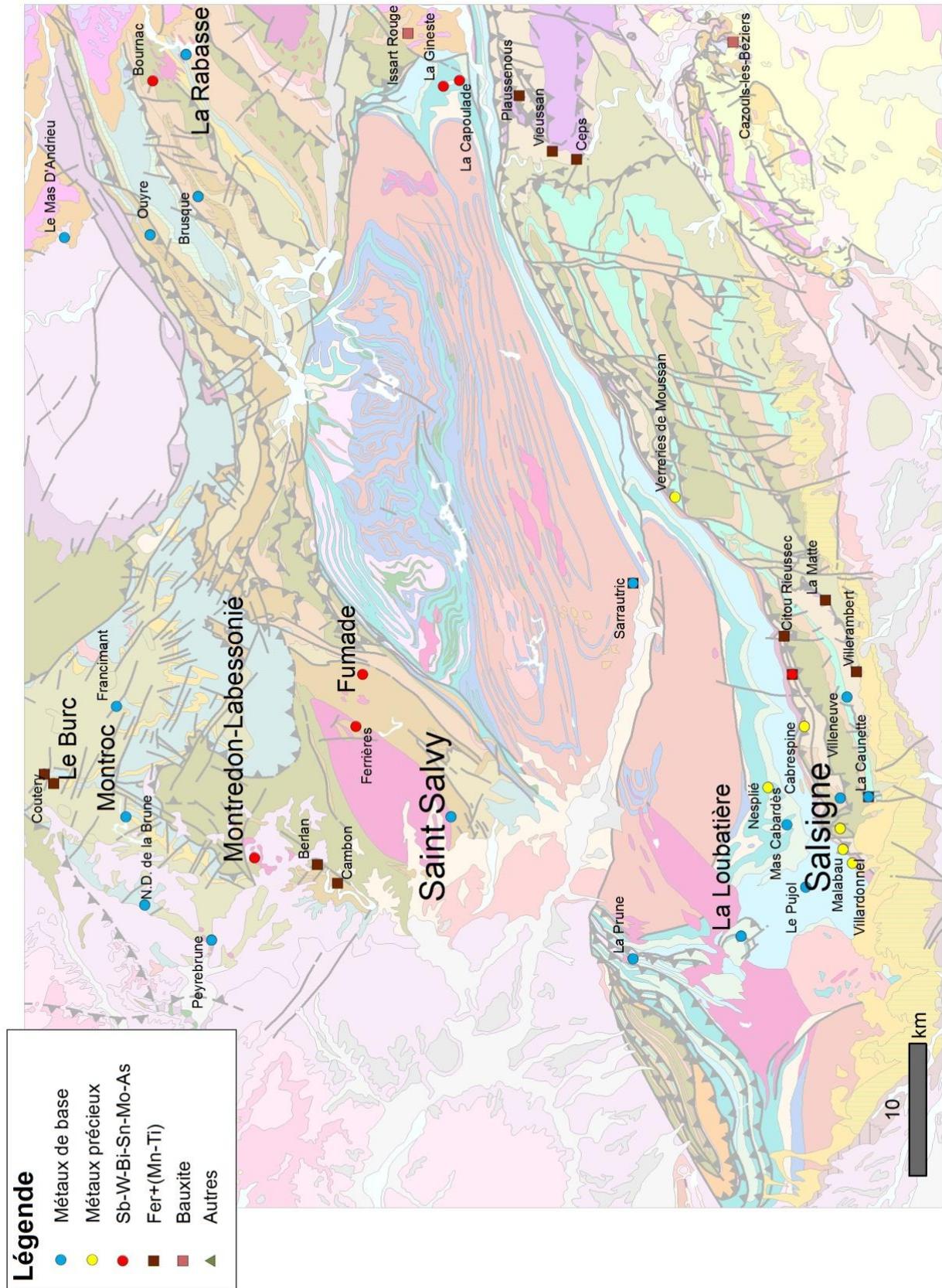


Figure 36 - Anciennes exploitations minières présentes sur la Montagne Noire (légende page suivante).

Légende (suite)	
1 - Quaternaire - Formations superficielles : vases et limons des étangs salés	75 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques - Ordovicien inférieur : métabasites et métadolérites
3 - Quaternaire - Formations superficielles : limons des étangs palustres asséchés	76 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : grès quartzites (Trémadoc inférieur)
4 - Quaternaire - Formations superficielles : colluvions	77 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : Cambrien moyen (p.p. supérieur), schistes à Paradoxites et formation de Barroubio indif.
8 - Quaternaire - Formations superficielles : éboulis	78 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : série verte grés-pélitique (Ordovicien p.p.)
9 - Quaternaire - Formations superficielles : alluvions modernes, alluvions indifférenciées	79 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : série verte calcaro-pélitique
10 - Quaternaire - Formations superficielles : alluvions de basses terrasses (Holocène et IVre récent)	80 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : dolomie
11 - Quaternaire - Formations superficielles : alluvions de basses terrasses (Holocène et IVre récent)	81 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : tufs kérarophyriques
12 - Quaternaire - Formations superficielles : alluvions du Quaternaire moyen	82 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : tufs rhyolitiques (Formation de Lerroux)
14 - Volcanisme tertiaire et quaternaire : lavas basaltiques de l'Escandorgue (Plio-Quaternaire) et de la région montpelliéraine (Oligocène)	83 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : Cambrien inférieur carbonaté (calcaires à Archaeocyathes)
16 - Tertiaire - Pliocène - Pliocène continental	84 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : série pélitique noire à nodules phosphatés
18 - Tertiaire - Pliocène - Pliocène marin	85 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : calcaires bleu noir
19 - Tertiaire - Miocène - molasse marine	86 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : calcaires et dolomies
21 - Tertiaire - Miocène - dépôts continentaux	87 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : lavas et pyroclastites kérarophyriques
22 - Tertiaire - Miocène - Oligocène moyen supérieur	88 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : basaltes (Agglomérats d'Ensege)
23 - Tertiaire - Miocène - conglomérats	89 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : Cambrien inférieur détritique ("grès de Marcorcy")
24 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Éocène terminal du Languedoc oriental	90 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : "Schistes tuffacés du Layrac"
25 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Bartonien	91 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : "Blavières"
27 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : "argiles à graviers"	92 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe du "Roc Suzadou"
28 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Éocène supérieur, "molasse de Carcassonne"	93 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe de St-Pons (SP) : ensemble supérieur schistogréseux
29 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Lutétien, calcaire lacustre (Montpellier, Agel, Castres)	94 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe de St-Pons (SP) : passées de tufs volcaniques
30 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Éocène inférieur (moyen p.p.) dont Cuisien	95 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe de St-Pons (SP) : schistes et quartzites clairs
31 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Cuisien "Formation d'Assignan"	96 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe de St-Pons (SP) : formation grésopélitique et carbonatée de Mas de Rieu
32 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Cuisien "Calcaire de Ventenac"	97 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe de La Salvetat (Sa) : formation grésopélitique et carbonatée de Nages
33 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Cuisien "Argiles de St-Papou"	98 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupes de St-Pons (SP) : formation volcanique à volcanosédimentaire de Rouvials
37 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : "Graviers d'Issel"	99 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe de La Salvetat (Sa) : formation des gneiss de l'Obiel
38 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : "Calcaires à alvéolines"	100 - Formations mésozoïques de la zone axiale - ensemble inférieur grésopélitique : formation de Rieumajou
39 - Tertiaire - Éocène - Paléocène : Paléocène	101 - Formations mésozoïques de la zone axiale : groupe de La Salvetat (Sa) : ensemble inférieur grésopélitique : formation de Puech Pio
41 - Formations mésozoïques - Jurassique - Crétacé supérieur : Campanien-Maastrichtien	102 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes syn-à tardi-tectonique - granites tardifs à biotite : à composition plutôt calcique
60 - Formations mésozoïques - Jurassique - dolomie	103 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes syn-à tardi-tectonique - granites tardifs à biotite : à composition plutôt potassique
61 - Formations mésozoïques - Jurassique : Lias supérieur marnes (Domérien - Toarcien)	104 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes syn-à tardi-tectonique - granites peralumineux tardifs à muscovite biotite
62 - Formations mésozoïques - Jurassique : Lias moyen calcaire (Shémurien - Crétacé)	105 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes syn-à tardi-tectonique - granite migmatitique du Laouzais
63 - Formations mésozoïques - Jurassique : Hettangien	106 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes syn-à tardi-tectonique : granites précoces foliés
64 - Formations mésozoïques - Trias : Trias indifférencié	107 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes syn-à tardi-tectonique : intrusions basiques à intermédiaires précoces
65 - Formations paléozoïques post-varisques : Permien (Saxono-Thuringien), grés-conglomératique	108 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes anti-orogénique (et roches associées) : Granite orientés à 2 micas du Mendic
66 - Formations paléozoïques post-varisques : Permien (Saxono-Thuringien), pélitique	109 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes anti-orogénique (et roches associées) : orthogneiss de Montredon-Labessonnié
67 - Formations paléozoïques post-varisques : Autunien, conglomérats	110 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes anti-orogénique (et roches associées) : orthogneiss des Cammazes et de Plaisance
68 - Formations paléozoïques post-varisques : Stéphaniens	111 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes anti-orogénique (et roches associées) : orthogneiss du Somail-Nore
69 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : Dinantien (et Namurien bsal)	112 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes anti-orogénique (et roches associées) : orthogneiss du Somail-Nore + migmatites
70 - Formations paléozoïques post-varisques : Autunien	113 - Roches plutoniques ou magmatiques - magmatismes anti-orogénique (et roches associées) : orthogneiss du Somail-Nore
71 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : Dévonien	114 - Roches plutoniques ou magmatiques - Roches filoniennes : dolérites
72 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : Silurien	115 - Roches plutoniques ou magmatiques - Roches filoniennes : rhyolites
74 - Formations paléozoïques anté- à syn-orogéniques varisques : Ordovicien inférieur	999 - hydro

### 8.2.3. Métallogénie du tungstène dans la zone test de la Montagne Noire

Dans l'emprise de la zone d'étude trois morphologies de minéralisations en tungstène sont reconnues :

- les minéralisations filoniennes sous la forme de veines de quartz à wolframite, avec par exemple les champs filoniens entourant Montredon-Labessonnié, exploités de 1958 à 1962 ;
- les skarns à scheelite spatialement associés à des intrusions de granite et pegmatites, auxquels appartiennent les minéralisations des indices de Fumade, la Fédiale, Ferrières et les Cadets ;
- les minéralisations stratoïdes à scheelite disséminée (modèle stratiforme), avec les indices de l'Auriole, l'Hom-Haut sur le versant nord et la Gineste et la Capoulade sur le versant sud.

Les détails correspondant à ces différentes morphologies sont présentées dans l'Annexe 2. Les connaissances sur la métallogénie des gisements de tungstène ont significativement évolué depuis que les travaux de prospection ont été réalisés dans la Montagne Noire. Notamment, la réintégration du modèle scheelite stratiforme au sein du modèle skarn, suggère fortement de réévaluer certaines zones, des minéralisations de type skarn tout à fait significatives pouvant être présentes en profondeur.

### 8.3. LE SIG REGIONAL

Le SIG régional utilisé est une extraction géographique du SIG national présenté dans le chapitre 6 du présent rapport. Comme le SIG national, il est structuré sous forme d'une géodatabase. Les jeux de classes d'entités qui le composent sont listés dans la Figure 37 ci-dessous. Leurs noms ont été choisis suffisamment explicites pour renseigner leur contenu.

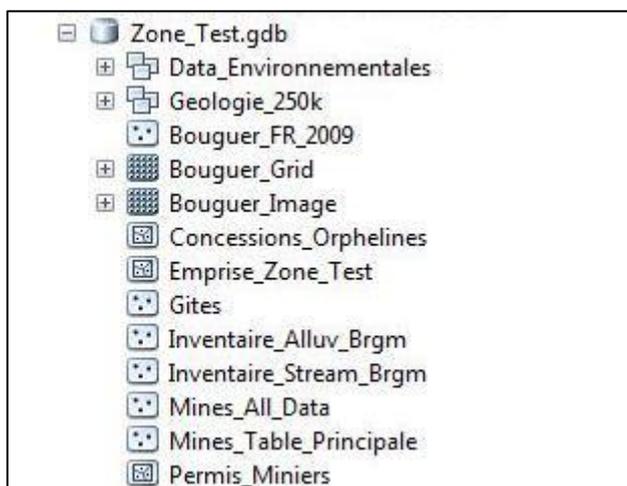


Figure 37 - Les classes d'entités de la géodatabase Zone\_Test.gdb, extraite de la géodatabase nationale Sig\_Mines\_France.gdb

La numérisation et l'insertion de données locales existantes sous forme papier (géophysique « tactique » réalisée sur les indices connus, sondages réalisés par les compagnies privées - dont les archives restent à localiser - et les données locales associées à la protection du patrimoine historique et naturel) n'ont pas pu être réalisées dans le cadre de cette étude.

La couverture des cartes géologiques au 1/50 000 n'est pas complète à l'heure actuelle : la feuille de Castres (986) est en cours de finalisation. Il en est de même pour les cartes harmonisées, la feuille du Tarn étant elle-aussi en cours de finalisation. Il est important de noter

que la plupart des cartes géologiques au 1/50 000 ont été levées après 1990, seulement deux cartes (Mazamet, 1012, et Bédarieux, 988) sont antérieures à l'Inventaire. Du fait de la couverture incomplète au 1/50 000, c'est la carte géologique au 1/250 000 qui a été utilisée.

La zone de test a été couverte au cours de l'Inventaire par une prospection géochimique stratégique à une densité moyenne d'échantillonnage de 3,5 au km<sup>2</sup>. Le cœur de la Zone Axiale, vu sa géologie peu favorable (principalement des terrains migmatitiques et granitiques), n'a pas été couvert lors de la phase de prospection stratégique.

Une campagne de prospection alluvionnaire a aussi été réalisée sur la zone.

