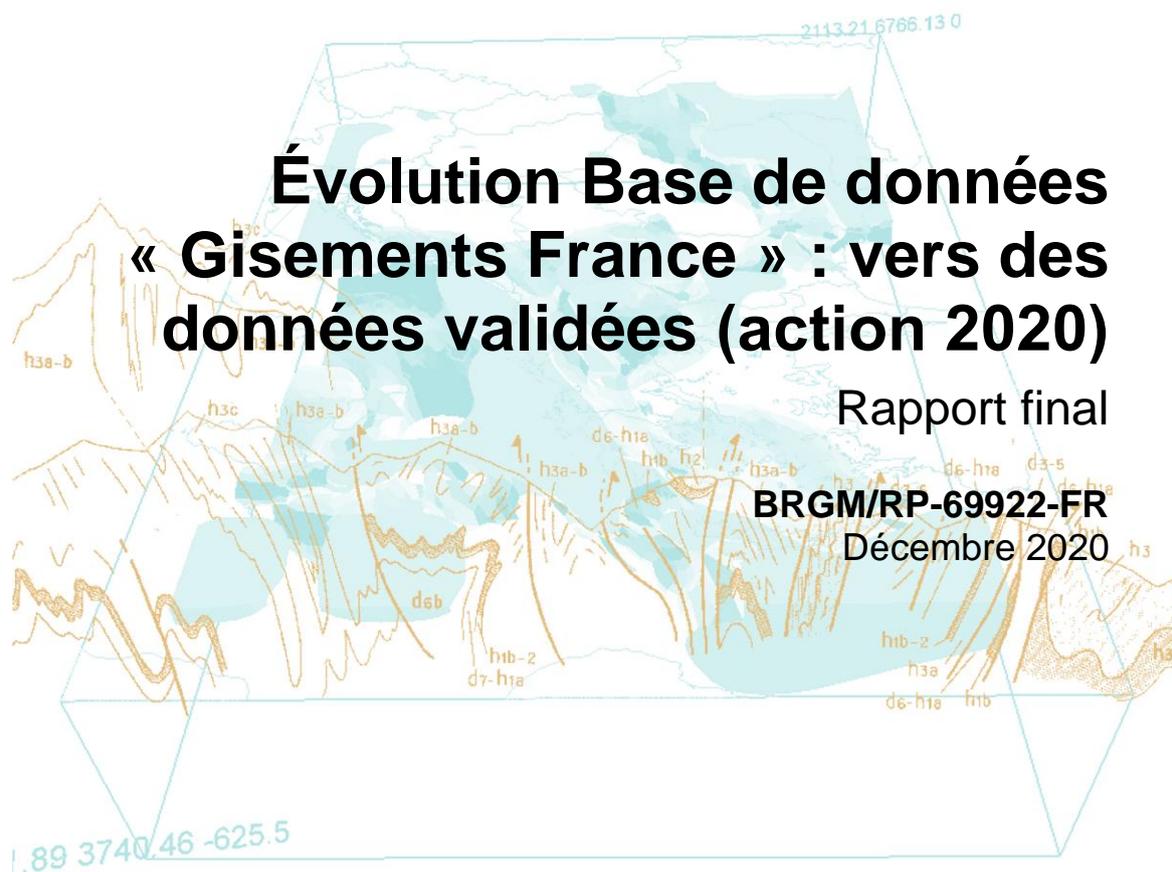


Document public



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Évolution Base de données « Gisements France » : vers des données validées (action 2020)

Rapport final

BRGM/RP-69922-FR
Décembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2019-2020
avec le soutien du Ministère de la Transition Écologique

B. Gourcerol, E. Fournier, E. Gloaguen

Vérificateur :

Nom : Isabelle DUHAMEL-ACHIN

Fonction : Responsable d'unité
DGR/GEM

Date : 02/11/2020

Signature :



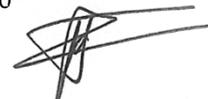
Approbateur :

Nom : Didier Lahondère

Fonction : Directeur-Adjoint à la
Direction des Géorressources (DGR)

Date : 05/11/2020

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Base de données, ProMine, Armada, Métallogénie, France, Gisement, Ressources minérales, Économie.

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

Gourcerol B., Fournier E., Gloaguen E. (2020) - Évolution Base de données « Gisements France » : vers des données validées (action 2020). Rapport final. BRGM/RP-69922-FR, 38 p., 14 fig., 5 tab.

Synthèse

La présente étude a été réalisée dans le cadre de la convention DEB-BRGM 2020 signée entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de la Transition Écologique (MTE) et le BRGM. Il s'agit de l'action 2.1, destinée à mettre à jour et à valider les données figurant dans la base de données (BDD) « Gisements, gîtes et indices » France.

Ce travail a été conduit pour chacune des substances contenues historiquement dans les gîtes minéraux ou gisements français. Pour chaque donnée économique (ressources/réserves/production historique), les références les plus complètes et pertinentes qui permettent de remonter aux « données sources » ont également été systématiquement ajoutées afin d'être conforme aux standards et à la directive européenne INSPIRE. De nombreux autres champs ont été contrôlés et vérifiés tels que les coordonnées, les statuts et les dates d'exploitation.

Ainsi, 335 enregistrements ont été mis à jour, soit près de 8 % des enregistrements de la base de données minières française et 54 nouveaux enregistrements ont été créés. Pour les données économiques, 152 enregistrements sur les 1 212 contenant des indications de production, de réserves et/ou de ressources ont été vérifiés au cours de cette action, soit près de 12,5 % de ces enregistrements.

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. TERMINOLOGIE UTILISÉE	8
2. Révision de la base de données.....	9
2.1. RÉALISATION D'UN CONTRÔLE	9
2.2. VALIDATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES	9
2.3. AJOUT DE RÉFÉRENCES	11
3. Mise à niveau de la base de données (action 2020).....	13
3.1. L'ANTIMOINE, LE TUNGSTÈNE ET L'ÉTAIN	13
3.2. CAS PARTICULIER DU BASSIN FERRIFÈRE DE LORRAINE	15
3.2.1. Source des données	15
3.2.2. Résultats.....	17
4. Statistiques de l'action 2020.....	25
5. Application de la méthode prédictive DBQ sur l'Indium.....	29
6. Perspectives	35
7. Bibliographie	37

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de l'onglet « Informations générales » du gisement de Beauvoir (France).	9
Figure 2 : Exemple de l'onglet « Économie » du gisement de Beauvoir (France) pour l'étain (ici entouré en rouge). Les références entourées en vert et bleu correspondent à celles de la Figure 3.....	11
Figure 3 : Exemple de l'onglet « Bibliographie » du gisement de Beauvoir (France). Les références entourées en vert et bleu correspondent à celles de la Figure 2.	12
Figure 4 : Positionnement des éléments étudiés dans le cadre de l'action 2.1 de la convention DEB 2020 sur l'évaluation de la criticité pour la France des substances ou groupes de substances étudiées par le BRGM dans le cadre des travaux pour le COMES (Comité des Métaux Stratégiques) (source : BRGM).	14
Figure 5 : Carte des bassins miniers et métallurgiques lorrains et luxembourgeois dressée par le 2e bureau de l'état-major de l'armée (Section économique) en 1917 (source : gallica.bnf.fr/ bibliothèque de France).	16
Figure 6 : Carte des bassins miniers et métallurgiques lorrains et luxembourgeois à l'échelle 1 : 80 000, dressée par le 2e bureau de l'état-major de l'armée (Section économique) en 1917 et vue de détail indiquant le nom et l'emplacement de diverses mines actives à cette période.	17
Figure 7 : Comparaison des données de la base ARMADA ProMine pour les mines de fer du bassin ferrifère lorrain entre le début (points jaunes à gauche) et la fin du projet (à droite). De plus, aucune des mines référencées dans la base antérieurement ne possédait de données de production.	18
Figure 8 : Comparaison du tonnage, en équivalent fer métal, produit par chaque mine du bassin ferrifère de Lorraine (seuls les noms des 21 principaux sites producteurs sont indiqués, De Wendel à gauche en ordonnées étant le plus grand producteur historique du bassin).	19
Figure 9 : Histogramme du nombre d'enregistrements mis à jour entre 2005 et 2020.	25
Figure 10 : Histogramme du nombre d'enregistrements créés entre 2005 et 2020.	25
Figure 11 : Répartition des enregistrements de gîtes ou mines sur fond géologique créés et/ou mis à jour dans le cadre du projet en 2020.	27
Figure 12 : Distribution des gisements contenant de l'In.	30
Figure 13 : Répartition cartographique du score pondéré de l'In calculé par l'approche DBQ.....	33
Figure 14 : Répartition cartographique des familles métallogéniques et de la densité de<noyau (kernel) calculée pour l'In.....	34

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des gisements pour les substances sélectionnées suivant la méthode proposée par Cassard et al. (2015).	10
Tableau 2 : Compilation des 171 mines et concessions de fer classées par production historique de fer métal cumulée (Mt Fe) en ordre décroissant et publiées annuellement dans les Statistiques de l'industrie minière entre 1890 et 1977.	23
Tableau 3 : Tableau du nombre d'indices, de gîtes ou de gisements mis à jour et/ou créés pour chaque substance.....	26
Tableau 4 : Calcul du ratio ER pour l'indium suivant les différentes familles métallogéniques.	30
Tableau 5 : Signatures multi-élémentaires pour les familles métallogéniques potentiellement enrichies en In. Notez que Sn, W et Sb (mis à jour cette année) sont indiqués en rouge.	32

1. Introduction

La présente étude a été réalisée dans le cadre de la convention DEB-BRGM 2020 signée entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de la Transition Écologique (MTE) et le BRGM. Il s'agit de l'action 2.1, destinée à mettre à jour et à valider les données figurant dans la base de données (BDD) « Gisements, gîtes et indices » France.