Quelques campagnes de géophysique ont été menées dans un second temps :

- gravimétrie sur le dôme de Montredon pour la recherche de coupole granitique ;
- électromagnétisme héliporté sur la partie des Monts de Lacaune où le Cambrien présente des séries volcano-sédimentaires (recherche d'amas sulfurés) ;
- électromagnétisme et magnétisme héliporté sur le flanc sud de la Zone Axiale (recherche d'amas sulfurés).

**Ces données géophysiques, acquises antérieurement à 1996<sup>6</sup>, n'ont malheureusement pas pu être numérisées dans le cadre de cette étude et insérées dans le SIG régional. Elles n'ont, par conséquent, pas pu bénéficier aux traitements de prédictivité présentés ci-dessous.**

## 8.4. LES TRAITEMENTS DE PREDICTIVITE

Au cours de ce travail, deux approches probabilistes de prédictivité ont été utilisées. La méthode du « Weight of Evidence » (WofE, Bonham-Carter, 1994) est un outil communément mis en œuvre dans les études dédiées à l'exploration du potentiel minéral d'une région. La seconde méthode, dite « CBA » (Cell-Based Association, Tourlière *et al.*, 2012), actuellement en cours de développement au BRGM, a également été mise en œuvre.

Les principes généraux des deux approches sont exposés dans les paragraphes suivants.

### 8.4.1. La méthode "Weight of Evidence" (WofE)

Il s'agit d'une méthode quantitative pour regrouper les données probantes à l'appui d'une hypothèse. La méthode a été initialement développée pour une application non spatiale dans le diagnostic médical, dont la preuve se composait d'un ensemble de symptômes et l'hypothèse était du type « ce patient a la maladie x ». Pour chaque symptôme, une paire de coefficients de pondération est calculée, l'une pour la présence du symptôme, l'autre pour l'absence du symptôme. L'ampleur des poids dépend de l'association mesurée entre le symptôme et le modèle de la maladie chez un grand groupe de patients. Les poids peuvent alors être utilisés pour estimer la probabilité qu'un nouveau patient développe la maladie en se basant sur la présence ou l'absence de symptômes.

Dans les années 1980, cette approche a été adaptée pour la cartographie du potentiel minéral à l'aide de SIG. Dans cette situation, la preuve est constituée d'un ensemble de jeux de données d'exploration (sous forme cartographique), et l'hypothèse est « ce lieu est favorable

---

<sup>6</sup> Date à partir de laquelle les données de géophysique aéroportée sont disponibles sous forme numérique au BRGM.

pour l'apparition du dépôt de type x ». Les pondérations sont estimées à partir de l'association mesurée entre les occurrences minérales connues et des informations cartographiques (informations lithologiques, géochimiques, géophysiques...) pour être ensuite utilisées comme prédicteurs. L'hypothèse est alors évaluée à plusieurs reprises pour tous les emplacements possibles sur la carte en utilisant les poids calculés, et permet ainsi de produire une carte du potentiel minéral dans lequel les preuves de plusieurs couches cartographiques sont combinées. Cette approche est dite « experte », car il s'agit d'avoir une connaissance des marqueurs de minéralisations pour prédire les localités favorables.

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

- des données géologiques hamonisées. La seule couche d'informations géologiques de ce type disponible est **la carte géologique au 1/250 000 de Montpellier**. L'utilisation d'une couverture au 1/50 000, bien que plus précise, aurait nécessité un travail très chronophage d'harmonisation au préalable. Il n'est de plus pas certain que l'utilisation de la carte au 1/50 000 ait modifié sensiblement les résultats. En effet, l'étude aurait été beaucoup plus sensible aux erreurs de localisation, et l'information aurait peut-être été « diluée » par des formations lithologiques locales de plus faible extension. D'une manière générale, plus que la précision du fond géologique, le point crucial de ce type d'étude reste le nombre de gisements et indices disponibles pour l'apprentissage ;
- les indices de W connus (mines et indices), auxquels une pondération de 1 a été appliquée ;
- les anomalies géochimiques à W-B-Ba (après traitement de l'ensemble des données géochimiques de la zone en Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)), qui ont été pondérée par un coefficient de 0,5 ;
- les anomalies alluvionnaires à scheelite et wolframite, auxquelles une pondération de 0,25 a été appliquée.

Le traitement a ainsi consisté à scorer ces informations ponctuelles, en tenant compte de leurs pondérations, pour chaque formation lithologique cartographiée, ainsi que pour les contacts lithologiques et au regard de la surface occupée par chacune de ces formations.

Le résultat obtenu correspond à une classification des différentes formations et contacts suivant les scores obtenus (*Figure 38*).

#### **8.4.2. La méthode "Cell-Based Association" (CBA)**

La méthode CBA est une approche non dirigée. Elle s'intéresse aux associations de formations lithologiques présentes dans chaque cellule de forme carrée d'une grille définie arbitrairement. Elle permet ainsi de mettre en évidence des types d'associations de formations lithologiques favorables à la présence d'une minéralisation. L'apprentissage se fait sur les cellules contenant au moins une occurrence de la minéralisation recherchée (les minéralisations existantes forment un set d'apprentissage). Dans ces cellules, tous les facteurs géologiques sont recensés, constituant une signature ou association. Ensuite, les associations les plus pertinentes sont recherchées à partir d'un tableau de contingence. Les cellules présentant des associations similaires sont alors scorées.

Pour cette étude, une grille de maille carrée de cinq kilomètres de côté a été retenue. Le résultat est une carte sur laquelle sont représentées toutes les cellules où un type d'association favorable est présent<sup>7</sup>.

## 8.5. LES RESULTATS OBTENUS ET RECOMMANDATIONS

Les techniques de prédictivité permettent de cibler des secteurs favorables à l'échelle régionale. Au sein des secteurs ciblés, l'application des modèles métallogéniques (cf. *Annexe 2*) permet d'affiner la sélection des cibles et de proposer les poursuites de travaux à envisager.

### 8.5.1. Résultats obtenus par la méthode du Weight of Evidence (approche expert)

Cette méthode met en évidence plusieurs zones de favorabilité classées par ordre décroissant d'intérêt (*Figure 38*) :

- une zone de dimension comparable à celle d'un prospect :
  - l'**orthogneiss de Montredon-Labessonnié**, très largement distingué (en marron sur la *Figure 39*), correspondant à une surface de 2 km<sup>2</sup> ;
- des formations régionales d'extension variable :
  - les formations grésopélitiques et carbonatés du Groupe de Saint-Pons (Cambrien), sur la bordure méridionale de la Zone Axiale (en rouge sur la *Figure 38*), représentant une surface de 134 km<sup>2</sup> ;
  - les formations volcaniques et volcano-sédimentaires du Groupe de Saint-Pons, les pélites noires à nodules phosphatés (Cambrien), dans un degré légèrement moindre les schistes et quartzites du groupe de Saint-Pons, et les granites intrudant ces séries. Toutes ces formations sont présentes au sud et au nord de la zone axiale, mais sont plus développées dans la zone des **monts de Lacaune**, au nord. Elles sont représentées en orange sur la *Figure 38* et correspondent à une surface de 385 km<sup>2</sup> ;
  - les granites tardifs de la Zone Axiale et des Brousses (en jaune sur la *Figure 38*), dont la surface cumulée est de 45 km<sup>2</sup>.

Au sein de ces unités, les zones représentant le plus fort intérêt d'un point de vue de l'expert, notamment en prenant en compte la signature géochimique particulière à W-Sn-Be, ont été encadrées (*Figure 38* et *Figure 39*).

Des gisements ou indices significatifs sont déjà présents dans ces zones encadrées, tels que Montredon-Labessonnié, L'Auriole, Fumade, La Férialie, La Gineste et La Brousse, sauf dans la zone favorable située au Nord-Est (non loin du gisement de Pb/Zn de La Rabasse, figuré par un carré vert dans le coin supérieur droit de la *Figure 38*). À proximité de cette dernière, des occurrences de scheelite et wolframite ont cependant été mises en évidence en géochimie alluvionnaire.

---

<sup>7</sup> En l'état actuel, le programme n'autorise qu'un scoring binaire : en d'autres termes, il n'y a pas de hiérarchisation des associations réputées favorables.

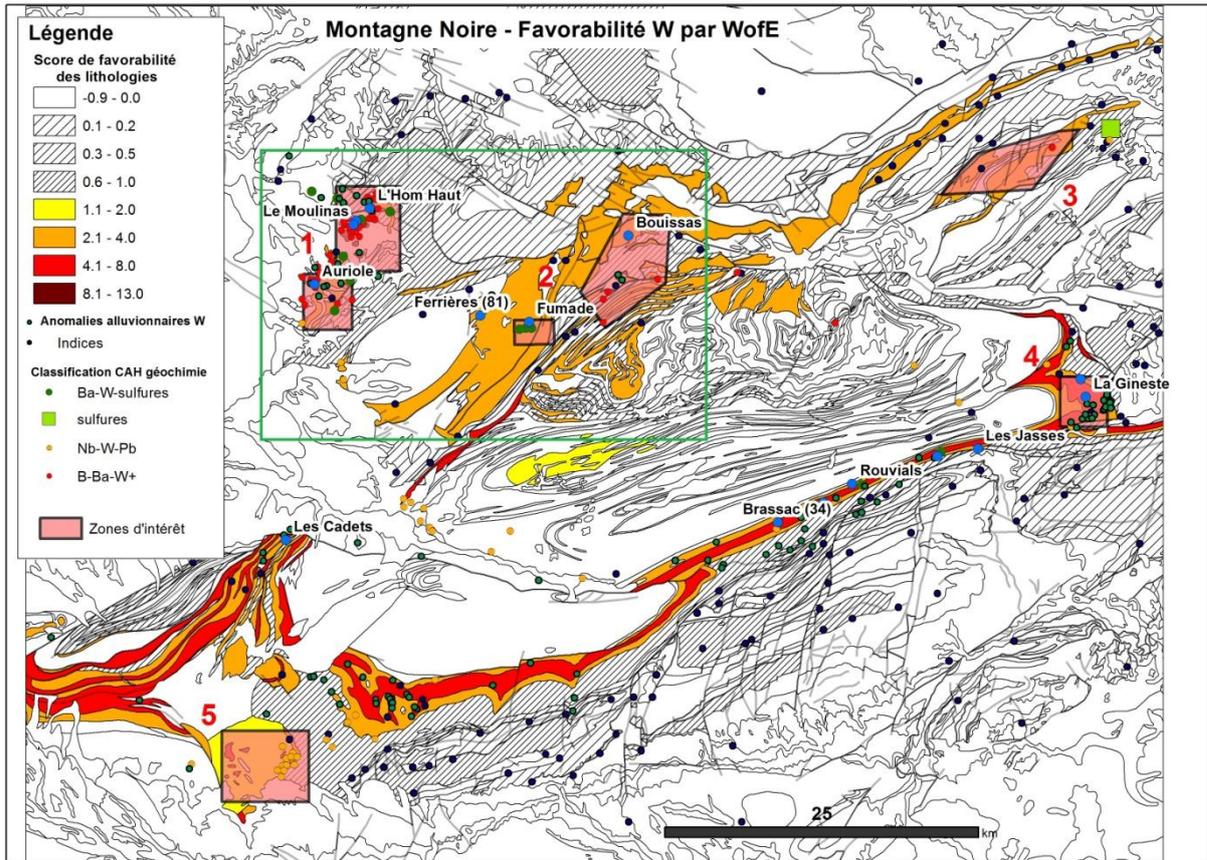


Figure 38 - Carte des zones favorables mises en évidence par la méthode du Weight of Evidence. (Le rectangle vert indique l'emprise de la Figure 39).

Les secteurs encadrés en rose sont ceux qui, d'un point de vue métallogénique présentent le plus fort intérêt.

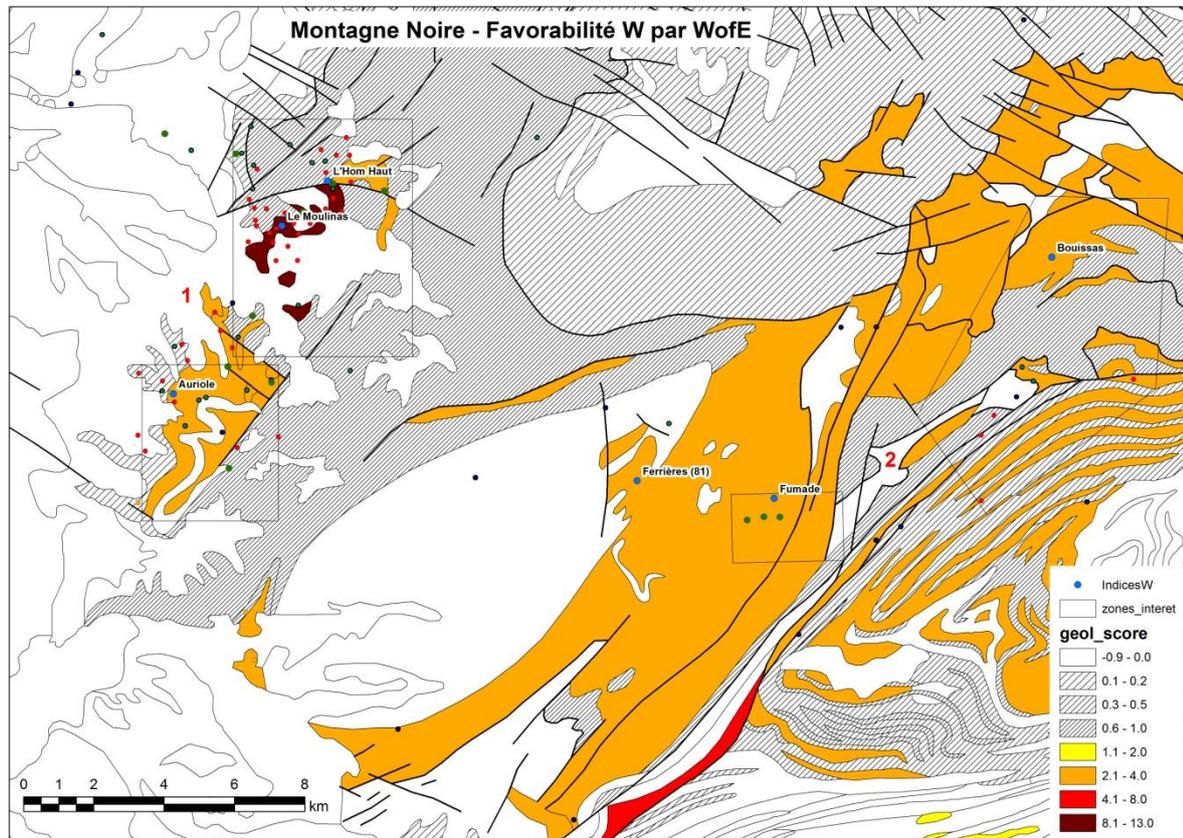


Figure 39 - Zoom de la Figure 38 sur le secteur du Moulinas et alentours (zone de Montredon-Labessonié) qui présente la plus forte favorabilité en tungstène par la méthode du Weight of Evidence.