Cette base de données a été créée dans les années 2000 à la demande du Conseil Scientifique du BRGM. Son architecture réutilise celles des bases de données « Ressources Minérales » des « SIG Andes » et « SIG Afrique » développées au BRGM à partir de 1997 et dont la vocation était avant tout métallogénique. Il s'agissait d'évaluer le potentiel minéral d'un district minier, d'une région ou d'une ceinture minéralisée. Pour cela, une estimation du budget minéral (ou encore « dotation » ou potentiel [du gisement]), basée sur la somme des productions passées, des réserves et des ressources (n'incluant pas les réserves), était suffisante.

Cependant, la tendance actuelle est plutôt d'utiliser ces bases pour des applications liées à des analyses économiques variées (par exemple l'analyse de filières d'approvisionnement en métaux ou matériaux pour un secteur donné via le *Material System Analysis* (MSA) dans le cadre du *Material Flow Analysis* (MFA)) ou pour des méthodes de cartographies prédictives qui nécessitent des données validées. Ainsi, l'architecture de la BDD « Gisements, gîtes et indices » a été révisée dans le cadre du projet interne Armada, sur les fonds BRGM de dotation de service public, de manière à pouvoir certifier les données relatives aux productions cumulées passées, aux réserves et aux ressources. Une migration de cette base de données, à l'origine en format ACCESS vers une base POSTGRESQL a été réalisée à partir de 2015. Cette migration a également été l'opportunité d'améliorer la structure de la BDD en y incorporant les modifications liées au modèle de données INSPIRE pour les ressources minérales (MR) et en améliorant la partie relative aux déchets miniers afin de permettre l'harmonisation des données et l'interopérabilité du service selon la directive européenne.

Ce rapport synthétise uniquement l'action réalisée en 2020. Pour plus de détail sur l'historique, et la structure de la base de données, se référer au rapport BRGM/RP-69422-FR de décembre 2019 intitulé : *Évolution Base de données « Gisements France » : vers des données validées, Rapport final*. Par ailleurs, la section 2. « Révision de la base de données » est semblable à celle du rapport de 2019 puisque la mission reste la même.

Cette action 2020 a consisté à mettre à jour principalement les indices, gîtes ou gisements d'antimoine, de tungstène, d'étain et de fer, avec pour priorité tous les enregistrements ayant fait l'objet d'une exploitation depuis l'époque Gallo-Romaine, ce qui représente dans la BDD, toutes substances confondues, 1 212 enregistrements sur un total de 4 397.

1.1. TERMINOLOGIE UTILISÉE

Gisement : concentration naturelle de minéraux économiquement exploitables (notion économique associée à une temporalité comme les variations du cours des matières premières, ainsi qu'à des contraintes de faisabilité techniques).

Gîte : concentration naturelle de masses minérales contenant des métaux susceptibles d'être économiquement exploitables.

Indice ou prospect : minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tels que des tranchées, galeries de reconnaissance) et/ou par des observations indirectes (géochimie ; géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré.

Minéral/minéraux : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.

Minéralisation : désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large que le terme « minerai » qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable (techniquement et économiquement) de la minéralisation.

Minerai : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable.

Potentiel géologique : il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays.

Réserves : ce terme désigne l'ensemble des volumes de ressources accessibles et récupérables d'un gisement dont l'exploitabilité a été démontrée lors d'une étude de faisabilité et qui est à la fois rentable selon le marché actuel et techniquement extractible.

Ressources : il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet d'une première estimation, encore imprécise, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc.

Un **gisement** est donc un **gîte** caractérisé par un ensemble de **minéralisations** dans lequel a été identifié un ensemble de **minerais** composés de **minéraux** ou de roches dont certains présentent une concentration suffisante pour être exploités (extraits) de façon économique.

2. Révision de la base de données

2.1. RÉALISATION D'UN CONTRÔLE

Lors de la revue d'un gîte, le contrôleur indique son nom dans la case « contrôleur » et une date de contrôle est automatiquement incrémentée dans la base de données (Figure 1). Ces informations permettent de connaître le nom de la personne ayant modifié en dernier la fiche et la date de la dernière mise à jour, afin de garder une trace de la modification et du contexte (offre en cours, etc.) pour permettre la mise à niveau si nécessaire.

The screenshot displays the 'Description du gîte' window for 'FRA-00003 Beauvoir'. The 'Informations générales' tab is active, showing various fields:

- Identifiant:** FRA-00003
- Province:** Echassières, Ebreuil, dept 03, Massif central
- Statut:** B10 (Gisement en activité) and B20 (Gisement en développement - projet)
- Longitude:** 2,95311 (with sub-fields 2, 57, 11)
- Latitude:** 46,18131 (with sub-fields 46, 10, 53)
- Coordonnées contrôlées:** checked
- Auteur:** Deschamps Y.
- Date de création:** 14/09/2004
- Contrôleur:** Gloaguen E.
- Date de contrôle:** 28/09/2018
- Pays:** FRANCE (République française)
- Commentaires:** 20 000 t Sn + 5 000 t WO3 + 5 000 t Ta-Nb + 280 000 t Li2O @ 0,7 % (potentiel) ; env. 2% Ta2O5 dans la cassitérite (Béziat et al., 1985) ; Potentiel géologique pour les 300 m supérieurs du granite : 1 Mt Li @ 1,3 % Li2O, 150 000 t Sn @ 0,1 % Sn, 20 000 t Ta @ 100 g/t Ta (Cuney et al., 1992) ; Granite de Beauvoir : 299 +/- 9 (Rb/Sr); 312 +/- 8 Ma (Rb/Sr); 308 +/- 2 Ma
- URL and Source:** Includes links to mindat.org and brgm.fr.
- Nom de la base and Identifiant dans la base:** Lists 'GEODE' and 'SUJPROFT3 / 0645-1x-4005'.

 A sidebar on the right offers actions: 'Retour au menu principal', 'Vue avant impression pour ce gisement', 'Ajouter un nouveau gisement', 'Dupliquer ce gisement', and 'Supprimer ce gisement'.

Figure 1 : Exemple de l'onglet « Informations générales » du gisement de Beauvoir (France).

Par la suite, le statut du gîte peut être réévalué suivant son évolution et le contexte économique. Les coordonnées géographiques, les différents noms, les liens URL et les noms de BDD (incluant le numéro de la banque du sous-sol (BSS) associé) sont vérifiés et actualisés si nécessaire.

Une case « commentaires » est également disponible afin de pouvoir éventuellement compléter la description d'un gîte de toutes informations complémentaires pertinentes telles que les teneurs/tonnages du site, la/les compagnie(s) concernées par l'exploitation ou la détention du permis d'exploration, etc.

2.2. VALIDATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES

Cette veille sur la base de données permet de réévaluer le potentiel minier des gîtes en fonction des classes automatiquement calculées suivant la méthode proposée par Cassard *et al.* (2015). Ce calcul prend en compte, pour chaque substance, le contenu métal total présent dans le gisement (productions passées cumulées, plus réserves, plus ressources [n'incluant pas les réserves]) (Tableau 1).

Substance	Description	Valeurs de seuil de classes (en tonnes métriques)			
		Très grands gisements (classe A)	Grands gisements (classe B)	Gisements moyens (classe C)	Petits gisements (classe D)
Ag	Argent (métal)	10	2,5	500	100
Al	Aluminium (minerai de bauxite)	1,000,000,000	100,000,000	10,000,000	1,000,000
Au	Or (métal)	500	100	10	1
Be	Béryllium (BeO)	20	2	200	50
Bi	Bismuth (métal)	20	2	200	2
Brt	Barytine (BaSO ₄)	5,000,000	1,000,000	200	50
Cd	Cadmium (métal)	10	2	500	100
Co	Cobalt (métal)	500	50	2	200
Cr	Chrome (Cr ₂ O ₃)	25,000,000	5,000,000	1,000,000	200
Cu	Cuivre (métal)	10,000,000	1,000,000	100	10
Fe	Fer (métal)	1,000,000,000	100,000,000	10,000,000	1,000,000
Fl	Fluorine (CaF ₂)	5,000,000	1,000,000	200	50
Ga	Gallium (métal)	100	50	10	1
Ge	Germanium (métal)	500	100	20	5
Gr	Graphite (substance)	10,000,000	1,000,000	100	10
Hf	Hafnium (métal)	10	1	100	10
Hg	Mercure (métal)	50	5	500	100
In	Indium (métal)	500	100	25	5
Li	Lithium (Li ₂ O)	1,000,000	100	50	5
Mg	Magnésium, magnésite (MgCO ₃)	100,000,000	10,000,000	1,000,000	100
Mn	Manganèse (métal)	100,000,000	10,000,000	1,000,000	100
Mo	Molybdène (métal)	500	100	5	1
Nb	Niobium-columbium (Nb ₂ O ₅)	1,000,000	100	10	2
Ni	Nickel (métal)	2,000,000	500	20	2
PbZn	Plomb + Zinc (métal)	10,000,000	1,000,000	100	10
Pltd	Platinoïdes, groupe (métal)	1	100	10	1
Rb	Rubidium (Rb ₂ O)	1	100	10	1
Re	Rhénium (métal)	5	500	50	5
REE	Terres rares (RE ₂ O ₃)	1,000,000	100	10	1
Sb	Antimoine (métal)	100	25	2	1
Se	Sélénium (substance)	5	1	250	50
Sn	Étain (métal)	200	25	1	100
Ta	Tantale (Ta ₂ O ₅)	25	2	1	200
Ti	Titane, général (TiO ₂)	20,000,000	2,000,000	200	20
V	Vanadium (métal)	2,000,000	200	20	2
W	Tungstène (WO ₃)	200	50	5	500
Zr	Zirconium (ZrO ₂)	1,000,000	100	10	1

Tableau 1 : Classification des gisements pour les substances sélectionnées suivant la méthode proposée par Cassard et al. (2015).