### 8.5.2. Résultats obtenus par la méthode CBA

La méthode CBA a permis de cartographier des associations de formations lithologiques favorables (Figure 40). Plusieurs types d'associations ont été distingués, les abréviations données entre parenthèse correspondant au code « formation lithologique » de la carte au 1/250 000 de Montpellier (conformément à ce qui a été dit précédemment, il n'y a pas de hiérarchisation de ces associations) :

- Type GCH1 (aB3\_4-Spf-Spg\_j), qui correspond à l'association des granites potassiques à biotite tardi-varisque aux formations supérieures du Groupe de Saint-Pons (schistes et quartzites, schisto-gréseux) ;
- Type 1 (Spb-Spc-Spd\_e-Spg\_j-oe3), représentant l'association des formations de la Zone Axiale de la Montagne Noire, c'est-à-dire du groupe de Saint-Pons et de l'orthogneiss du Somail ;
- Type 1b (Sa1-SPb-SpC-Spd\_e), est aussi un type d'association de la Zone Axiale, avec les formations grésopélitiques du groupe de la Salvetat et les formations grésopélitiques, carbonatées, volcaniques et volcano-sédimentaires du Groupe de Saint-Pons ;
- Type 2 (k1-k2b-k2a). Ce type regroupe les formations du Cambrien inférieur des Monts de Lacaune : Grès de Marcory, série pélitique noire à nodules phosphatés, calcaire et dolomie ;
- Type 3 (d-o1\_2-oe3), présent sur la bordure méridionale de la Zone Axiale, est un type d'association impliquant le Dévonien, l'Ordovicien inférieur et l'Orthogneiss du Somail ;

- Type 4 (a3\_4-o1\_2-oe3), très localisé, il est caractérisé par l'association des formations de l'Ordovicien inférieur, des orthogneiss de type Somail et des granites à biotite tardi-varisques ;
- Type 5 (d-k2-k3\_6), représenté sur la bordure sud de la Zone Axiale, il correspond aux formations carbonatées du Dévonien et du Cambrien inférieur (calcaires à Archéocyathes) ;
- Type 6 (k2b-a3\_4), localisé dans les Monts de Lacaune, au voisinage du type 2, il correspond à l'association des séries noires pélitiques à nodules phosphatés et des granites à biotites tardi-orogéniques varisques.

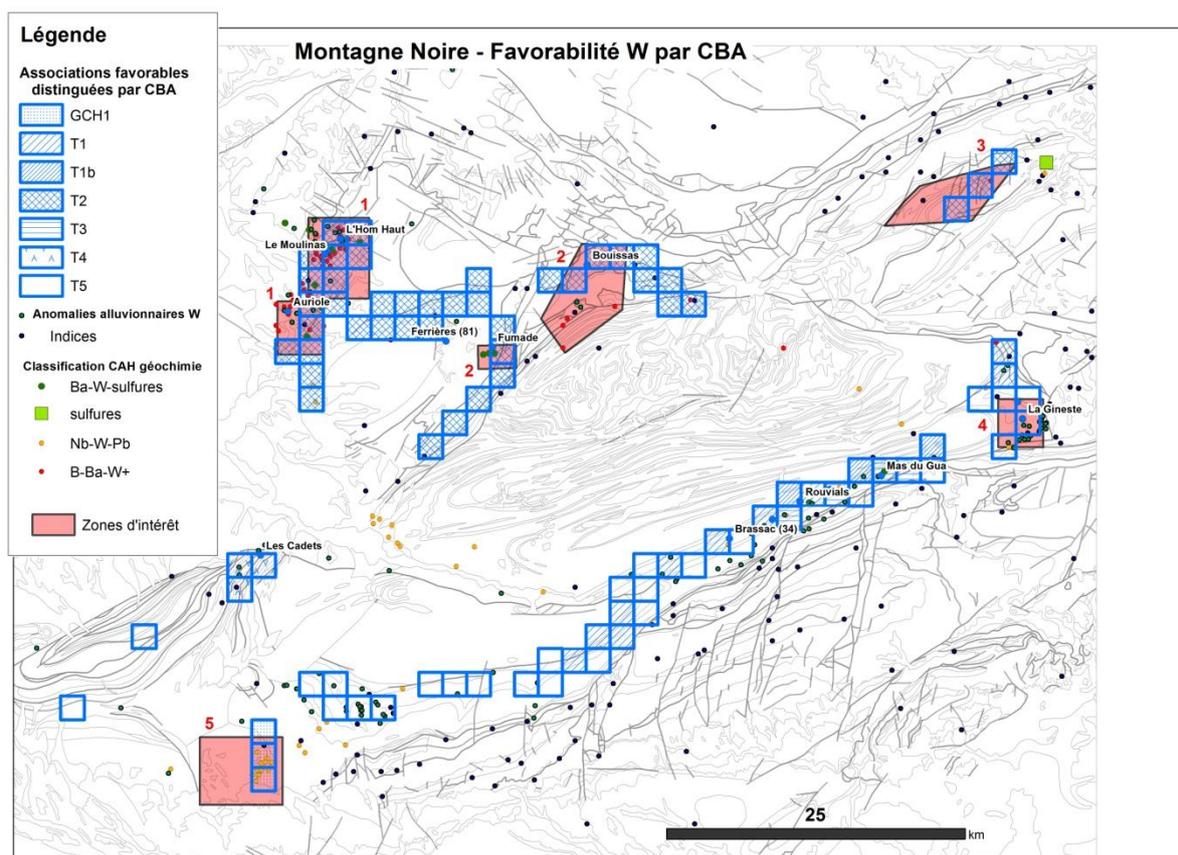


Figure 40 - Carte des zones favorables (carrés bleus) obtenues par la méthode CBA, et comparaison avec les zones d'intérêt identifiées par la méthode WofE (polygones roses).

De par l'importance des gisements connus dans les types 2 et 6, il apparaît clairement que les zones où ces associations sont mises en évidence constituent des cibles prioritaires pour toute poursuite de travaux. La présence des monts de Lacaune dans les deux types d'associations souligne leur fort potentiel en termes d'exploration.

Il est à noter que le secteur de Montredon-Labessonié et la « zone Nord-Est » (proche du gisement de la Rabasse) sont également retrouvés par la méthode CBA.

### 8.5.3. Synthèse des deux approches et recommandations

Il apparaît que les deux méthodes utilisées (WofE et CBA) convergent pour identifier les mêmes zones d'intérêt :

- **les monts de Lacaune** (secteur 2 dit de Bouissas/Fumade - Figure 40) où des recherches avancées ont permis de montrer le fort potentiel de certains gisements ;

- **le dôme de Montredon-Labessonnié** (secteur 1 - *Figure 40*), avec les gisements d'Auriole, de l'Hom Haut et du Moulinas notamment ;
- **la « zone Nord-Est »**, proche du gisement à Pb/Zn de la Rabasse (secteur 3 - *Figure 40*), qui représente la terminaison orientale des monts de Lacaune, et où la géochimie alluvionnaire a permis d'identifier des occurrences de scheelite et wolframite ainsi qu'une forte anomalie en béryllium ;

Dans une moindre mesure, on retiendra également, au sud de la Montagne Noire :

- **le secteur de la Gineste/La Capoulade** (secteur 4 - *Figure 40*) ;
- **le secteur des Cadets** (*Figure 40*), en continuité structurale de la Fumade vers le sud-ouest ;
- **le secteur 5** (*Figure 40*) qui présente une concordance des résultats des méthodes WofE et CBA, et où une anomalie géochimique importante en béryllium est présente.

D'un point vue métallogénique (voir *Annexe 2*), la comparaison de ces résultats avec les gisements et indices connus montre que les niveaux du Cambrien sont un piège extrêmement efficace lorsqu'ils sont recoupés par des granites «minéralisateurs ».

D'une manière générale, il apparaît que les méthodes de prospection classiques (géochimie et alluvionnaire) ont montré leurs limites pour ce type de minéralisation, ne permettant pas la détection de gisement non affleurant et éloigné de la surface. Toutefois, le gisement de Fumade a été « accroché » par la présence de trois anomalies géochimiques très localisées. Ainsi, la ré-analyse de certains échantillons avec des seuils de détection moins élevés pourrait permettre de mettre en évidence de nouvelles minéralisations. Cette approche, qui nécessitera au préalable une étude statistique pour affiner la maille de « ré-échantillonnage », devrait être menée sur les zones à fort potentiel définies précédemment.

La réalisation d'un modèle 3D du Cambrien, basé sur les données géologiques existantes, des données gravimétriques de résolution appropriée et les données de sondage des compagnies minières, permettrait un ciblage plus précis des zones favorables en profondeur par la représentation/modélisation des contacts entre le Cambrien et les injections granitiques fissurales. La *Figure 41* montre la localisation préférentielle d'un grand nombre d'indices sur des structures tectoniques majeures NE-SW, souvent associées à un fort gradient gravimétrique. Elle montre également que la résolution des données géophysiques disponibles est insuffisante pour mener à bien des traitements d'inversion à l'échelle locale et que de nouvelles acquisitions de données seraient vraisemblablement nécessaires.

Bien que les processus à l'origine des enrichissements soient loin d'être parfaitement connus, certains gisements à Sn/W sont aussi le lieu de concentration économiques de métaux rares tels que l'indium et le scandium. Il conviendrait de tester les concentrations de ces deux éléments dans les différents indices et gisements de la zone d'étude, des concentrations économiques pouvant significativement en augmenter l'intérêt.

Remarque : compte tenu des délais imposés, la méthodologie proposée n'a pas pu être menée à son terme sur la zone d'étude. Il aurait convenu en effet de représenter les contraintes environnementales et sociétales pour achever la hiérarchisation des zones d'intérêt.

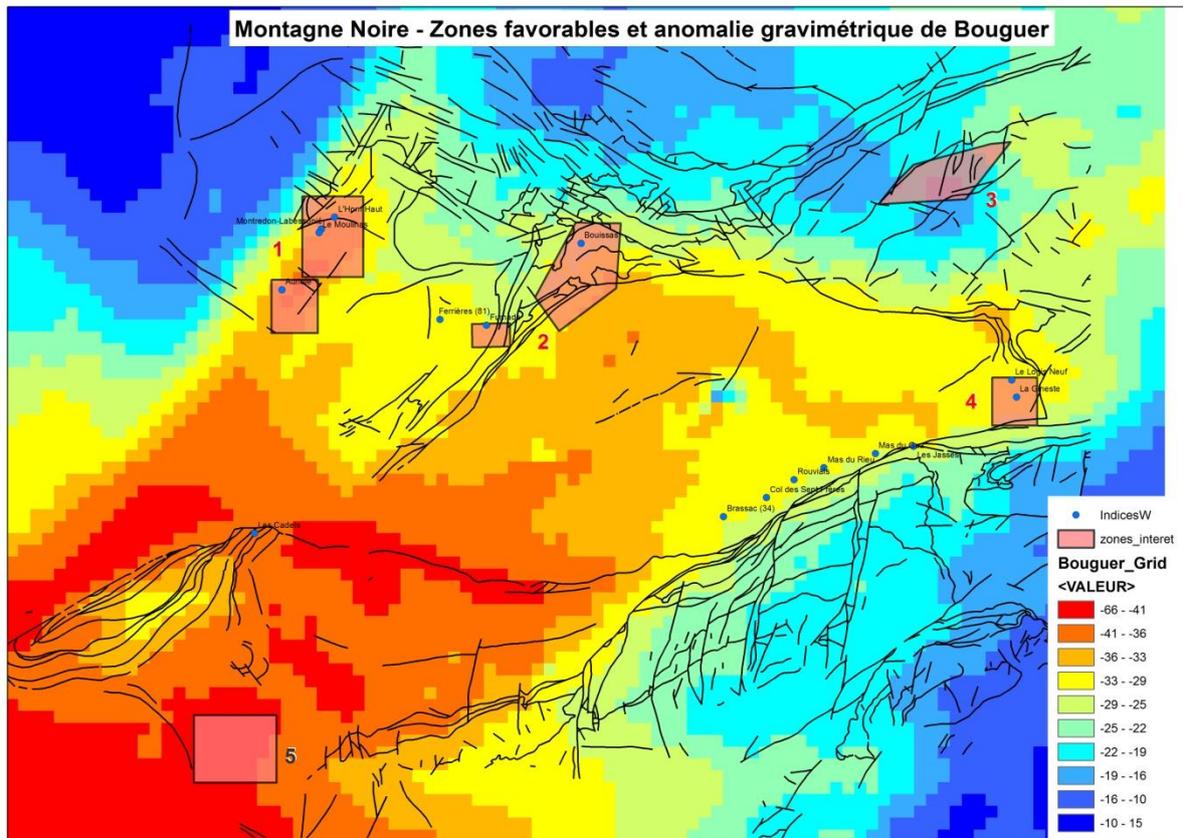


Figure 41 - Localisation des zones d'intérêt sur une carte d'anomalie de Bouguer (données gravimétriques, valeurs en mGal) montrant leur lien avec une structuration tectonique NE-SW et de forts gradients gravimétriques.