À noter que toutes les évaluations de réserves historiques effectuées par le BRGM ne sont pas forcément normées selon un système CRIRSCO, impliquant qu'un(e) géologue qualifié(e) ait effectué l'évaluation des ressources/réserves selon des normes internationales (ex : canadienne – NI43-101 –, australienne – JORC –, ou européenne – PERC –). En toute rigueur, elles devraient donc être traitées en tant que « ressources indiquées ou mesurées ».

2.3. AJOUT DE RÉFÉRENCES

Chaque donnée numérique de l'onglet « Économie » (tonnage métal et teneur moyenne) des productions passées cumulées, de réserves et/ou ressources en fonction des substances identifiées (entourée en rouge sur la Figure 2) doivent, dans la mesure du possible, être étayées par des références (Figure 2). Le référencement des sources documentaires est un point fondamental d'évaluation de la qualité de la donnée, aspect essentiel pour les utilisateurs.

Ces références permettent en effet aux lecteurs de remonter aux données sources, de contrôler l'information et de disposer ainsi de données fiables. Par ailleurs, les dates d'évaluation des réserves/ressources ainsi que l'intervalle de temps correspondant à la production sont reportés lorsque ces informations sont disponibles. Le code de classification du calcul des réserves/ressources (ex : JORC, NI43-101, PERC) est également mis à jour lorsque cela est possible.

The screenshot shows the 'Description du gîte' window for 'Beauvoir' (France) with substance 'Sn' (Tin). The 'Économie' tab is selected. The 'Production passée' row is highlighted in red. The 'Références' column for 'Production', 'Réserves', and 'Ressources' contains dropdown menus with references like 'Deillie J.C. avec la collaboration de P. Carré' and 'Deschamps Y., Vedala P., Gentilhomme Ph.', which are circled in green and blue respectively. A summary bar at the bottom shows 'Production passée: 2 000', 'Réserves: 4 317', and 'Ressources: 60 006'.

Figure 2 : Exemple de l'onglet « Économie » du gisement de Beauvoir (France) pour l'étain (ici entouré en rouge). Les références entourées en vert et bleu correspondent à celles de la Figure 3.

Les références sont également reportées dans l'onglet « Bibliographie » et dans la section « Bibliographie économique » de la base de données « Gisements » France. Cette dernière est connectée à la BDD indépendante « BibCom » où sont stockées et gérées l'ensemble des références utilisées (ajout, retrait, mise à jour et corrections, ...) suivant leur type de support (ex : monographie, rapport, thèse, etc.).

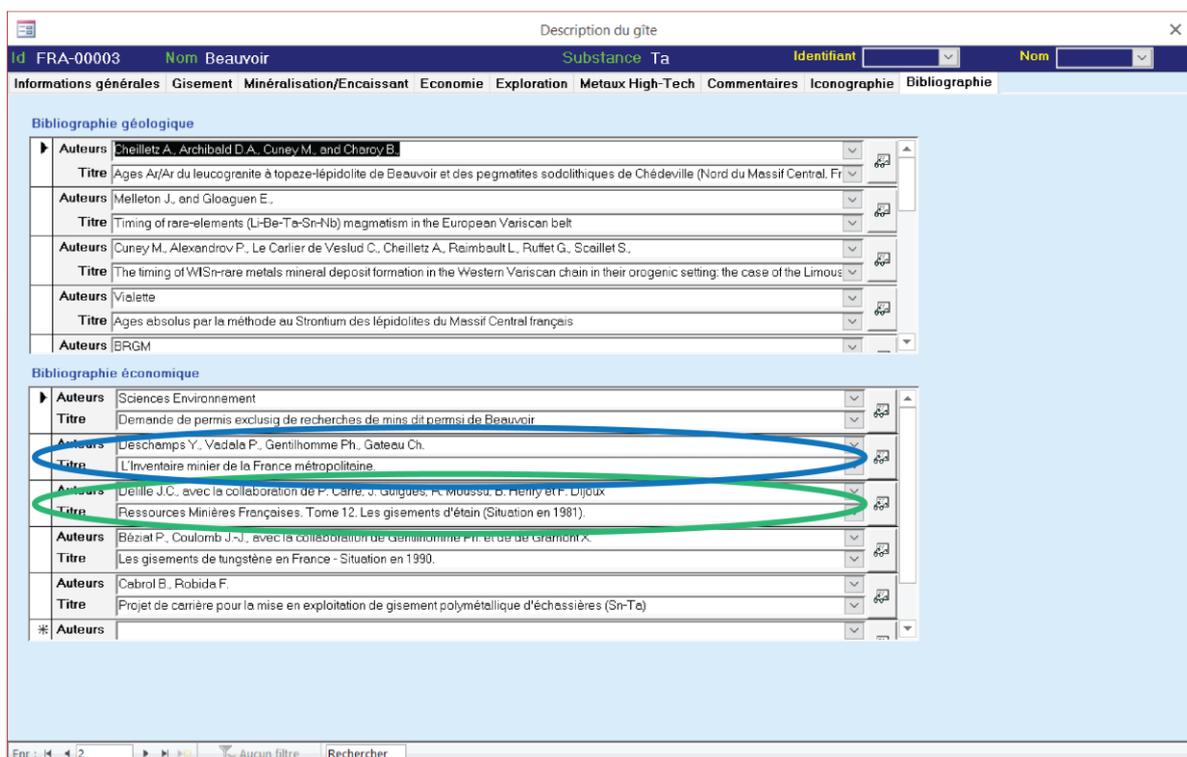


Figure 3 : Exemple de l'onglet « Bibliographie » du gisement de Beauvoir (France). Les références entourées en vert et bleu correspondent à celles de la Figure 2.

Parmi les documents de références figurent principalement :

- les travaux issus de l'Inventaire Minier de la France métropolitaine incluant :
 1. les ressources minières françaises par substances. Quatorze volumes rédigés entre 1978 et 1990, concernant les substances Pb-Zn, W, Sn, Sb, Mn, Cu, Au, fluorine, barytine, S, Hg, talc, amiante¹ et andalousite ;
 2. les synthèses régionales issues des travaux de l'inventaire incluant 15 rapports relatifs aux secteurs 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 ;
 3. la carte minière de la France métropolitaine, à l'échelle du 1/1 000 000 et sa notice explicative, situation 1993-1994 (ex : Béziat *et al.*, 1994).

Mais également :

- la synthèse de Deschamps *et al.* (2002) portant sur l'Inventaire Minier de la France métropolitaine qui couvre les principaux gîtes ou gisements découverts ou valorisés dans le cadre de cette opération ;
- les panoramas des marchés de 16 substances (ou groupe de substances) réalisés par le BRGM entre 2010 et 2015.

¹ L'amiante n'est plus considérée comme une substance depuis un décret officiel publié en 1997 (n° 96-1133) interdisant la fabrication, la transformation, la vente et l'importation de fibres d'amiante.

3. Mise à niveau de la base de données (action 2020)

3.1. L'ANTIMOINE, LE TUNGSTÈNE ET L'ÉTAIN

L'action 2020, a permis de mettre à jour au niveau des connaissances actuelles la BDD pour l'antimoine (Sb), le tungstène (W) et l'étain (Sn).

On soulignera que Sb, W et Sn font partie des substances étudiées par le BRGM pour leur criticité et plus particulièrement le W considéré à plus forts enjeux actuellement du fait de sa très forte importance stratégique pour l'industrie française et du haut niveau de risques sur les approvisionnements (Figure 4).