## 9. Conclusion

### 9.1. LA METHODOLOGIE : LES POINTS CLES

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la fiche « Revalorisation et réévaluation du potentiel français en ressources minérales » de la Convention MEDDE / BRGM relative aux ressources minérales. Elle s'est attachée à mettre au point un déroulé méthodologique pour la réévaluation du potentiel minéral français incluant notamment la « reprise » des données de l'Inventaire. En pratique, ceci recouvre deux actions : (i) établir la liste des tâches à accomplir en veillant à la logique du déroulement et à l'introduction de points de validation des choix ou des résultats et (ii) s'assurer en parallèle de la faisabilité de la méthodologie proposée. Pour cela, la réalisation des tâches suggérées a été entreprise avec comme objectifs d'affiner certaines parties du déroulé (effet de « feedback ») et de rassembler le matériel nécessaire à la réalisation d'un test d'application / validation grandeur nature qui devait être effectué sur une zone sélectionnée. Le choix s'est porté sur les minéralisations à tungstène du sud du Massif Central.

Les données acquises au cours de la seconde action sont venues alimenter un SIG d'échelle nationale. Ce SIG évoluera au fur et à mesure des études, certaines couches thématiques d'information demandant un important travail de recherche et de compilation (e.g., données géophysiques, zones et sites protégés...), d'autres, telle que la couche « Données détaillées relatives aux travaux d'exploration réalisés sur certains indices », n'étant alimentées que progressivement, en fonction des choix effectués dans les tâches 2 et 3. Le SIG peut être vu comme le cœur du système : c'est la plateforme à partir de laquelle les traitements pourront être lancés (calcul de potentiel minéral, cartes de prédictivité) et qui permettra en combinant les données issues de l'Inventaire et des données acquises plus récemment d'identifier, de caractériser puis de prioriser les zones ou cibles méritant de retenir l'attention.

Dans le cadre de la revue des principaux sujets miniers de France métropolitaine, avec prise en compte du contexte économique actuel et du stade de développement, une liste de 11 cibles de priorité 1 a été proposée : **Antully** (F, Ba), **Arrens** (Ba, Zn, Pb), **Chessy-les-Mines** (Zn, Cu, Ba), **Courcelles-Fré moy** (F, Ba), **Echassières** (Sn, W, Li, Ta, Nb), **Egreuil** (F, Ba), **Fumade** (W), **Pierre-Perthuis** (F, Ba), **Rouez** (Pyr, Cu, Au), **Salau** (W) et **Tréguennec** (Sn, Ta, Nb, Li, Be). À cela s'ajoute une cinquantaine de cibles classées en priorité 2, issus d'un examen des données de près de 160 sujets, pour lesquels le BRGM est détenteur d'information.

Par ailleurs, ce travail fait apparaître plusieurs points clés qui ont été mentionnés au fil des chapitres précédents et qu'il convient de garder à l'esprit :

- l'inventaire des données relatives à l'Inventaire minier et la constitution de la couche « Métadonnées » (Tâche 1) sont loin d'être une tâche triviale. La quantité impressionnante de documents, la plupart du temps sur support papier, avec un contenu informationnel pas forcément aisément décelable de prime abord, rend cette tâche plus complexe et gourmande en temps que l'on aurait pu l'imaginer. Outre ces problèmes de support, d'archivage et d'indexation, il est apparu que certaines données digitalisées on non faisaient défaut (e.g. géochimie stream-sédiment et alluvionnaire archivées sur des bandes VAX devenues non-lisibles, données alluvionnaires hors-Inventaire mentionnées mais pour lesquelles le support de stockage des résultats analytiques reste à trouver...), sans que l'on puisse à ce stade savoir - compte tenu du temps imparti à cette étude - si ces données ont définitivement disparu ou bien si elles demeurent « récupérables » via le scan des listings originaux souvent placés en annexe des rapports ;

- une analyse des résultats de la géochimie Inventaire a montré que des limites existaient dans l'utilisation qui pouvait être faite de ces données. L'Inventaire s'est déroulé sur plus de 16 années, pendant lesquelles les techniques analytiques ont évolué et les seuils de détection ont diminué. Malgré la mise en œuvre de techniques de « lissage » (toujours très délicate et supposant une connaissance approfondie des techniques analytiques utilisées – voir Lambert, 2005) visant à permettre le travail sur des zones couvertes par des campagnes d'échantillonnage échelonnées dans le temps, il n'en reste pas moins, qu'en fonction des substances étudiées et de leurs seuils de détection, il sera illusoire de vouloir réévaluer certains secteurs ;
- ceci amène naturellement à mentionner une autre limite à l'exercice. Idéalement, il eût été souhaitable de pouvoir faire cette réévaluation en croisant les données issues de l'Inventaire avec des données nouvellement acquises. Si le fond géologique, grâce au programme de la carte géologique de la France au 1/50 000, au programme d'harmonisation des cartes à l'échelle départementale et à l'existence de synthèses au 1/250 000 a réellement progressé, et si quelques acquisitions en géophysique aéroportée ont été réalisées (couvertures haute résolution du nord-ouest de la France par exemple), les données nouvelles post-Inventaire sont relativement rares. Ajoutons à cela que certains organismes détenteurs de données récentes ne souhaitent pas forcément les partager...
- en complément du point précédent, il faut mentionner que l'Inventaire minier du territoire métropolitain ne donne, par le biais de la couverture géochimique, qu'une vision très superficielle et partielle du potentiel minier. L'absence d'une couverture géophysique aéroportée systématique (dont nombre de pays miniers se sont dotés) qui permettrait de définir la signature « profonde » des gisements et indices connus, d'orienter les recherches et de retrouver des objets similaires en d'autres secteurs est un véritable handicap qui prive les modèles de données d'une pièce majeure. À titre indicatif, le coût d'une couverture de géophysique aéroportée comme support d'infrastructure est d'environ 50 €/km<sup>2</sup> ;
- par ailleurs, il serait nécessaire d'informatiser et de valoriser toutes les données existantes sur les gisements potentiels connus, sous la forme de bases de données numériques et de modèles 3D ;
- enfin, en l'absence de possibilité identifiée de développement à court ou moyen terme, il serait souhaitable de classer les gisements démontrés comme « stocks en terre », en veillant à ce que leur accès et leur exploitabilité éventuels ne soient pas compromis par l'urbanisation ou l'implantation d'infrastructures lourdes.

## 9.2. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A UNE ZONE TEST

L'application du déroulé méthodologique à la zone test retenue démontre sa faisabilité. Bien que les délais impartis n'aient pas permis de collecter de manière exhaustive l'ensemble des données disponibles et de les mettre sous forme numérique, l'application de deux approches de prédictivité met en évidence des zones à fort potentiel qui mériteraient une poursuite des travaux.

Après la sélection du tungstène comme métal cible (application du filtre économique-industriel), l'approche du WofE (Weight of Evidence), appliquée aux données géologiques harmonisées de la Montagne Noire (carte géologique au 1/250 000 de Montpellier), en utilisant les indices, gisements, et anomalies géochimiques et alluvionnaires connus dans la zone, a permis la mise en évidence de zones nouvelles à potentiel élevé. Une méthode nouvelle, le CBA (Cell-Based Association), développée au BRGM, montre des résultats très comparables.

Les zones à fort potentiel ainsi identifiées sont :

- **les monts de Lacaune** (secteur 2 dit de Bouissas/Fumade) ;
- **le dôme de Montredon-Labessonié** ;
- **la « zone Nord-Est »**, proche du gisement à Pb/Zn de la Rabasse ;

Dans une moindre mesure, on retiendra également, au sud de la Montagne Noire :

- **le secteur de la Gineste/la Capoulade** ;
- **le secteur des Cadets** ;
- **le secteur 5** situé au sud-ouest de la zone d'étude.

Il apparaît ainsi, en comparant ces résultats aux données relatives à la métallogénie du tungstène, que les niveaux du Cambrien de la Montagne Noire sont un piège extrêmement efficace lorsqu'ils sont recoupés par des granites « minéralisateurs ». En particulier, les formations du Cambrien inférieur des Monts de Lacaune apparaissent comme les plus favorables à la présence de gisements potentiels.

Suite à ces observations, il est recommandé de mettre en œuvre une approche de modélisation 3D des formations cambriennes des Monts de Lacaune et du dôme de Montredon pour déterminer plus précisément la géométrie de ces formations, particulièrement dans certaines zones sous couverture où de nouveaux gisements pourraient être identifiés. En parallèle, la ré-analyse de certains échantillons avec des seuils de détection moins élevés pourrait permettre de mettre en évidence de nouvelles minéralisations. Cette approche, qui serait menée sur les zones à fort potentiel définies précédemment, nécessitera au préalable une étude statistique afin d'affiner la maille de rééchantillonnage. Enfin, une analyse détaillée des minéralisations de cette zone devrait être entreprise afin de vérifier le potentiel en indium et scandium des gisements et indices connus.

### 9.3. MODALITES D'APPLICATION

La méthodologie présentée est exhaustive ; elle permet, partant d'une cible présélectionnée et en appliquant des techniques de prédictivité, d'évaluer son potentiel de développement à l'échelle d'un district. *A contrario*, sa mise en œuvre est relativement lourde et donc consommatrice en temps car elle impose, pour être efficace, de disposer du maximum de couches thématiques pertinentes (géologie homogénéisée, géophysique...), dont certaines ne sont pas directement prêtes et/ou ne sont pas au format numérique.

En outre, on peut s'interroger sur le bien-fondé de la mise en œuvre d'une telle approche systématique pour des cibles intrinsèquement intéressantes et déjà identifiées comme telles par la Profession. Ne vaudrait-il pas mieux réserver ce type d'approche à des cibles moins bien connues et donc présentant aujourd'hui des ressources identifiées moindres, pour en faire la promotion via la mise en évidence de conditions de développement favorables à l'échelle de leur district ?

Mais, entre la présélection de cibles présentée au chapitre 3, basée essentiellement sur une approche technico-économique avec prise en compte du contexte actuel et la mise en œuvre de la méthodologie dans son intégralité, il existe « une voie médiane » qui permettrait à la fois d'affiner la priorisation, de mieux assurer la promotion des cibles et d'accélérer le processus de revue des cibles. Cette méthodologie « allégée » consisterait à compléter par un certain nombre d'informations critiques la table des sujets miniers classés par priorité (tableau 1) pour en faire un document synoptique de référence (pouvant éventuellement être décliné en fiches de description sommaire). Cette approche s'appuierait sur la présente étude et utiliserait

notamment les possibilités de croisement de données offertes par le SIG national dont certaines couches seront complétées en cours d'action (métadonnées notamment).

Les champs à ajouter aux champs existants du *Tableau 1* pourraient être les suivants, cette liste n'étant pas, à ce stade, exhaustive :

- Priorité [initiale], Nom, Département, Substances ;
- **Coordonnées X, Y** ;
- **Statut titre minier** (avec l'appui de la DGALN / Bureau des Ressources Minérales) ;
- **Typologie du gisement** ;
- **Réserves / ressources connues** ;
- **Criticité des substances principales** ;
- **Potentialités en métaux rares** (e.g., Ge, In, Ta...) ;
- **Existence d'une filière** (française, complète ou incomplète, ou européenne) ;
- **Documents disponibles** (avec alimentation de la couches métadonnées du SIG qui devra fournir de manière opérationnelle la liste des documents [de l'Inventaire et hors- Inventaire] disponibles sur le secteur. Les documents papiers importants seront dans la mesure du possible scannés [cf. Action 2013 de numérisation de la documentation minière non publiée] et enregistrés au format PDF pour pouvoir être mis à disposition du public).
- **Degré de connaissance** (synthèse du contenu de certains des rapports précédents : types de travaux réalisés, métrage des tranchées, des sondages, des galeries de reconnaissance et/ou d'exploitation, etc.) ;
- **Potentiel de développement** (estimé sur la présence d'anomalies et/ou d'indices à proximité de la cible. Ceci nécessitera le calcul préliminaire, à l'échelle de la métropole et « une fois pour toutes », des cartes d'anomalies géochimie-stream et alluvionnaire correspondant aux typologies de gisements rencontrés) ;
- **Enjeux environnementaux à prendre en compte** (utilisation du SIG national avec les compléments et mises à jour nécessaires) ;
- **Contraintes liées à l'urbanisation et aux populations, aux infrastructures** (utilisation du SIG national avec les compléments et mises à jour nécessaires) ;
- **Priorité réestimée sur la base des éléments précédents.**

Cette méthodologie dite « allégée » s'appuierait donc fortement sur les propositions faites au cours de cette étude. Si la partie « traitement de données » est effectivement réduite, la méthodologie n'en reprend pas moins nombre d'éléments incontournables et notamment la recherche et l'exploitation de la documentation existante.

Le document obtenu serait remis au Bureau des Ressources Minérales accompagné du SIG national mis à jour et d'un tableau des classes de gisements par substances permettant de définir rapidement si la cible étudiée est grosse, moyenne ou petite. Si le besoin s'en faisait sentir, il serait probablement possible d'attribuer un score à chacun des champs – selon des modalités et des échelles à définir en accord avec le Bureau des Ressources Minérales – pour obtenir une vision encore plus synthétique des résultats. Ceux-ci pourraient être publiés – avec éventuellement l'occultation de certains champs – sur les portails existants ou en cours de développement (à définir) afin d'informer les opérateurs potentiels et assurer la promotion de certains des sujets. Ce n'est finalement qu'après ce stade que la mise en œuvre de la méthodologie dite « exhaustive » pourrait intervenir, par exemple pour promouvoir des sujets *a priori* moins attractifs.

## 10. Références bibliographiques

**Audion A.-S.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama 2011 du marché de l'antimoine. BRGM/RP 60462-FR, 86 p., 22 fig., 18 tabl., 2 ann.

**Audion A.-S., Labbé J.-F.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2012) - Panorama 2011 du marché du tungstène. BRGM/RP 60461-FR, 109 p., 29 fig., 17 tabl.

**Barbier J.** (1996) - L'Inventaire géochimique du territoire français. Commentaires et explications. Note technique BRGM HYD/NT/96/078, mars 1996, 52 p.

**Barbier J., Chery L.** (1995) - Valorisation des données de l'inventaire géochimique pour l'identification des risques de teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux. Vol. 1 : Étude de faisabilité ; Vol. 2 : Inventaire géochimique du territoire français, commentaires et explications pour une meilleure exploitation des données. BRGM/RR-38721-FR, 91 p., 2 vol.

**Béziat P., Bornuat M.**, avec la collaboration de Gentilhomme Ph. et Huijbregts Ch. (1995) - Carte minière de la France métropolitaine à 1/1 000 000. Situation 1994. Notice explicative. BRGM Ed., 102 p.

**Béziat P., Coulomb J.-J.**, avec la collaboration de Gentilhomme Ph. et de Gramont X. (1990) - Les gisements de tungstène en France. Situation 1990. Étude réalisée par le BRGM sous l'égide du Comité de l'Inventaire des ressources minières métropolitaines, 107 p.

**Béziat P., Prouhet J.-P., Tollon F.** (1980) - Le district de Montredon-Labessonnié (Tarn) : W, Sn, F. Publications du 26<sup>ème</sup> Congrès Géologique International, fascicule E7, 44 p.

**Billa M., Cassard D., Lips A.L.W., Bouchot V., Tourlière B., Stein G., Guillou-Frottier L.** (2004) - Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS. *Ore Geology Reviews*, 25, 39-67.

**Bonham-Carter G.F.** (1994) - Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS. *Computer Methods in the Geosciences* 13, Pergamon, New York, 398 p.

**Cassard D. et Lambert A.** (2007) - Le SIG Mines France : <http://sigminesfrance.brgm.fr/index.asp>

**Cassard D., Billa M., Lambert A., Picot J.-C., Husson Y., Lasserre J.-L., Delor C.** (2008) - Gold predictivity mapping in French Guiana using an expert-guided data-driven approach based on a regional-scale GIS. *Ore Geology Reviews*, 34, 471-500.

**Cassard D., Bertrand G., Maldan F., Gaël G., Kaija J., Aatos S., Angel J.-M., Arvanitidis N., Ballas D., Billa M., Christidis C., Dimitrova D., Eilu P., Filipe A., Grazea E., Inverno C., Kauniskangas E., Maki T., Matos J., Meliani M., Michael C., Mladenova V., Navas J., Niedbal M., Perantonis G., Pyra J., Santana H., Serafimovski T., Serrano J.-J., Strengel J., Tasev G., Tornos F. and Tudor G.** (2012a) - ProMine pan-European Mineral Deposit database: a new dataset for assessing primary mineral resources in Europe. ProMine workshop "Mineral Resources Potential Maps: a Tool for Discovering Future Deposits", 12<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> March 2012, Nancy, France. Extended abstracts on CD-ROM.

**Cassard D., Bertrand G., Billa M.** (2012b) - ProMine Project – Minutes of WP1 progress meeting (T0+42). 14 p., document confidentiel.

**Darnley A.G., Björklund A., Bølviken B., Gustavsson N., Koval P.V., Plant J.A., Steenfelt A., Tauchid M., Xie Xuejing, Garrett R.G., Hall G.E.M.** (1995) - A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management: Recommendations for International Geochemical Mapping. Final report of IGCP Project 259. 2<sup>nd</sup> revised edition. Paris: UNESCO. 122 p.

**Demange M., Guérangé-Lozes J., Guérangé B.** (1995) - Carte géologique de la France au 1/50 000, feuille de Lacaune. BRGM Éditeur.

**Deschamps Y., Vadala P., Gentilhomme Ph.**, avec la collaboration de Y. Guillou, M. Joubert, C. Leduc, J.-L. Marroncle et C. Gateau (2002) - L'Inventaire Minier de la France Métropolitaine. BRGM/RP-51455-FR, CD-ROM.

**De Vos W., Tarvainen T., Salminen R., Reeder S., De Vivo B., Demetriades A., Pirc S., Batista M.J., Marsina K., Ottesen R.T., O'Connor P.J., Bidovec M., Lima A., Siewers U., Smith B., Taylor H., Shaw R., Salpeteur I., Gregorauskiene V., Halamic J., Slaninka I., Lax K., Gravesen P., Birke M., Breward N., Ander E.L., Jordan G., Duris M., Klein P., Locutura J., Bel-Ian A., Pasiieczna A., Lis J., Mazreku A., Gilucis A., Heitzmann P., Klaver G. & Petersell V.** (2006) - Geochemical Atlas of Europe. Part 2 - Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications. Geological Survey of Finland, Espoo, 692 p.

**European Topic Centre on Land Cover** (1999) - CORINE Land Cover, a key database for European integrated environmental assessment. European Environment Agency, Copenhagen, 19 p.

**Féraud J.** (2008) - Panorama des gisements français de fluorine. *Géochronique*, n° 106, p. 26-32.

**Gentilhomme Ph., Deschamps Y.**, avec la collaboration de Mroz J.-P., Vadala P. (2001) - Synthèse et bilan de l'Inventaire minier métropolitain. Volet de réévaluation économique. Rapport BRGM RP-51422-FR, 62 p., 2 tabl., 6 ann.

**Guigues J., Devismes P.** (1969) - La Prospection minière à la batée dans le Massif Armoricain, méthodes, résultats, atlas minéralogique. *Mémoire du BRGM* n° 71, 171 p.

**Jébrak M., Marcoux E.** (2008) - Géologie des ressources minérales. Société de l'Industrie Minérale. 667 p.

**Lambert A.** (2005) - Les données géochimiques et alluvionnaires de l'Inventaire minier du territoire national. Constitution d'une base de données exhaustive. Rapport final. BRGM/RP-53546-FR, 116 p., 6 fig., 6 tabl., 6 ann.

**Michard A.G.** (1990) - Synthèse Montagne-Noire. Rapport BRGM R30358 DEX-DAM-90, 235 p., 38 fig., 5 ann.

**Péllissonnier H.** (1995) - Peut-on encore trouver des gisements minéraux économiquement exploitables en France métropolitaine ? *In*: La mine au XXI<sup>e</sup> siècle. Une place pour l'industrie française ? Réalités industrielles. *Annales des Mines*, Octobre/Novembre 1995, p. 20-27.

**Routhier P.** (1980) - Où sont les métaux pour l'avenir ? Les provinces métalliques. Essai de métallogénie globale. *Mémoire du BRGM* n° 105, 410 p.

**Roy R., Cassard D., Cobbold P.R., Rossello E.A., Billa M., Bailly L., Lips A.L.W.** (2006) - Predictive mapping for copper-gold magmatic-hydrothermal systems in NW Argentina: use of a regional-scale GIS, application of an expert-guided data-driven approach, and comparison with results from a continental-scale GIS. *Ore Geology Reviews*, 29, p. 260-286.

**Safa P., Couilloud D., Tessier B., Moine B.** (1987) - Le gisement de tungstène de Fumade (Tarn, France) : gîtologie, caractères pétrographiques et géochimiques des skarns et des granites. *Chron. Rech. Min.*, n° 487, p. 39-51.

**Salminen R., Batista M.J., Bidovec M., Demetriades A., De Vivo B., De Vos W., Duris M., Gilucis A., Gregorauskiene V., Halamic J., Heitzmann P., Lima A., Jordan G., Klaver G., Klein P., Lis J., Locutura J., Marsina K., Mazreku A., O'Connor P.J., Olsson S.Å., Ottesen R.T., Petersell V., Plant J.A., Reeder S., Salpeteur I., Sandström H., Siewers U., Steenfelt A. & Tarvainen T.** (2005) - FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1: Background Information, Methodology and Maps. Geological Survey of Finland, Espoo, 526 p.

**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., Billa M., Cassard D., Bertrand G., Angel J.-M.** (2012) - Mineral targeting at continental scale. ProMine workshop "Mineral Resources Potential Maps: a Tool for Discovering Future Deposits", 12-14<sup>th</sup> March 2012, Nancy, France. Extended abstracts.on CD-ROM.



## **Annexe 1**

### **Liste non exhaustive des documents relatifs aux ressources minérales françaises**



## SYNTHÈSES RELATIVES AUX RESSOURCES MINIÈRES FRANÇAISES

**Anonyme** (1977) - Ressources minières françaises. Tome 2. Les gisements de Pb-Zn français (situation en 1977). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 115 p., 1 pl.h.t.

**Bache J.-J., Bornuat M., Duhamel M.** (1981) - Ressources minières françaises. Tome 11. Les gisements de Cuivre (situation en 1981). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 102 p., 1 pl.h.t.

**Bache J.-J.** (1978) - Ressources minières françaises. Tome 5. Les gisements d'Or (situation en 1978). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 73 p.

**Béziat P., Coulomb J.-J.**, avec la collaboration de Gentilhomme Ph. et de Gramont X. (1990) - Les gisements de tungstène en France. Situation 1990. Étude réalisée par le BRGM sous l'égide du Comité de l'Inventaire des ressources minières métropolitaines, 107 p.

**Delfeau M., Duhamel M.** (1983) - Ressources minières françaises. Tome 14. Les gisements de sillimanite, d'andalousite, de disthène, de magnésite, de graphite et de feldspaths (situation en 1983). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 61 p.

**Delille J.-C.** (1981) - Ressources minières françaises. Tome 12. Les gisements d'Étain (situation en 1981). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 155 p., 1 pl.h.t.

**Henry B.** (1978) - Ressources minières françaises. Tome 4. Les gisements d'Amiante (situation en 1978). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 51 p.

**Henry B., Rouveyrol P.** (1977) - Ressources minières françaises. Tome 1. Les gisements de Tungstène (situation en 1977). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 35 p.

**Lhégu J.** (1978) - Ressources minières françaises. Tome 3. Les gisements de fluorine (situation en 1978). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 209 p., 1 pl.h.t.

**Lhégu J., Walter J.** (1980) - Ressources minières françaises. Tome 7. Les gisements de barytine (situation en 1980). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 225 p., 1 pl.h.t.

**Lougnon J.** (1981) - Ressources minières françaises. Tome 10. Les gisements de Manganèse (situation en 1981). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 130 p., 1 pl.h.t.

**Méloux J.** (1980) - Ressources minières françaises. Tome 8. Les gisements de Soufre et de Pyrite (situation en 1980). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 83 p., 1 pl.h.t.

**Monthel J.** (1983) - Ressources minières françaises. Tome 13. Les indices de Mercure (situation en 1983). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 50 p., 1 pl.h.t.

**Moyroud B., Féraud J., Bornuat M., Ziserman A.** (1979) - Ressources minières françaises. Tome 6. Les gisements d'Antimoine (situation en 1979). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 121 p.

**Stolojan N., Viland J.-C.**, avec la collaboration de Béziat P., Bigot M., Bornuat M., Cortial Ph., Lagny Ph. et Pouit G. (1991) - Les gisements de plomb-zinc en France. Situation 1991. Étude réalisée par le BRGM sous l'égide du Comité de l'Inventaire des ressources minières métropolitaines, 276 p.

**Walter J.** (1980) - Ressources minières françaises. Tome 9. Les gisements de Talc (situation en 1980). Étude réalisée par le BRGM, sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines. 42 p., 1 pl.h.t.

## SYNTHÈSES RÉGIONALES

**Aubague M., Orgeval J.-J.** (1990) - La Province métallogénique Sous-Cévenole (Bassin des Causses inclus). Synthèse préliminaire, perspective de recherche. Rapport BRGM 89 DAM 005 DEX, 63 p., 20 fig.

**Billa M.**, avec la collaboration de Blouin J.-P., Lagny Ph., Vasquez-Lopez R., Guillou Y. (1992) - Synthèse régionale Vendée – Mauges. Rapport BRGM R36216, 94 p., 15 fig., 3 pl., 5 ann.

**Bouchot V., Marroncle M.**, avec la collaboration de Lagny Ph., Monthel J. (1992) - Synthèse régionale Argentat-Châtaigneraie. Rapport BRGM R36063, 44 p., 10 fig., 5 ann.

**Callier L.**, avec la collaboration de Beaujour A., Coppel J., Husson Y., Kosminski G., Leduc Cl., Scanvic J. Y., Vaillant F.-X. (1992) - Synthèse du Domaine Mancellien en Basse-Normandie. Rapport BRGM R35284, 51 p., 15 fig., 3 pl., 4 ann.

**Combes A.** (1987) - Synthèse du Morvan. Rapport BRGM 87 DAM 026 OP4.

**Combes A., de Gramont X.** (1989) - Synthèse du Plateau d'Aigurande et de ses marges. Rapport BRGM 88 DAM 017 DEX, 185 p., 3 tab., 2 pl.

**de Gramont X.**, avec la collaboration de Feybesse J.-L., Lambert A. (1990) - Synthèse du district de Brioude – Massiac et des confins nord de la Margeride (Massif Central). Rapport BRGM R30695 DL/C DAM 90, 154 p., 2 ann.

**de Gramont X., Braux Ch.**, avec la collaboration de Prévot J.-C, Coppel J., Girault F., Lambert A., Scanvic J.-Y. (1990) - Synthèse régionale du Sud-Limousin. Rapport BRGM R31814, DEX-DAM-90, 65 p., 3 pl., 5 ann.

**Guillou Y.** (1990) - Synthèse du bassin de Châteaulin (France). Rapport BRGM R30818, 99 p., 22 fig., 1 tabl., 14 pl., 8 ann.

**Marot A., Bellivier F., Berthiaux A., Bonnici J.-P., Leduc Cl., Milési J.-P., Vaillant F.-X.** (1989) - Synthèse Saint-Georges-sur-Loire. Rapport BRGM 89 DAM 008 DEX, 61 p., 5 ann.

**Marroncle J.-L.**, avec la collaboration de Magnien A.P., Scanvic J.-Y., Viallefond L. (1989) - Synthèse de la région du granite de Meymac (Corrèze). Rapport BRGM 89 DAM 014 OP4, 142 p., 2 ann.

**Marroncle J.-L., Le Chapelain J.-R., Périchaud J.-J.** (1985) - Synthèse géologique et métallogénique de la région du faisceau de Pontgibaud et de ses marges. Massif Central français. Rapport BRGM DL/C n° 349.