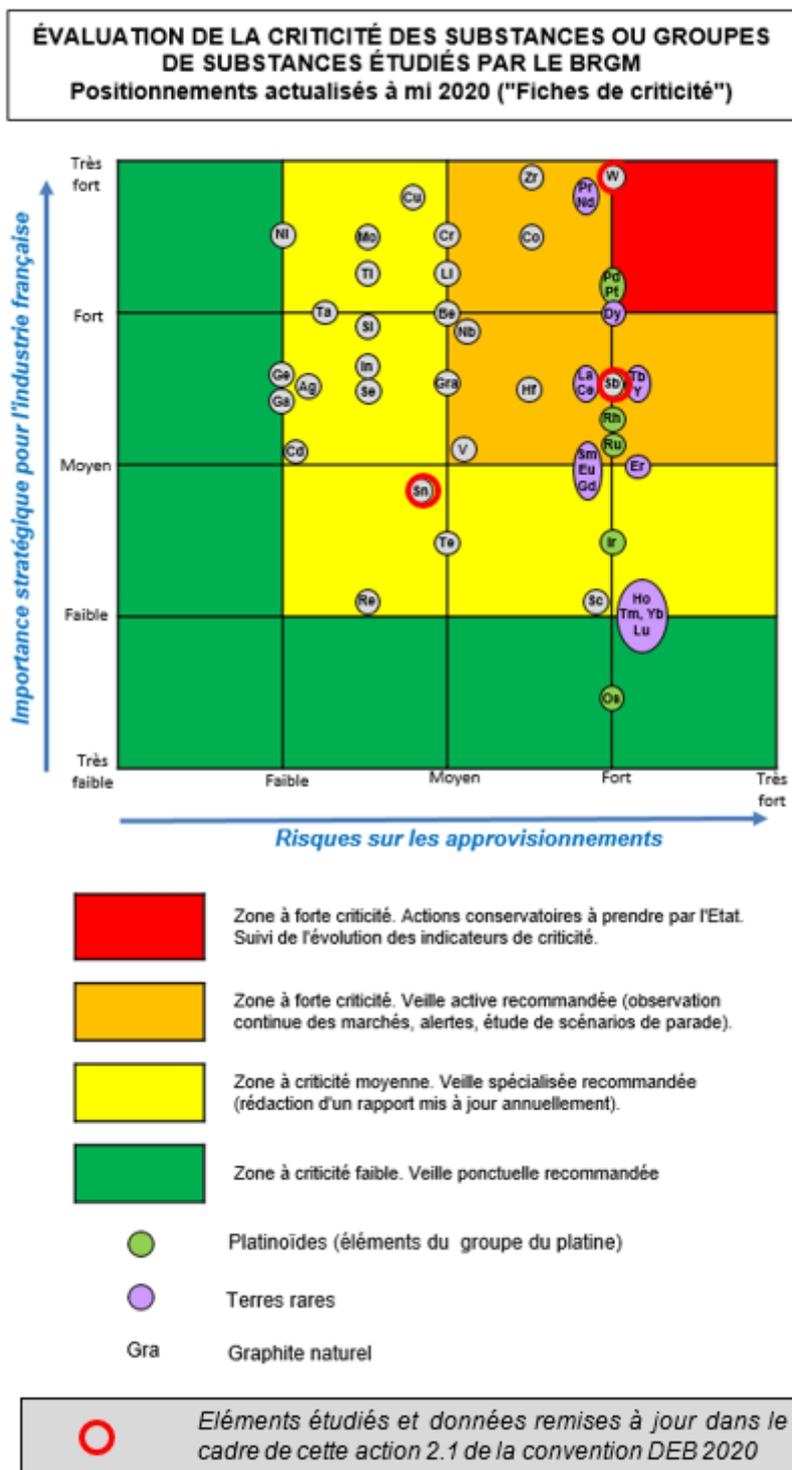


Figure 4 : Positionnement des éléments étudiés dans le cadre de l'action 2.1 de la convention DEB 2020 sur l'évaluation de la criticité pour la France des substances ou groupes de substances étudiées par le BRGM dans le cadre des travaux pour le COMES (Comité des Métaux Stratégiques) (source : BRGM).

3.2. CAS PARTICULIER DU BASSIN FERRIFÈRE DE LORRAINE

L'examen de la base donnée a fait apparaître l'absence quasi-complète des mines de fer du Bassin de Lorraine pourtant très largement à l'origine de l'essentiel de la production de fer en France métropolitaine (Figure 5). Ce manque de données est directement lié à l'absence de synthèse des productions des différentes mines du bassin ferrifère Lorrain. En effet, à la différence d'autres substances, les productions des différentes mines ne sont pas indiquées dans la carte des gîtes minéraux de la France au 1 : 500 000 (Méloux *et al.*, 1982), ni dans les synthèses plus récentes (Deschamps *et al.*, 2002 par exemple).

3.2.1. Source des données

Les productions annuelles des principales mines dans les périodes anciennes, ont été publiées dans la *Statistique de l'industrie minérale intégrée à la Direction générale des ponts et chaussées et des mines*. Ces statistiques annuelles ont été publiées de 1833 à 1977 et sont donc une source particulièrement précieuse des productions passées. L'ensemble des tomes disponibles présents à l'École des Mines de Paris ont fait l'objet d'un programme de numérisation et sont disponibles dans un visualiseur et sont téléchargeables sous la forme de fichiers au format « pdf » (sous <https://patrimoine.mines-paristech.fr/ark:/25652/b1FBCR>). Des données ont également été obtenues pour les mines de Moselle dans les volumes du Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse, ou encore les Rapports des Ingénieurs du Service des Mines de la Moselle qui étaient publiés annuellement entre 1920 et 1928 (via le catalogue disponible sous <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb34405381g>). Les productions annuelles des mines de fer du bassin de Lorraine ont été compilées dans une base Access MINES_FER_LORRAINE.mdb contenant actuellement 4 377 données de production annuelle pour 171 mines et concessions historiques.

Environ 108 mines ou concessions sur les 171 répertoriées ont fait l'objet d'une localisation géographique précise. Pour cela, le nom et l'emplacement des mines ou concessions sur les anciennes cartes et documents disponibles ont été dépouillés, retrouvés et compilés (cartes géologiques, cartes géographiques, rapports, etc.) voire reliés au moyen de la base de données du sous-sol (BSS). Toutes les mines exploitées ayant produit plus d'un million de tonnes de fer métal cumulé ont été localisées et répertoriées. Les principaux documents utilisés ont été :

- les points de la BSS, qui répertorient pratiquement l'intégralité des ouvrages souterrains débouchant à la surface. Dans 98 % des cas, la donnée minière sous forme de point dans la BD ARMADA PROMINE a été reliée, via les champs de la BD ProMine base et identifiant dans la base, à un point BSS dont il reprend les coordonnées WGS84 ;
- état-major des armées (1917). Carte des bassins miniers et métallurgiques lorrains et luxembourgeois à l'échelle 1 : 80 000, dressée par le 2e bureau de l'état-major de l'armée (Section économique). <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb407304817> (Figure 6) ;
- une liste des mines et différentes cartes anciennes de 1920 et de 1940 dont des extraits sont présentés par le site internet industrie.lu, dans la page Mines de fer en Lorraine (accessible sous : <https://www.industrie.lu/lorrainemines.html>) ;
- une liste de mines avec de nombreuses photographies présentées par le site internet Exxplore.fr, notamment la page consacrée aux mines de fer de Lorraine (<https://www.exxplore.fr/pages/Mines-Fer-Lorraine.php>) ;
- les mines de fer de Lorraine, site personnel documenté élaboré par François-Xavier Bibert, ancien ingénieur des mines et Carrières, dans le cadre du devoir de mémoire à partir de registres et données issus de l'état civil (accessible sous : <https://www.bibert.fr/Mines%20de%20Fer/Mines%20de%20Fer.htm>) ;
- le rapport BRGM RP-53277-FR de Vaute *et al.*, 2005.

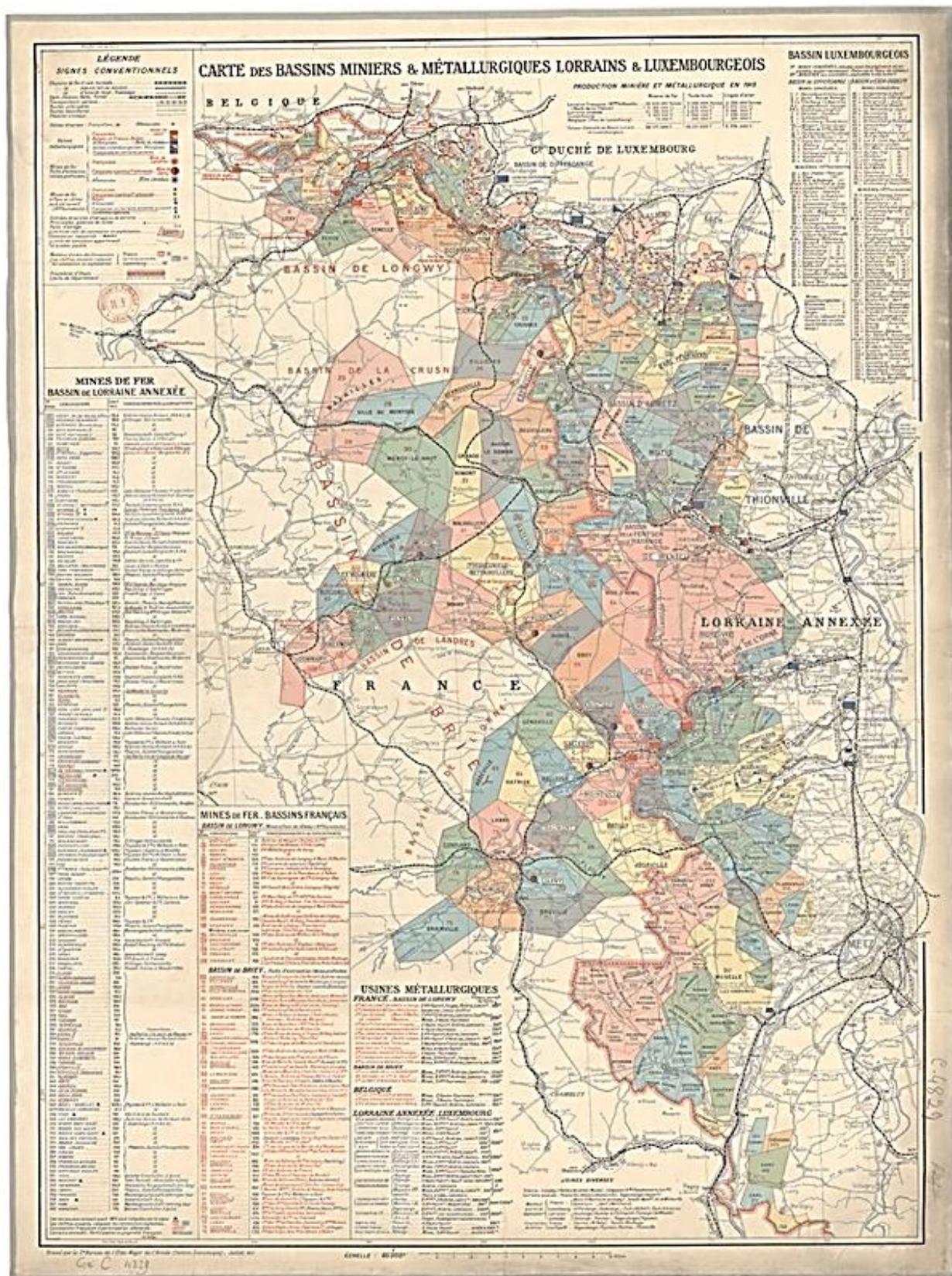


Figure 5 : Carte des bassins miniers et métallurgiques lorrains et luxembourgeois dressée par le 2^e bureau de l'état-major de l'armée (Section économique) en 1917 (source : gallica.bnf.fr/ bibliothèque de France).

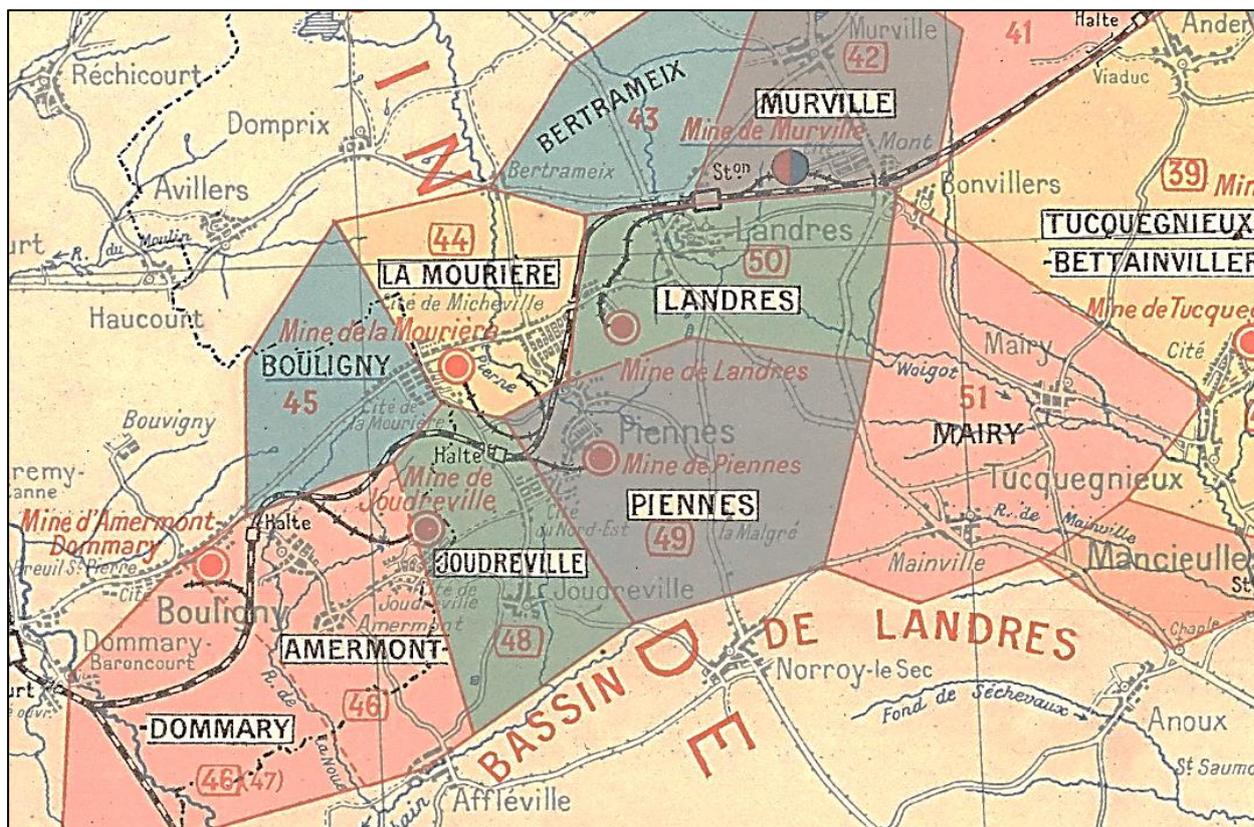


Figure 6 : Carte des bassins miniers et métallurgiques lorrains et luxembourgeois à l'échelle 1:80 000, dressée par le 2^e bureau de l'état-major de l'armée (Section économique) en 1917 et vue de détail indiquant le nom et l'emplacement de diverses mines actives à cette période.

3.2.2. Résultats

Lorsque des exploitations minières ont eut des dénominations différentes (changement de nom suivant les opérateurs/propriétaires) au cours du temps ou peuvent avoir produit à partir de plusieurs concessions distinctes successives au cours du temps, elles ont été regroupées sous le même identifiant sous ProMine (Tableau 2). Ces regroupements conduisent à l'identification de 82 sièges de production (Figure 7).

Le tonnage cumulé de minerai de fer sur ces 82 sièges est de près de 2 milliards de tonnes de minerai de fer (pour être plus précis 1 943 425 517 tonnes).

À partir d'une teneur moyenne de 30 % de fer métal dans ces minerais (Tincelin, 1975), le cumul de tonnage de fer métal est estimé à 668 588 060 t Fe. La mine qui a connu la plus importante production est la mine de Wendel (FRA-04456) avec plus de 100 Mt de minerai. Le graphique présenté en Figure 8 illustre le tonnage cumulé de la production de fer des 10 plus importantes mines du bassin ferrifère Lorrain. Le tonnage des 63 mines et/ou concession restant à reporter dans la base de données représente un cumul de 8,9 t de minerai de fer, ce qui montre qu'il s'agit de petites mines en comparaison des données déjà présentes et annexées dans la base.

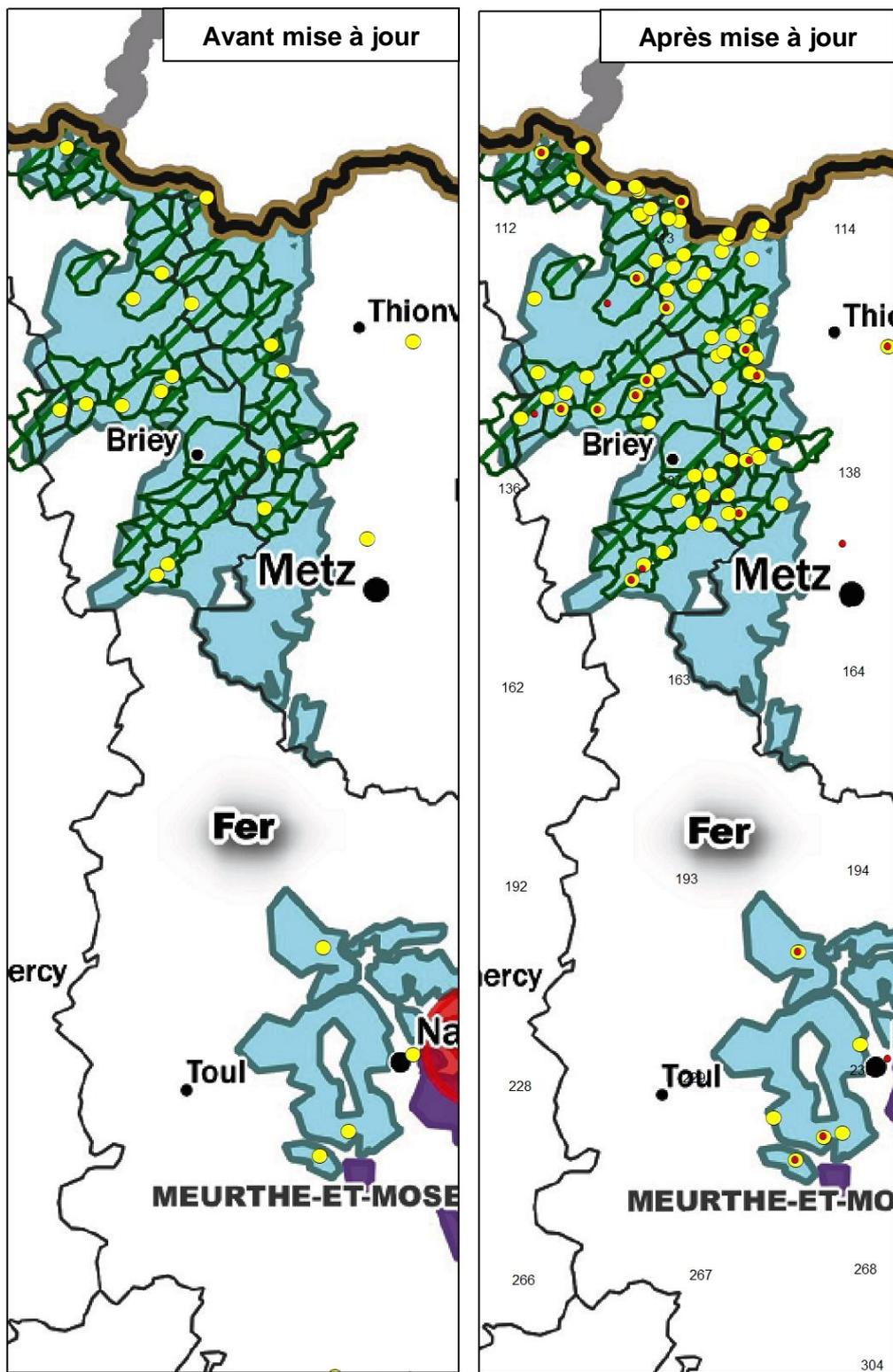


Figure 7 : Comparaison des données de la base ARMADA ProMine pour les mines de fer du bassin ferrifère lorrain entre le début (points jaunes à gauche) et la fin du projet (à droite). De plus, aucune des mines référencées dans la base antérieurement ne possédait de données de production.

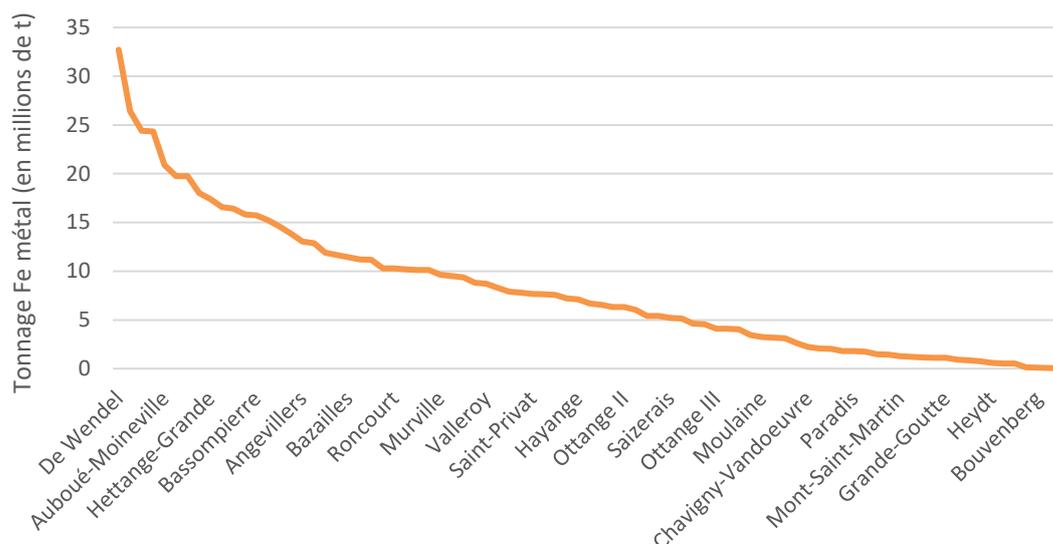


Figure 8 : Comparaison du tonnage, en équivalent fer métal, produit par chaque mine du bassin ferrifère de Lorraine (seuls les noms des 21 principaux sites producteurs sont indiqués, De Wendel à gauche en ordonnées étant le plus grand producteur historique du bassin).