**Martel-Jantin B.**, avec la collaboration de Corpel J., Chantraine J., Viallefond L., Vaillant F.- X., Lulzac Y., Le Bars P. (1990) - Synthèse Briovérien de Nord-Bretagne. Rapport BRGM R31079, 71 p., 8 fig., 6 ann.

**Michard A. G.** (1990) - Synthèse Montagne-Noire. Rapport BRGM R30358 DEX-DAM-90, 235 p., 38 fig., 5 ann.

**Moyroud B., Salpeteur I.** (1993) - Synthèse des Pyrénées orientales. Rapport BRGM R37780, 94 p., 26 fig., 6 tabl., 2 pl., 5 ann.

## PANORAMAS DU MARCHÉ DES SUBSTANCES

**Audion A.-S, Labbé J.-F.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2010) - Panorama mondial 2010 du marché du tellure. BRGM/RP-58930-FR, 77 p. 21 fig., 11 tabl.

**Audion A.-S, Martel-Jantin B.**, avec la collaboration de Labbé J.-F., et de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama mondial 2010 du marché du rhénium. BRGM/RP-60205-FR, 76 p. 23 fig., 15 tabl.

**Audion A.-S.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama 2011 du marché de l'antimoine. BRGM/RP 60462-FR, 86 p., 22 fig., 18 tabl., 2 ann.

**Audion A.-S., Labbé J.-F.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2012) - Panorama 2011 du marché du tungstène. BRGM/RP 60461-FR, 109 p., 29 fig., 17 tabl.

**Audion A.-S., Piantone P.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama 2011 du marché du tantale. BRGM/RP 60463-FR, 85 p., 20 fig., 15 tabl.

**Barthélémy F., Christmann P.**, avec la collaboration de Hocquard Ch., Labbé J.-F., et de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama 2011 du marché du molybdène. BRGM/RP 60204-FR, 59 p., 14 fig., 5 tabl.

**Barthélémy F., Labbé J.-F., Picot J.-C.** avec la collaboration de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2012) - Panorama 2011 du marché du graphite naturel. BRGM/RP 60459-FR, 92 p., 15 fig., 20 tabl.

**Christmann P., Angel J.-M., Bailly L., Barthélémy F., Benhamou G., Billa M., Gentilhomme Ph., Hocquard Ch., Maldan F., Martel-Jantin B., Monthel J.**, avec la collaboration extérieure

de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2010) - Panorama mondial 2010 du marché du germanium. BRGM/RP-58163-FR, 67 p., 30 fig., 9 tabl., 1 ann.

**Christmann P., Angel J.-M., Bailly L., Barthélémy F., Benhamou G., Billa M., Gentilhomme Ph., Hocquard Ch., Maldan F., Martel-Jantin B., Monthel J.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2010) - Panorama mondial 2010 du marché du gallium. BRGM/RP-58162-FR, 62 p., 8 fig., 10 tabl.

**Christmann P., Angel J.-M., Bailly L., Barthélémy F., Benhamou G., Billa M., Gentilhomme Ph., Hocquard Ch., Maldan F., Martel-Jantin B., Monthel J.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2010) - Panorama mondial 2010 du marché du niobium. BRGM/RP-58164-FR, 77 p., 12 fig., 11 tabl., 2 ann.

**Christmann P., Angel J.-M., Bailly L., Barthélémy F., Benhamou G., Billa M., Gentilhomme Ph., Hocquard Ch., Maldan F., Martel-Jantin B., Monthel J.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2010) - Panorama mondial 2010 du marché des terres rares. BRGM/RP-58161-FR, 90 p., 14 fig., 22 tabl., 4 encad.

**Christmann P., Corbineau L., Labbé J.-F et Monthel J.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama mondial 2010 du marché du béryllium. BRGM/RP-58927-FR, 66 p., 15 fig., 7 tabl.

**Labbé J.-F. et Christmann P.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama mondial 2010 du marché du sélénium. BRGM/RP-58926-FR, 90 p. 18 fig., 17 tabl.

**Labbé J.-F. et Daw G.**, avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2012) - Panorama mondial 2011 du marché du lithium. BRGM/RP-60460-FR, 157 p. 51 fig., 30 tabl.

## **Annexe 2**

# **Métallogénie du tungstène dans la Montagne Noire**



## A - Les minéralisations filoniennes à quartz-wolframite associées aux granites

- **Modèle métallogénique**

Ces minéralisations se localisent aux sommets d'intrusions de granites fractionnés hyperalumineux mis en place à des profondeurs de l'ordre de 2 à 10 km (*Figure 1*).

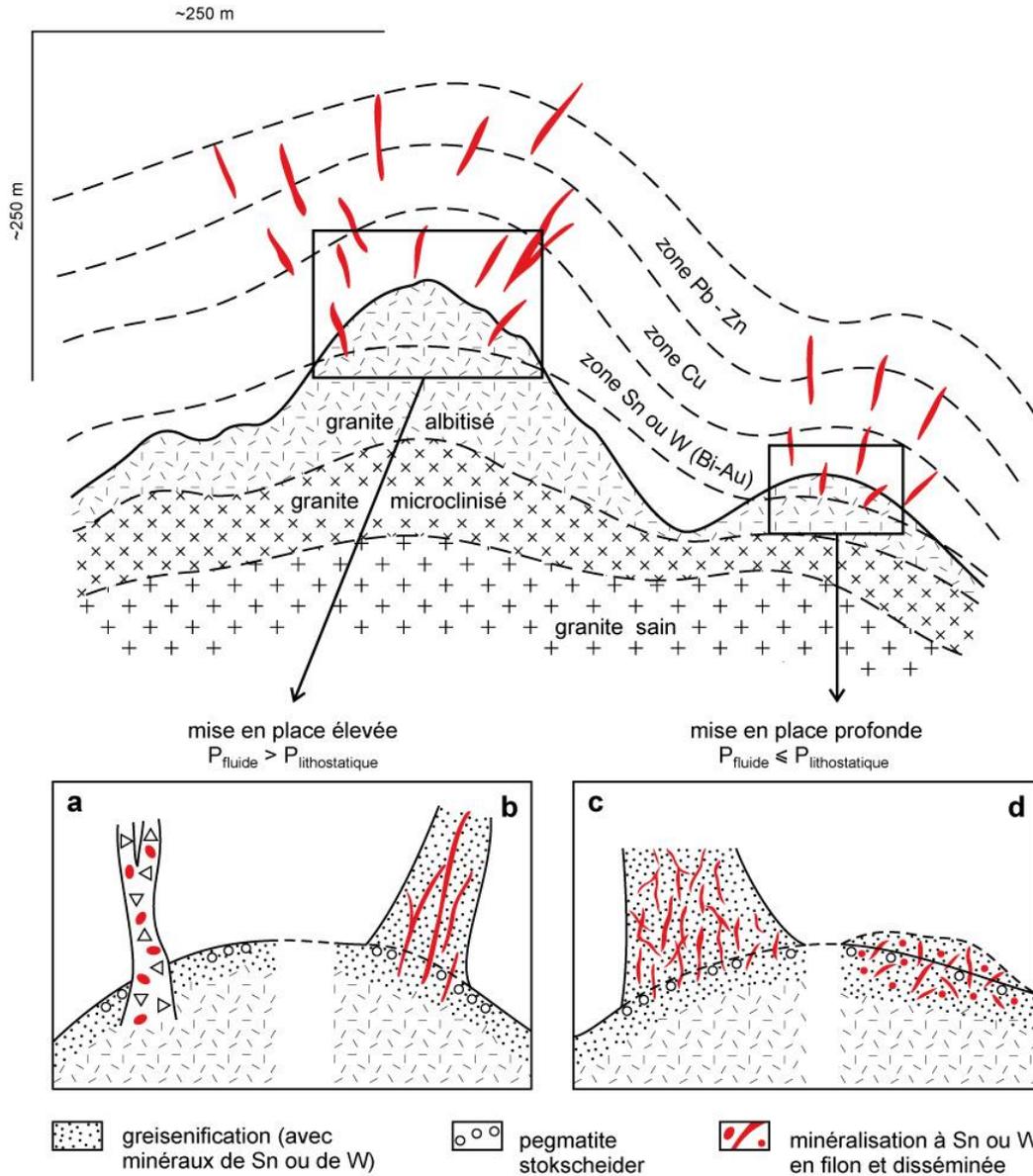


Figure 1 - Coupe idéalisée d'une intrusion granitique avec des minéralisations filoniennes à W-Sn situées au sommet. Les deux exemples de profondeurs différentes illustrent les différentes morphologies et disséminations qui peuvent en résulter. Modifié d'après Sinclair (1996).

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 fluide générée par les 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% WO<sub>3</sub> et est fréquemment inférieure à 0,5 % WO<sub>3</sub> (moyenne : 0,4 % WO<sub>3</sub>). Les grands gisements ou districts mondiaux de ce type sont la Cornouaille, le nord du Portugal (Panasqueira), Mactung au Yukon, Kholtasan dans l'Altaï sibérien et surtout la Chine du Sud-Est qui comprend plusieurs champs dépassant 100 000 t de WO<sub>3</sub> contenu.

- **Gisements et indices connus de ce type dans la zone d'étude**

Il existe de nombreuses occurrences de filons de quartz principalement à wolframite, mais pouvant contenir également en proportions variables de la cassitérite, de la scheelite et de la fluorite.

La zone de Montredon-Labessonnié est la principale zone connue où la densité de filons minéralisés atteint un seuil économique (*Figures II et III*). Il s'agit de réseaux de veines de quartz centimétriques à métriques de direction NW-SE. Tous ces filons recoupent la schistosité principale et les minéralisations stratiformes à scheelite quand elles existent, ce qui explique la superposition de minéralisations à la fois stratiformes et filoniennes aux mêmes endroits (l'Hom-Haut, l'Auriolle).

*Le champ filonien de La Frégère (Montredon-Labessonnié, classé priorité 2 – voir corps du rapport)*

Ce gisement a été exploité en souterrain de 1958 à 1962 par la Compagnie Minière de Montredon : 82 000 t de tout-venant à 1,08 % WO<sub>3</sub> (700 t de métal) ; l'exploitation a été arrêtée en 1962 à cause de la chute des cours mondiaux. En 1981, le champ filonien de la Frégère a été évalué à 1,3 Mt de quartz à 0,65 % soit 8 500 t WO<sub>3</sub>.

Les filons de la Frégère sont encaissés pour l'essentiel dans une « cuvette » structurale de micaschistes, de dimension kilométrique ; une campagne géophysique (sismique réflexion) a montré que l'orthogneiss se situait à une profondeur moyenne de 100 m au cœur de la cuvette. Le champ filonien lui-même, tel qu'il est actuellement reconnu par les travaux miniers anciens et par des décapages extensifs, fait 600 m de long et 300 m de large.

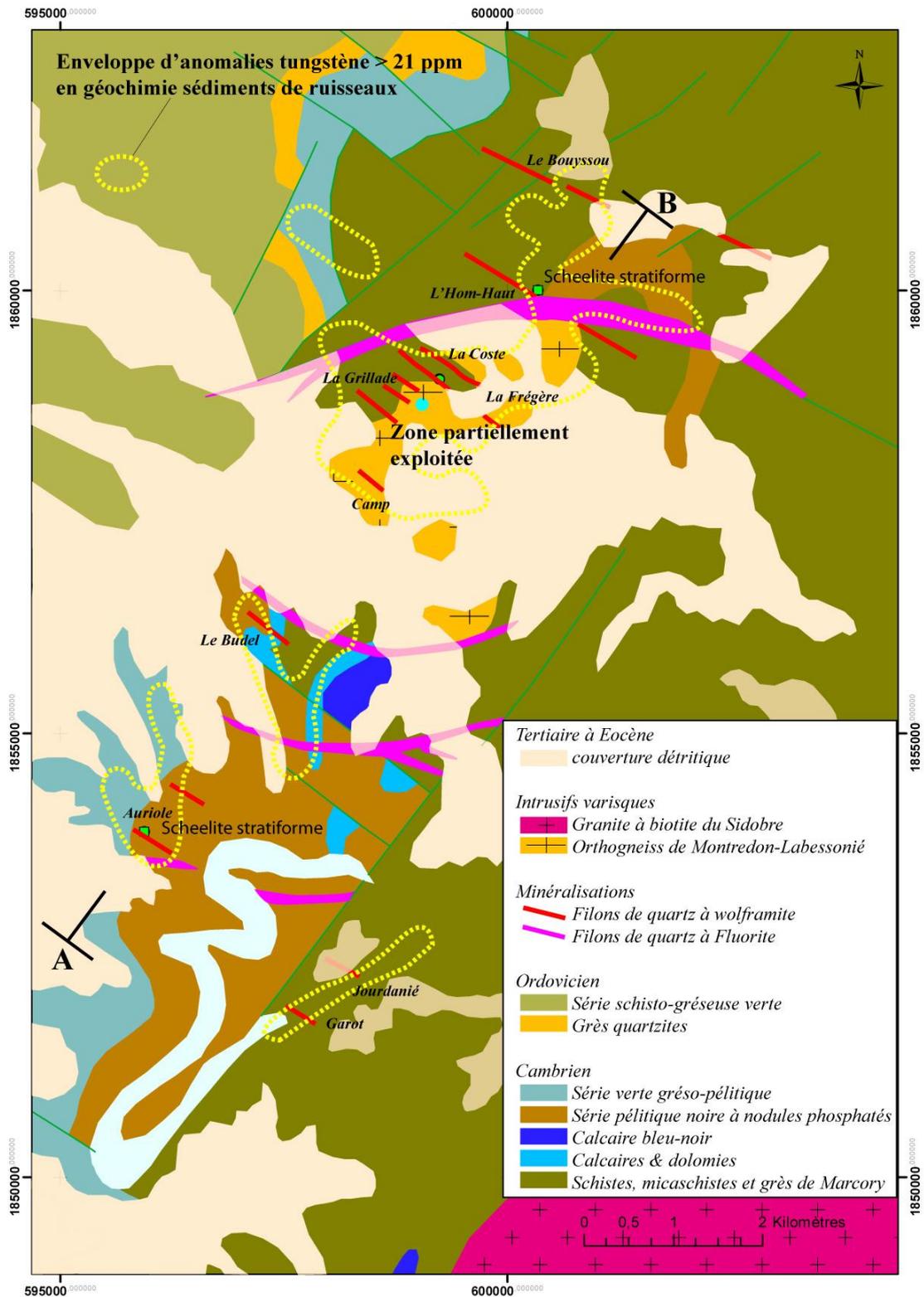


Figure II - Carte géologique simplifiée du dôme de Montredon-Labessonnié avec position des principales minéralisations filoniennes et stratiformes connues. Noter la bonne cohérence des anomalies géochimiques W (pointillé jaune marquant des anomalies supérieures à 21 ppm) avec les indices de surface connus.