N°	ID	Nom	Début	Fin	Minerai (t)	Fer (t)	Teneur moy.	Tonnage PROMINE
46	FRA-04456	De Wendel	1919	1971	109063688	32719106	30.00	32719110
49	FRA-04421	Amermont-Dommary	1908	1977	75362488	22608746	30.00	26430711
53	FRA-04421	Boulogny	1949	1977	12739877	3821963	30.00	26430711
5	FRA-01634	Montrouge	1919	1977	81343376	24403014	30.00	24403010
75	FRA-04457	Homécourt	1901	1971	72656640	21796992	30.00	24326622
102	FRA-04457	Fond-de-la-Noue	1971	1977	8432101	2529630.25	30.00	24326622
68	FRA-04458	Auboué-Moineville	1901	1971	69713680	20914104	30.00	20914100
77	FRA-04459	Joeuf	1901	1971	65836084	19750824	30.00	19750820
61	FRA-01635	Piennes	1908	1977	65827308	19748192	30.00	19748190
50	FRA-01628	Andernay-Chevillon	1911	1977	53162176	15948652	30.00	18019955
51	FRA-01628	Andernay-Chevillon III	1947	1969	2250887	675266.125	30.00	18019955
98	FRA-01628	Andernay-Chevillon II	1956	1970	4449450	1334835	30.00	18019955
127	FRA-01628	Andernay-Chevillon I	1964	1964	204000	61200	30.00	18019955
45	FRA-04431	Hettange-Grande	1919	1977	26243104	7882614.5	30.04	17405237
132	FRA-04431	Charles-Ferdinand	1920	1959	31742074	9522622	30.00	17405237
73	FRA-04463	Fleury	1937	1971	8911277	2673383	30.00	16578479
74	FRA-04463	Giraumont	1921	1977	41772344	12531703	30.00	16578479
78	FRA-04463	Labry	1957	1971	4577979	1373394	30.00	16578479
62	FRA-04460	Saint-Pierremont	1909	1977	54692860	16407858	30.00	16407860
67	FRA-01637	Tucquegnieux-Bettainvillers	1907	1977	52732948	15819885	30.00	15819890
42	FRA-01629	Bassompierre	1919	1977	46430504	13929151	30.00	15726562
110	FRA-01629	Bazonville	1926	1967	5991374	1797412.25	30.00	15726562
80	FRA-04461	Rombas	1922	1971	50776008	15232803	30.00	15232800
79	FRA-04462	Moutiers	1903	1977	48543980	14563194	30.00	14563190
71	FRA-01638	Bruville	1937	1970	4408777	1322633.125	30.00	13865096

N°	ID	Nom	Début	Fin	Minerai (t)	Fer (t)	Teneur moy.	Tonnage PROMINE
72	FRA-01638	Droitaumont	1910	1977	41808208	12542463	30.00	13865096
14	FRA-04424	Angevillers	1919	1977	20672392	6240258.5	30.19	13047698
134	FRA-04424	Röchling	1920	1959	22691462	6807438.5	30.00	13047698
57	FRA-04428	Gustave-Wiesner	1932	1971	24944164	7483249.5	30.00	12862788
66	FRA-04428	Tressange	1946	1971	16716089	5014826.5	30.00	12862788
107	FRA-04428	Bure	1972	1973	1215705	364711.5	30.00	12862788
55	FRA-01627	Errouville	1912	1973	36300660	10890198	30.00	11892687
108	FRA-01627	Serrouville	1973	1977	3341629	1002488.688	30.00	11892687
63	FRA-04450	Sancy	1908	1971	38872448	11661735	30.00	11661740
52	FRA-04464	Bazailles	1932	1977	38068952	11420685	30.00	11420690
58	FRA-04422	Joudreville	1908	1977	37342616	11202785	30.00	11202790
59	FRA-04465	Landres	1907	1971	37207108	11162132	30.00	11162130
2	FRA-04427	Burbach	1919	1973	23680332	7104099.5	30.00	10298592
31	FRA-01641	Roncourt	1919	1970	20079088	6021892.5	29.99	10277550
89	FRA-01641	Sainte-Monique	1958	1971	4920844	1476253.25	30.00	10277550
90	FRA-01641	Sainte-Sabine	1958	1971	9258567	2777570	30.00	10277550
91	FRA-01650	Maron-Val-de-Fer	1890	1968	34020364	10206109	30.00	10206110
85	FRA-04466	Godbrange	1891	1977	33800472	10140142	30.00	10140140
40	FRA-04425	Aumetz	1919	1971	25439824	7631947	30.00	10112786
64	FRA-04425	Thomas-Byrne I	1958	1971	4684521	1405356.25	30.00	10112786
65	FRA-04425	Thomas-Byrne II	1960	1971	3584944	1075483.25	30.00	10112786
111	FRA-04470	Bertrameix	1934	1967	9405846	2821753.75	30.00	9632485
118	FRA-04470	Malavillers	1934	1966	4586968	1376090.375	30.00	9632485
121	FRA-04470	Murville	1909	1966	18115466	5434640	30.00	9632485
32	FRA-04430	Sainte-Barbe	1908	1971	18056932	5417079.5	30.00	9517560
133	FRA-04430	Moltke	1920	1959	13668265	4100479.5	30.00	9517560
76	FRA-01639	Jarny	1909	1977	31250010	9375003	30.00	9375003
158	FRA-01641	Jacobus	1922	1925	1562094	468628.1875	30.00	8801297
122	FRA-04467	Valleroy	1910	1967	29036050	8710815	30.00	8710815
19	FRA-04438	Ferdinand	1959	1977	27607544	8282263	30.00	8282263
88	FRA-04454	Tiercelet	1894	1971	26356020	7906805.5	30.00	7906806
23	FRA-01640	Moyeuvre	1919	1977	25965540	7789661.5	30.00	7789662
81	FRA-04468	Saint-Privat	1921	1971	25618208	7685462	30.00	7685462
120	FRA-04469	La Mourière	1910	1967	25422872	7626861.5	30.00	7626862
54	FRA-04429	Conroy	1968	1971	2177295	653188.5	30.00	7578990
70	FRA-04429	Bois-d'Avril	1934	1971	23086008	6925802	30.00	7578990
3	FRA-04436	Kraemer	1919	1977	24010288	7203086.5	30.00	7203087
22	FRA-01630	Hayange	1920	1977	23738380	7121514	30.00	7121514
7	FRA-04449	Saint-Michel	1920	1971	22281562	6684468.5	30.00	6684469
29	FRA-04443	Sainte-Marie	1919	1971	21852444	6555733	30.00	6555733
60	FRA-01633	Mairy	1951	1977	21070224	6321067	30.00	6321067
8	FRA-04432	Ottange II	1919	1969	21067000	6320099.5	30.00	6320100
13	FRA-04444	Rochonvillers	1919	1977	13717093	4115128	30.00	6037966

N°	ID	Nom	Début	Fin	Minerai (t)	Fer (t)	Teneur moy.	Tonnage PROMINE
48	FRA-04444	Adelheid	1959	1977	6409462	1922838.625	30.00	6037966
56	FRA-04472	François	1946	1971	18070880	5421264.5	30.00	5421265
117	FRA-01753	Hussigny	1890	1967	18038708	5411612	30.00	5411612
92	FRA-00677	Saizerais	1957	1977	17367978	5210393.5	30.00	5210394
17	FRA-04434	Ottange I	1919	1969	17104540	5131362	30.00	5131362
95	FRA-04455	Micheville	1890	1971	15366129	4609838.5	30.00	4609839
26	FRA-04358	Orne	1919	1977	15135296	4554491.5	30.09	4554492
18	FRA-04433	Ottange III	1919	1971	13717454	4115236.25	30.00	4115236
96	FRA-04474	Saulnes-Sud	1928	1977	2097607	629282.125	30.00	4094780
142	FRA-04474	Saulnes-Nord	1890	1947	11551655	3465496.5	30.00	4094780
82	FRA-04453	Bréhain	1908	1977	13425989	4027796.75	30.00	4027797
101	FRA-04475	Domprix	1934	1971	11521139	3456341.75	30.00	3456342
126	FRA-04476	Moulaine	1890	1964	10812224	3243667.25	30.00	3243667
16	FRA-04445	Rédange	1919	1970	10585645	3175693.5	30.00	3175694
43	FRA-01632	La Paix	1919	1977	10405465	3121639.5	30.00	3121640
41	FRA-01754	Ida-Amélie	1920	1972	8744296	2623288.75	30.00	2623289
154	FRA-04477	Chavigny-Vandoeuvre	1890	1931	7475068	2242520.5	30.00	2242521
25	FRA-04440	Haut-Pont	1919	1931	2953112	885933.625	30.00	2061107
47	FRA-04440	Carl Lueg	1920	1923	844607	257069.4063	30.44	2061107
12	FRA-04437	Langenberg	1919	1963	6802699	2040809.75	30.00	2040810
15	FRA-04441	Fontoy	1919	1951	6013459	1804037.75	30.00	1804038
106	FRA-04478	Paradis	1972	1977	6009752	1802925.625	30.00	1802926
94	FRA-04479	Crusnes	1920	1970	5781589	1734476.75	30.00	1734477
151	FRA-04480	Ludres	1890	1932	4970805	1491241.5	30.00	1491242
30	FRA-04423	Marange-Pierrevillers	1919	1928	4840617	1459617	30.15	1459617
86	FRA-04481	Mont-Saint-Martin	1908	1971	4232803	1269840.875	30.00	1269841
139	FRA-04482	Marbache	1890	1958	4005984	1201795.25	30.00	1201795
119	FRA-04483	Maxéville	1908	1966	3806201	1141860.25	30.00	1141860
9	FRA-04439	Havange	1919	1928	3724792	1131017.875	30.36	1131018
115	FRA-04484	Grande-Goutte	1943	1966	3740348	1122104.375	30.00	1122104
33	FRA-04435	Aachen	1920	1963	3097410	929223	30.00	929223
27	FRA-04471	Pauline	1920	1928	2885489	873097.75	30.26	873098
97	FRA-04452	Villerupt	1908	1971	2564082	769224.625	30.00	769225
4	FRA-04446	Heydt	1919	1966	1964704	589411.1875	30.00	589411
1	FRA-04442	Victor	1919	1928	1789742	536922.625	30.00	536923
10	FRA-04426	Boulanges	1920	1928	1726500	517950	30.00	517950
34	FRA-04451	Butte	1921	1971	430145	129043.5	30.00	129044
35	FRA-04448	Bouvenberg	1921	1928	340316	102094.7969	30.00	102095
38	FRA-04447	Huit-Jours	1921	1928	256132	76839.60156	30.00	76840
44	FRA-04473	Rosselange	1922	1926	50039	15011.7002	30.00	15012
6		Enclave-Montrouge	1928	1928	761000	228300	30.00	
11	FRA-04425	Aumetz-Ida-Amélie	1928	1928	694846	208453.7969	30.00	
20	FRA-04468	Ida	1920	1928	4224450	1276300	30.21	

N°	ID	Nom	Début	Fin	Minerai (t)	Fer (t)	Teneur moy.	Tonnage PROMINE
21	FRA-04455	Lorraine	1919	1940	2825520	847656	30.00	
24		Franchepré	1920	1928	1648998	504880.5625	30.62	
28		Saint-Paul	1919	1928	1076501	323150.1875	30.02	
36		Houtte	1921	1949	1067411	320223.3125	30.00	
37		Nocke	1921	1950	420035	126010.5	30.00	
39		Adlergrund	1928	1928	25037	7511.100098	30.00	
69		Batilly-Jouaville	1965	1971	2893161	867948.3125	30.00	
83		Coulmy	1913	1970	1108468	332540.4063	30.00	
84		Fillières	1967	1971	2071171	621351.3125	30.00	
87		Romain	1910	1970	1303147	390944.0938	30.00	
93		Conflans	1965	1971	1289985	386995.5	30.00	
99		Verneville	1970	1971	782799	234839.7031	30.00	
100		Brainville	1969	1971	1479323	443796.9063	30.00	
103		Xivry-Circourt	1971	1971	275675	82702.5	30.00	
104		Rubaic-Moineville	1971	1971	30000	9000	30.00	
105		Longwy	1963	1977	2425664	727699.1875	30.00	
109		Preutin-Higny	1975	1977	524459	157337.7031	30.00	
112		Boudonville	1896	1966	1392914	417874.1875	30.00	
113		Cinq-Tranchées	1963	1966	174384	52315.19922	30.00	
114		Fond-de-Monvaux	1938	1966	2267125	680137.5	30.00	
116		Gros-Charme	1961	1965	73308	21992.40039	30.00	
123		Frédéric-Auguste	1969	1969	93544	28063.19922	30.00	
124		Garde-Schutze	1965	1966	112899	33869.69922	30.00	
125		Herserange	1934	1961	2222053	666615.875	30.00	
128		Ville-au-Montois	1937	1964	2313939	694181.6875	30.00	
129		Hatrive	1957	1960	70422	21126.59961	30.00	
130		Bois-du-Four	1908	1964	2051706	615511.8125	30.00	
131		Marie-Chanois	1934	1964	1279505	383851.5	30.00	
135		Sancy I	1935	1958	984181	295254.3125	30.00	
136		Alexandre-Thielen	1954	1957	519128	155738.4063	30.00	
137		Gustave-Coupette	1957	1957	121000	36300	30.00	
138		Jacobi	1957	1957	597349	179204.7031	30.00	
140		Pompey	1890	1956	376485	112945.5	30.00	
141		Sancy II	1935	1949	485924	145777.2031	30.00	
143		Champigneulles	1908	1945	588002	176400.5938	30.00	
144		Longlaville	1890	1944	1733892	520167.5938	30.00	
145		Warnimont	1908	1943	529782	158934.5938	30.00	
146		Fontaine-des-Roches	1890	1938	1529167	458750.0938	30.00	
147		Vieux-Château	1908	1937	957995	287398.5	30.00	
148		Amance	1908	1935	618146	185443.7969	30.00	
149		Millery	1927	1934	8576	2572.800049	30.00	
150		Custines	1901	1932	1125269	337580.6875	30.00	
152		Sexey-aux-Forges	1908	1932	1407120	422136	30.00	

N°	ID	Nom	Début	Fin	Minerai (t)	Fer (t)	Teneur moy.	Tonnage PROMINE
153		Bouxières-aux-Dames	1890	1931	2452713	735813.875	30.00	
155		Pulventeux	1908	1931	1575220	472566	30.00	
156		Frouard	1908	1929	224000	67200	30.00	
157		Saint-Jean	1908	1928	624339	187301.7031	30.00	
159		Pierrevillers						
160	FRA-01632	Friede	1922	1923	90560	27168	30.00	
161		Moyeuve-la-Grande	1919	1922	454310	136293	30.00	
162		Faulx	1908	1921	405688	121706.3984	30.00	
163		Amalienzeche	1919	1921	114557	34367.10156	30.00	
164		Sterkrade	1919	1920	15519	4655.700195	30.00	
165		Auguste	1919	1919	224369	67310.70313	30.00	
166		Grenze	1919	1919	147323	44196.89844	30.00	
167		Sainte-Odile	1919	1919	332103	99630.89844	30.00	
168		Avant-Garde	1908	1913	158468	47540.39844	30.00	
169		Croisette-Liverdun	1912	1912	1500	450	30.00	
170		Chavenois	1899	1910	1471194	441358.1875	30.00	
171		Liverdun	1909	1909	3333	999.9000244	30.00	

Tableau 2 : Compilation des 171 mines et concessions de fer classées par production historique de fer métal cumulée (Mt Fe) en ordre décroissant et publiées annuellement dans les Statistiques de l'industrie minière entre 1890 et 1977.

Lorsqu'un même numéro Promine est sur plusieurs lignes cela signifie que la production d'une mine a été réalisée à partir de plusieurs concessions qui portent alors le même identifiant. À noter que plusieurs mines ont changé de nom au cours du temps. Les mines ou concessions sans numéro de tonnage produit inférieur à 1 Mt métal de fer feront l'objet d'une localisation et d'une saisie en base de donnée ultérieurement.

4. Statistiques de l'action 2020

Fin 2012 et fin 2019 la BDD « Gisements, gîtes et indices » recensait réciproquement 4 297 et 4 334 indices, gîtes ou gisements en France métropolitaine. En fin d'année 2020, après cette dernière action de mise à jour qui consistait également à éliminer les doublons éventuels rencontrés lors de la vérification, un total de 4 397 enregistrements a désormais été référencé.

À travers cette action d'Appui aux Politiques Publiques (2020), 335 enregistrements ont été mis à jour (soit près de 8 % des enregistrements) et 54 nouveaux enregistrements additionnels ont été créés, certains comprenant plusieurs substances (Figure 9 et Figure 10).

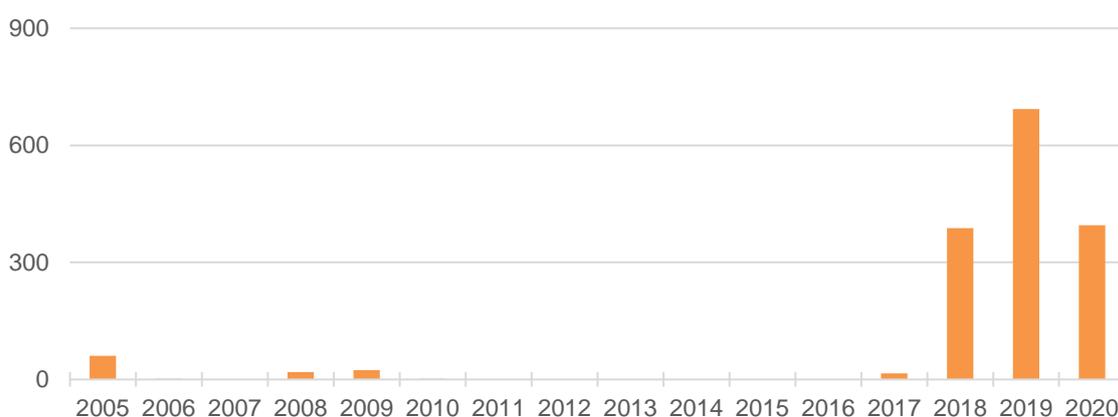


Figure 9 : Histogramme du nombre d'enregistrements mis à jour entre 2005 et 2020.