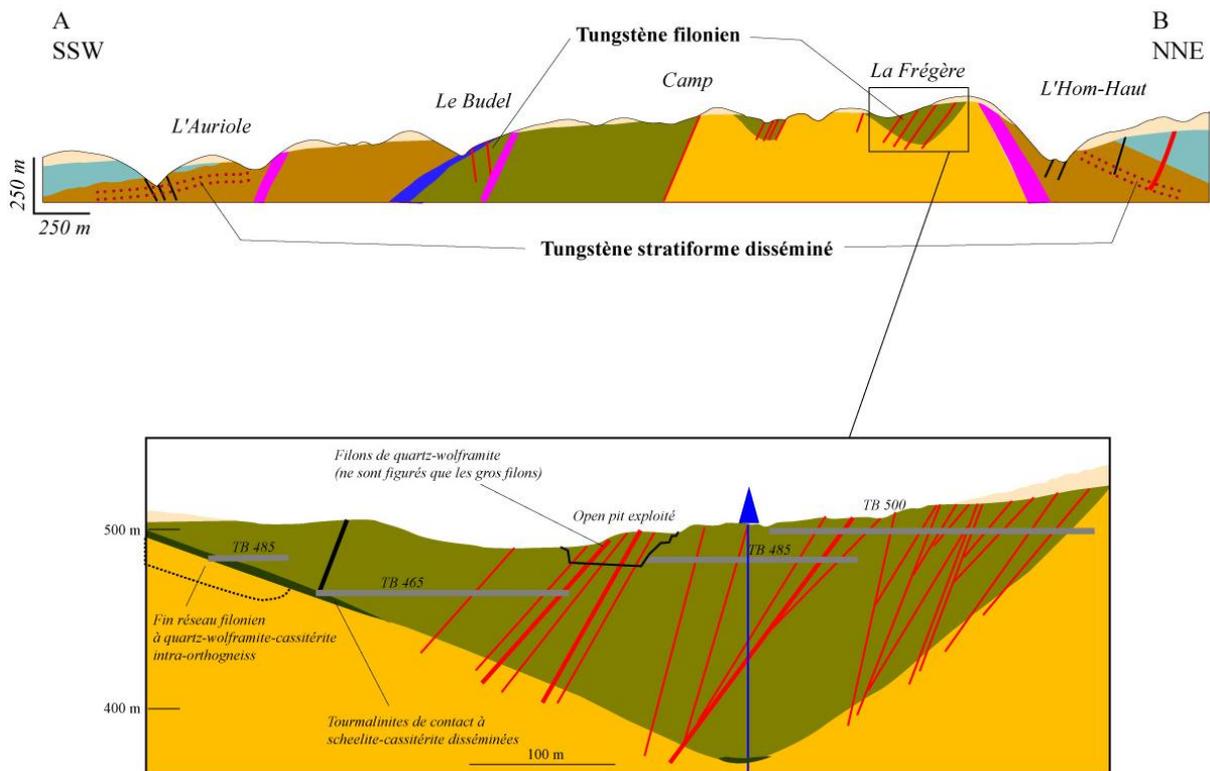


Figure III - Coupes géologiques au sein du dôme de Montredon-Labessonnié (tracé de la coupe A-B figure précédente). Les minéralisations reconnues comme les plus importantes se localisent dans les micaschistes situés au toit de l'orthogneiss. En encart, le zoom sur la minéralisation économique de La Frégère, montrant un minimum de trois morphologies de minéralisations (filons à quartz-wolframite dans les micaschistes, tourmalinites à scheelite-cassitérite dans les micaschistes au contact de l'orthogneiss, réseaux de veines à quartz-wolframite dans l'orthogneiss à proximité du contact avec les micaschistes). TB = travers-bancs. Modifié d'après P. Béziat et al. (1990) et documents miniers.

Il est constitué de deux larges faisceaux de filons (N130°E à N150°E à pendage moyen 40°S) composés chacun d'un ou deux filons principaux (1 à 5 m de puissance) associés à quelques filons de puissance variant de 20 à 50 cm et à un grand nombre de filonnets d'une puissance inférieure à 20 cm ; ces deux faisceaux sont séparés par un accident jalonné de brèches à tourmaline, sans tungstène. Les filons épais sont, dans l'ensemble, plus réguliers que les filons minces qui s'anastomosent fréquemment ; certains filons présentent des structures en « relais » dans le plan horizontal et convergent vers le bas pour former un filon unique plus puissant (Béziat *et al.*, 1980). Au-delà, ils ont été reconnus par sondages jusqu'à la base de la « cuvette », puis ils s'enracinent dans l'orthogneiss, sous la forme d'un stockwerk de filonnets centimétriques avec encore quelques filons.

La partie sud du dôme de Montredon contient de nombreux indices de filons minéralisés, notamment les indices de :

- Auriole (filons et filonnets de quartz à scheelite) ;
- Le Budel (filons de 2 à 4 m de puissance à scheelite et fluorite) ;
- Bouyssou, zone filonienne à teneur supérieure à 1 % WO<sub>3</sub> ;
- ainsi que les indices filoniens de l'Hom-Haut, Saclas, La Goussarié.

### *Les indices filoniens de Brousses (Aude)*

Dans le secteur de Brousses (3 km à l'ouest de Salsigne), une forte anomalie en géochimie de sédiments de ruisseau, définie par 13 points anomaux en W sur 1 km par 250 m, a permis de découvrir de nombreux filonnets remplis de quartz à tourmaline et scheelite au bord sud-est du granite de Brousses qui recoupe les schistes du Cambrien. La minéralisation se localise dans un faciès de bordure du granite sur une puissance de 50 mètres avec des teneurs atteignant localement 0,7 % WO<sub>3</sub>. Cette zone mériterait d'être réexaminée.

D'autres anomalies existent plus au nord dans le même contexte (à Fontiers-Cabardès par exemple) avec présence de quartz à wolframite dans forêt de la Loubatière, ces indices demanderaient à être réexaminés.

## **B - Les minéralisations de type skarn**

- **Modèle métallogénique**

Les skarns sont formés par la transformation de calcaires et/ou dolomies par diffusion de fluides au contact de granites intrusifs dans ces formations carbonatées. Ils sont principalement constitués de silicates calciques (grenat, pyroxènes). Les skarns se forment en trois grandes étapes qui se superposent : l'étape thermométamorphique correspond à la mise en place de l'intrusion et à la déshydratation des formations encaissantes. L'étape métasomatique prograde se traduit par un apport de fer, manganèse et aluminium par les fluides magmatiques et la formation des silicates calciques (pyroxènes, grenats). L'étape hydrothermale rétrograde correspond à l'envahissement du système par des fluides de plus basse température (450-300°C) et la formation de minéraux hydratés (amphiboles, épidotes, chlorites) et le dépôt de sulfures.

La composition du granite intrusif et de l'encaissant carbonaté joue un rôle important sur la composition des skarns, ainsi que la profondeur de mise en place, ce qui explique en partie la diversité des types de skarns connus.

La classification actuelle reconnaît 7 types de skarn : à fer, à cuivre, à zinc, à tungstène, à étain, à molybdène, à or.

La morphologie des skarns est extrêmement variable (*Figure IV*). Elle dépend en effet de la géométrie de l'intrusion, de la géométrie des couches carbonatées, du type de déformation/fracturation relié à la profondeur de mise en place et enfin des volumes de fluides en circulation relié au régime thermique.

L'importance de ces gisements varie de quelques centaines de milliers à quelques milliers de tonnes, rarement plus de dix, de minerai. La teneur de ce minerai est plus élevée que dans les gisements de filons à wolframite. Elle est en moyenne de 0,7 % de WO<sub>3</sub> et dépasse parfois nettement 1 % comme à Salau, qui a produit plus de 10 000 t de WO<sub>3</sub> contenu. Les grands gisements mondiaux de ce type sont ceux des chaînes ouest-américaines (Logjam Creek au Canada, Pine Creek aux USA, Toromocho au Pérou, Tyrny Auz dans le Caucase, San Dong en Corée, Yachishan en Chine et King Island en Tasmanie).

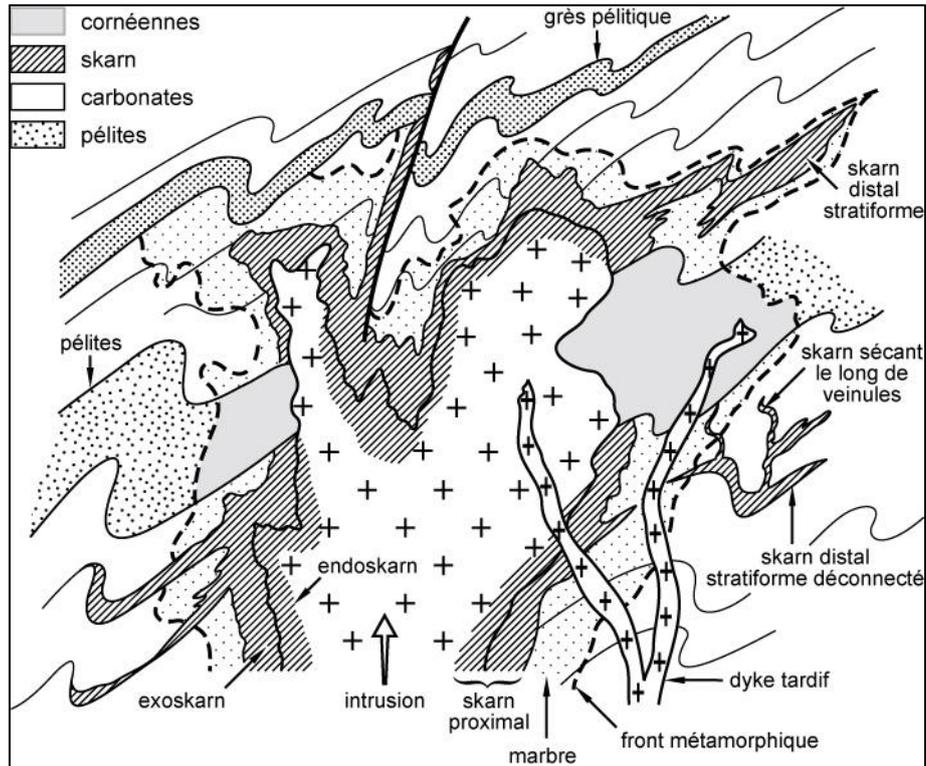


Figure IV - Coupe schématique idéalisée montrant les différentes morphologies de skarns pouvant se développer au contact d'une intrusion recoupant des niveaux carbonatés.  
Modifié d'après Jébrak et Marcoux (2008).

- **Gisements et indices connus de ce type dans la zone d'étude**

Minéralisations de type skarn de Fumade – La Fédial (classé priorité 1 – voir corps du rapport ; Figure V)

Dans le cadre des travaux de l'Inventaire Minier, une première minéralisation de type skarn fissural fut découverte par le BRGM près de la ferme de Fumade. Après l'attribution d'un PER puis d'une concession à la SNEA(P), cette dernière a mis en évidence une importante minéralisation tungstifère de type skarn. Ces skarns sont principalement développés au dépend d'alternances carbonatées dans les pelites noires (K2b, série porteuse des minéralisations stratoïdes à scheelite) intrudées par le granite de la Fabrié mis en évidence en profondeur par les sondages.

Les sondages ont permis d'observer un ensemble très hétérogène de roches. Celui-ci constitue, au sommet d'un vaste plancher de granite à biotite de type Sidobre, le cortex de l'intrusion. Il se présente sous forme de lames injectées dans divers plans de discontinuité (sédimentaires et/ou tectoniques). L'intrusion du complexe aplo-granitique dans les formations schisto-carbonatées donne naissance à plusieurs catégories de skarns bien différenciés :

- des skarns fissuraux, à calcite - diopside - trémolite, parfois minéralisés en scheelite (à l'origine de l'anomalie de départ) et surtout développés dans les dolomies massives de la base de la série noire (K2a) à partir de fractures grossièrement E - W ;
- des skarns stratiformes dans les alternances calcaréo-détritiques sus-jacentes (alternances inférieures) dont ils conservent généralement le litage originel ; on distingue les skarns de type I, clairs, à clinopyroxène, épidote, grossulaire, idocrase, wollastonite, bien lités et à zonalités minérales nettes : ils affectent l'ensemble des alternances calcaréo-détritiques sur quelques

dizaines de mètres et sont rarement et faiblement minéralisés en scheelite ; puis des skarns de type II, sombres , à idocrase, un peu de quartz mais prépondérance de grenat. Ils sont massifs, à gros grain, et se localisent uniquement au niveau des barres carbonatées des alternances inférieures, au contact ou à proximité de la lame aplo-granitique principale. C'est dans ces skarns de type II que s'observent les fortes concentrations en scheelite.

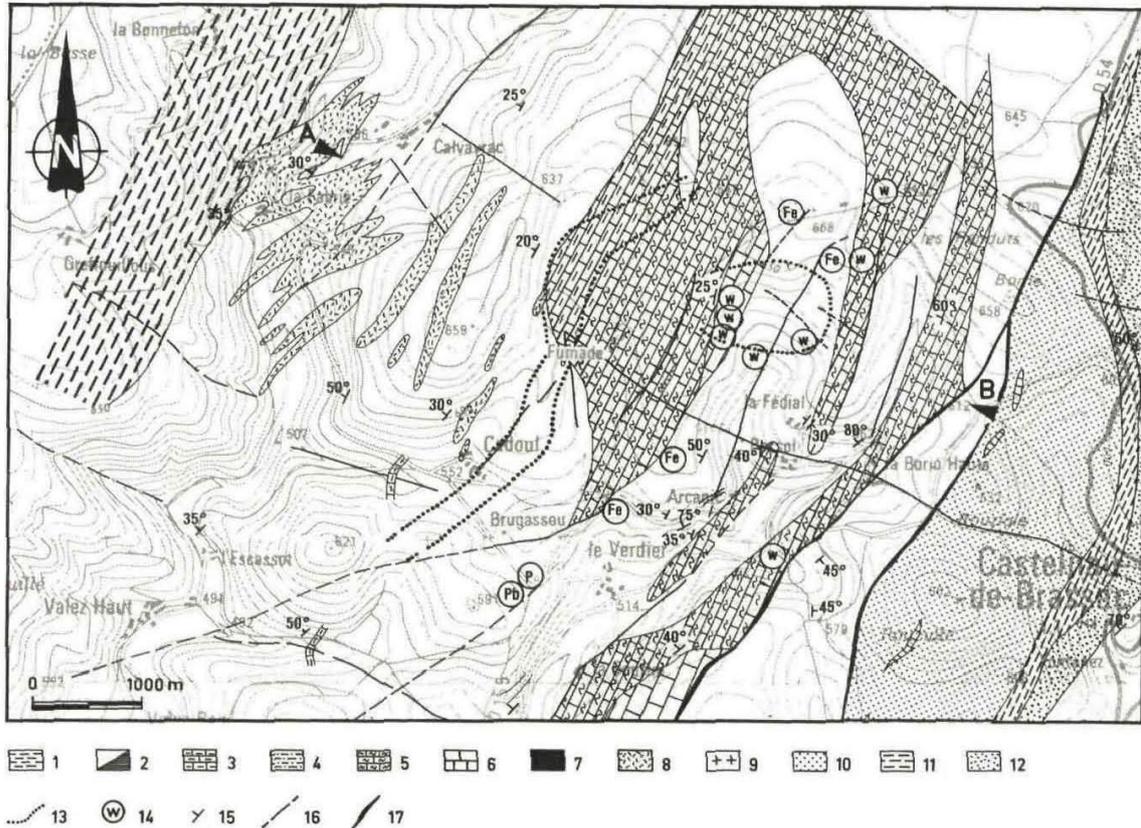


Fig. 3 - Carte géologique du secteur de Fumade

- 1 : Série verte schisto-gréseuse ( $K_{2,3}$ );
- 2 : Schistes noirs ( $K_{2b_3}$ ) - en traits serrés sur la fig. 4;
- 3 : Alternances calcaréo-argileuses supérieures ( $K_{2b_2}$ );
- 4 : Alternances calcaréo-silteuses  $K_{2b_1}$  - voir fig. 4;
- 5 : Alternances calcaréo-argileuses inférieures ( $K_{2b_1}$ );
- 6 : Dolomies ( $K_{2a}$ );
- 7 : Zones minéralisées (skarns stratiformes) - voir fig. 4;
- 8 : Aplite;
- 9 : Granite à biotite et quartz globulaire - voir fig. 4;
- 10 : Grès verts à lentilles carbonatées;
- 11 : Calcaires rubanés;

- 12 : Grès micacés sombres;
  - 13 : Tracé de l'enveloppe des minéralisations;
  - 14 : Indices de surface;
  - 15 : Pendage des couches avec valeur en degrés;
  - 16 : Failles ou accidents;
  - 17 : Contact anormal
- Ensembles 1 à 7 : Unité de Saint-Salvy  
Ensembles 10 à 12 : Unité de Cambounès-Lacaune.

Fig. 4 - Coupe géologique interprétative du gisement de Fumade-La Fédial. Position de la coupe (A-B) et légende : voir fig. 3.

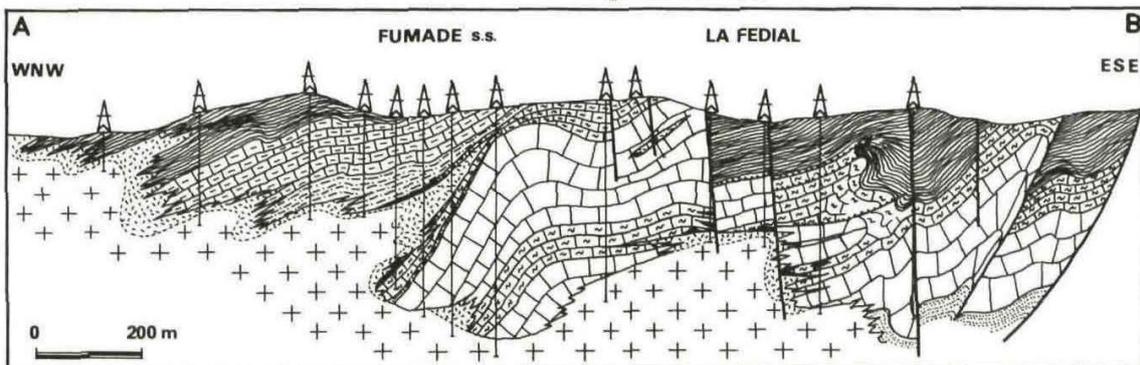


Figure V - Carte et coupe des skarns de Fumade-La Fédial, d'après P. Safa et al. (1987).

Les évaluations de réserves (BRGM et SNEA(P)) sont respectivement de 1 Mt @ 1 % WO<sub>3</sub> à 1,3 Mt @ 1,1 % WO<sub>3</sub> pour l'ensemble Fumade – La Fédial auquel il faut ajouter les skarns fissuraux superficiels opérables en carrière évalués à 0,36 Mt @ 0,43 % WO<sub>3</sub>. Il est fondamental de considérer que les extensions nord et sud des skarns de Fumade et la Fédial restent inconnues ce qui ne peut qu'augmenter le tonnage métal de cette zone qui est déjà de l'ordre de 10 000 à 14 000 t WO<sub>3</sub>.

#### *Ferrières (classé priorité 2 – voir corps du rapport)*

À 7 km au nord-ouest de Brassac, à proximité de la bordure du granite du Sidobre, un étroit panneau de terrains cambriens (2 500 x 500 m) correspondant au toit du granite a été préservé de l'érosion à la faveur de failles normales. On retrouve ainsi une géométrie similaire au gisement de Montredon. Dans ce panneau la série cambrienne des schistes noirs et de la série grésopélitique verte y sont bien représentées. Le sondage du Soulié a montré la présence de lames de granite de taille diverse traversant ces formations à l'emporte-pièce, donnant, au contact des roches carbonatées, des skarns à scheelite ; les teneurs varient de 0,4 à 1,09 % WO<sub>3</sub> avec des puissances de l'ordre du mètre. Au contact du granite lui-même (ou d'une lame particulièrement puissante) on observe 7,85 m à 1,09 % WO<sub>3</sub> (5 m de puissance environ), à une profondeur de 70 m par rapport à la surface. Le sondage du Soulié a traversé diverses lames de granite montrant de la scheelite au contact des roches carbonatées. Le sujet fut l'objet de travaux miniers dont les résultats ne sont pas connus et reste à réévaluer.

#### *Autres indices de skarns*

Un minimum de cinq indices de skarn situés dans le même contexte géologique que les skarns de Fumade – La Fedial et Ferrière (dolomies du K2a, schistes noirs à alternances carbonatées et grésocarbonatées du K2b intrudées de granites subaffleurants) mettent en évidence une vaste zone d'allongement SW – NE très prospective pour ce type de minéralisations. Les probabilités de découvertes de nouveaux gisements de type skarn à tungstène y est très forte. Ainsi, en partant du NE vers le SW sont connus :

#### *L'indice d'Espéausses (au nord de Fumade)*

Il s'agit au départ d'une anomalie alluvionnaire en scheelite à 7 km au nord-est de Fumade. Cette anomalie a été confirmée par géochimie tactique définissant une surface de 500 par 250 m. La prospection-marteau y découvrit des blocs de quartz riches en scheelite mais le peu de sondage réalisé n'a pas permis de découvrir des minéralisations de type skarns qui restent à localiser. Les dolomies de la série noire (K2a) sont ici largement représentées à l'affleurement et localement percées de pointements granitiques (granite du Pioch, microgranite de la Croix de Barthès...), et surtout elles sont intensément transformées, avec présence de minéraux de métamorphisme, micas, sulfures (et parfois scheelite près des contacts microgranites – dolomies) ce qui est un indicateur extrêmement favorable.

#### *L'indice du Teil (au nord de Fumade)*

C'est une anomalie géochimique étendue (2 500 m selon la direction NE-SW) entre Teil-Haut et la Ferrière ; elle s'enracine à proximité des micaschistes (grès du Marcory K1) sur des faciès d'alternances grésocarbonatées métamorphisés, localement minéralisés en scheelite à l'affleurement. Trois sondages carottés courts (180 m au total) effectués en 1981 sur les avals possibles n'ont pas trouvé de minéralisation.

### *L'anomalie géochimique de Guzanes (au sud de Fumade)*

Elle a seulement été définie au stade tactique, dans le cadre des travaux menés sur les indices d'antimoine de Payssibots (1982) : 4 points faiblement anomaux en tungstène, mais situés à proximité du pointement microgranitique de Guzanes qui perce ici les schistes noirs (K2b) à la faveur d'une charnière anticlinale. Cette structure anticlinale de direction N30°E à N40°E se poursuit en direction de Fumade-la Fabrié (4 km au NNE). Elle est localement jalonnée par des blocs de microgranite semblables à celui de Guzanes.

### *Les indices des Cadets (Tarn) associé au granite de la forêt de Montaud*

Les schistes du Cambrien sont ici recoupés par un granite à muscovite (granite de la forêt de Montaud) et intrudés par des lames granitiques de dimensions variables, parallèles à la schistosité majeure. Ce granite développe une auréole de métamorphisme de contact qui se traduit par l'apparition de trémolite dans les bancs carbonates massifs et de petits niveaux de cornéennes calciques au contact granite-calcaire. L'ancienne carrière des Cadets montre une partie du toit du granite recoupant les calcaires avec au contact une belle minéralisation en scheelite. D'autres indices sont connus à proximités et devraient faire l'objet d'une ré-investigation dans cette zone favorable.

## **C - Les minéralisations stratiformes à scheelite disséminée**

- **Modèle métallogénique**

Jusqu'à récemment, un type de minéralisation stratiforme à scheelite était distingué des skarns. Il s'agit de quartzites et/ou de gneiss à silicates calciques présentant des minéralisations disséminées en scheelite. Ces gîtes sans relation évidente avec les granitoïdes se présentent sous la forme de couches minéralisées de grande extension latérale, fréquemment de l'ordre du kilomètre. Ainsi la minéralisation était considérée comme d'origine volcano-sédimentaire ou liée à des fluides métamorphiques. L'exemple typique pour ces minéralisations est le gisement de Felbertal en Autriche. Des études récentes viennent de démontrer qu'il s'agit en fait de minéralisations de type skarn, génétiquement associées à un orthogneiss, l'ensemble ayant été par la suite métamorphisé et déformé. Le corollaire de ceci implique donc la présence de granites minéralisateurs situés à l'aplomb de ce type de minéralisations et ouvre de nouvelles perspectives en termes d'exploration.

- **Gisements et indices connus de ce type dans la zone d'étude**

### *Les niveaux du versant nord de la Montagne Noire : l'Auriole, l'Hom-Haut*

Ces minéralisations sont portées par un niveau de schistes à silicates calciques localisés à proximité du sommet de la série péliitique noire du Cambrien, au sein des alternances schisto-calcaires. Il s'agit d'un niveau constitué d'amandes à quartz-feldspaths-scheelite-fluorite alternant avec des lits (millimétriques à décimétriques) de schistes à biotite, de schistes à pyroxène et de marbres calcitique. À l'Hom-Haut, ces amandes sont de dimensions modestes (jusqu'à 20 cm de long et jusqu'à 10 cm d'épaisseur) et distribuées sur une puissance de 15 à 20 m alors qu'à Auriole elles font de 10 à 30 cm d'épaisseur et se développent beaucoup plus largement dans la schistosité principale sur une puissance de 6 à 15 m. Ces amandes contiennent de la scheelite très abondante en grains atteignant 2 à 3 mm disséminés dans l'ensemble de l'amande, mais aussi beaucoup de fluorine (jusqu'à 20-30 % en volume) ainsi qu'un peu de cassitérite et de sphalérite.

Les travaux miniers réalisés dans les années 1973-1980 ont démontré l'extension kilométrique et la puissance assez constante du niveau minéralisé. On peut en effet admettre des puissances de l'ordre de 10 à 15 m, avec une teneur moyenne comprise entre 0,15 et 0,20 %  $WO_3$  (soit au minimum, dans l'emprise des sondages, un potentiel géologique de 25 000 t  $WO_3$ ).

*Les niveaux du versant sud de la Montagne Noire : Olargues/Saint-Pons – La Gineste*

À la différence des niveaux précédents, il ne s'agit pas ici de schistes à silicates calciques mais de gneiss à silicates calciques. Ces niveaux de gneiss à silicates calciques à scheelite et fluorite sont localisés au sein des schistes noirs du Cambrien et reconnu par de nombreux indices sur 30 km. De façon générale les prospections sur ces indices ne sont pas allées au-delà de leur simple découverte, les teneurs appréciables aux affleurements ne dépassant pas quelques centaines de ppm W, dans des bancs certes nombreux, mais d'épaisseur centimétrique à décimétrique. La seule exception vraiment notable est celle de la région de Lamalou - le Pujol où a été défini le prospect de la Gineste. Les travaux miniers (sondages, rainurages, prospection) ont montré la présence d'un niveau de 7 m de puissance à teneur moyenne de 0,20 % reconnu sur environ 1 km d'extension NE-SW.



**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](http://www.brgm.fr)