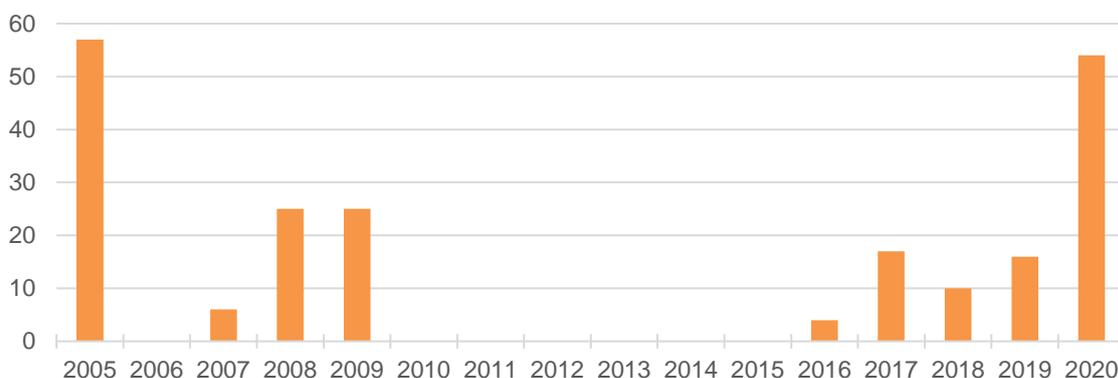


Figure 10 : Histogramme du nombre d'enregistrements créés entre 2005 et 2020.

Pour les données économiques, sur les 1 212 enregistrements contenant des indications de production, de réserves et/ou de ressources, 152 (soit près de 12,5 % des enregistrements) ont été vérifiés au cours de cette action. Il est important de noter que de nombreux enregistrements comprennent plusieurs substances associées (sous-produits ou co-produits) et que toutes les substances ont été vérifiées pour chaque occurrence et étayées par des références bibliographiques.

Les substances vérifiées ont été principalement Sb, W, Sn et Fe ; mais sont parfois apparues en substances secondaires As, Pb, Mo, Au, Gr, KIn, Li, U, Be, Ni, Brt, Coal, Cu, FI et Py (Tableau 3).

Substance	Nombre d'enregistrements mis à jour	Nombre d'enregistrements créés
Antimoine (Sb)	127	-
Tungstène (W)	92	-
Étain (Sn)	56	-
Fer (Fe)	28	54
<i>Arsenic (As)</i>	6	-
<i>Plomb (Pb)</i>	6	-
<i>Molybdène (Mo)</i>	3	-
<i>Or (Au)</i>	2	-
<i>Graphite (Gr)</i>	2	-
<i>Kaolin (Kln)</i>	2	-
<i>Lithium (Li)</i>	2	-
<i>Uranium (U)</i>	2	-
<i>Béryllium (Be)</i>	1	-
<i>Bismuth (Bi)</i>	1	-
<i>Barytine (Brt)</i>	1	-
<i>Charbon (Coal)</i>	1	-
<i>Cuivre (Cu)</i>	1	-
<i>Fluorine (Fl)</i>	1	-
<i>Pyrite (Py)</i>	1	-
(sous total)	(335)	(54)
Total général	389	

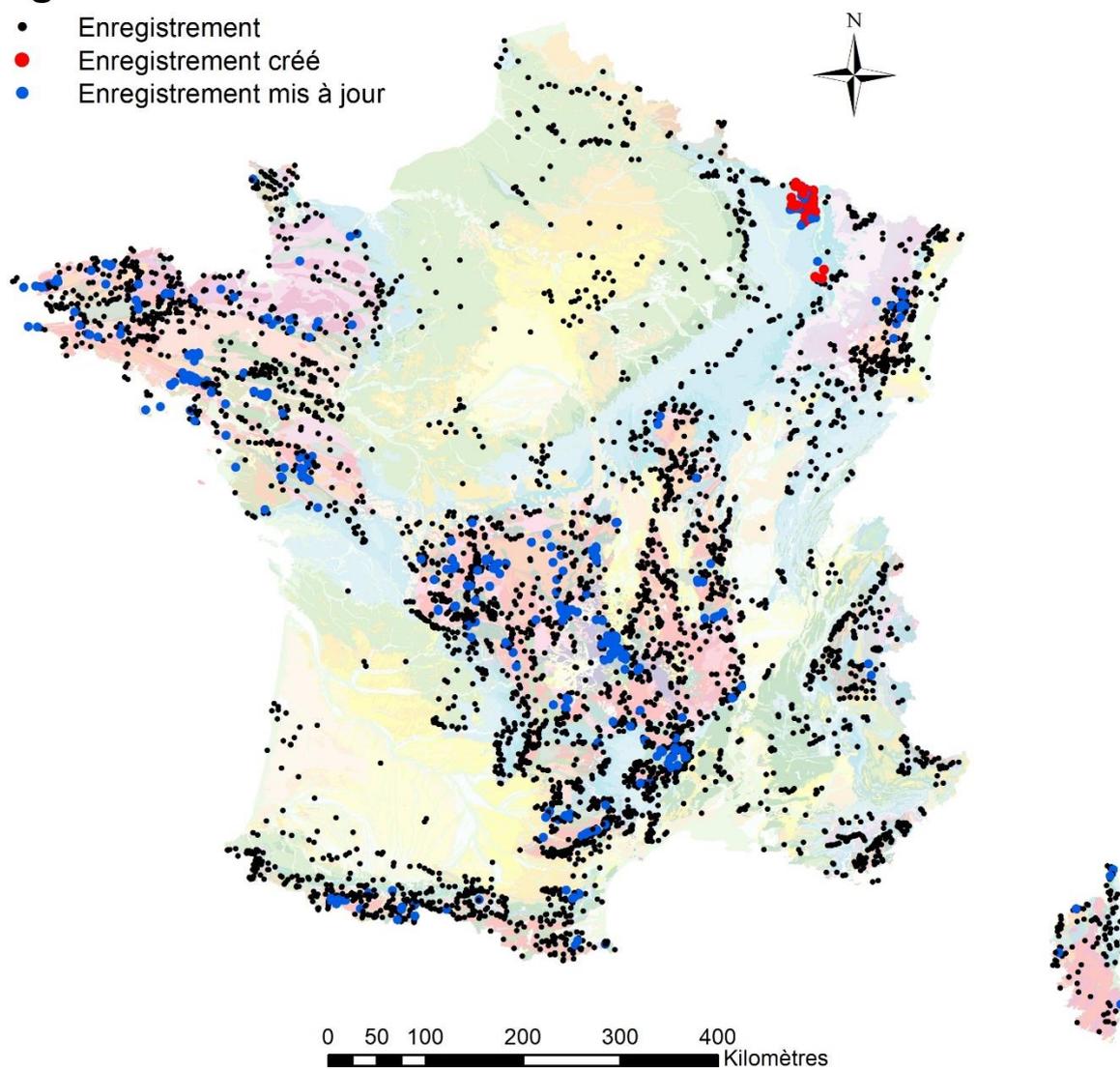
Tableau 3 : Tableau du nombre d'indices, de gîtes ou de gisements mis à jour et/ou créés pour chaque substance.

La carte de la Figure 11 présente la localisation des enregistrements créés et/ou mis à jour dans le cadre de l'action poursuivie en 2020.

Quant aux données bibliographiques, aucun historique n'est disponible sur ces données mais un total de 8 806 références de documents est dorénavant associé aux gîtes dans la base de données afin d'étayer les informations économiques et géologiques, soit 9 références de plus apportées par rapport à l'année dernière.

Légende

- Enregistrement
- Enregistrement créé
- Enregistrement mis à jour



Source des données:
Base de données ARMADA / ProMine au 16/09/2020
Carte géologique de la France au 1:1 000 000

Figure 11 : Répartition des enregistrements de gîtes ou mines sur fond géologique créés et/ou mis à jour dans le cadre du projet en 2020.

5. Application de la méthode prédictive DBQ sur l'Indium

Une application potentielle réalisable grâce à la mise à jour de base de données est la méthode prédictive *Database Queering* (DBQ) développée par le BRGM (Billa *et al.*, 2016 ; Bertrand *et al.*, 2017). Cette méthode permet d'établir la susceptibilité de rencontrer un métal en sous-produit d'une substance principale dans un gîte où il ne serait pas initialement identifié/analysé, grâce aux associations polymétalliques communément rencontrées à travers les divers modèles de gîtes métallogéniques favorables à sa présence. Cette méthode s'applique relativement bien aux métaux dits critiques, présents de façon subordonnée en relativement faibles concentrations par rapport à la substance principale, difficilement identifiables et/ou souvent non décrits ou rapportés en dehors de gisements ayant fait l'objet d'études plus approfondies (géochimiques notamment). L'indium (In) a été sélectionné pour servir de cas d'étude car ce métal présente une criticité moyenne pour la France (Figure 4) et est relativement bien associé aux minéralisations contenant du W et de Sn mis à jour cette année.

La méthode DBQ et les différentes étapes du processus ont été explicitées dans le rapport BRGM de Billa *et al.* (2016). Elle s'articule suivant quatre étapes successives de traitement des données.

La première étape correspond à la mise en forme de la base de données avec un codage binaire des informations pour indiquer la présence (= 1) ou l'absence (= 0) des différentes commodités/métaux suivant les gîtes de la base de données France incluant les 3 667 gîtes.

La deuxième étape consiste au calcul d'un ratio d'enrichissement (ER) pour chacune des 17 familles métallogéniques (Tableau 4) identifiées à l'échelle européenne au travers du projet ProMine (Bertrand *et al.*, 2017).

$$ER = \frac{\text{fréquence de présence de l'In dans une famille métallogénique donnée}}{\text{fréquence de présence de l'In dans toute la base de données}}$$

Une famille métallogénique est un type de gîtes pour lequel il existe une association polymétallique communément rencontrée et généralement associée à un modèle métallogénique. Une substance peut apparaître dans le cortège élémentaire de plusieurs familles.

Un ER > 1 indique une famille métallogénique enrichie en l'élément étudié, alors qu'un ER < 1 indique une famille appauvrie et peu favorable à sa présence (Tableau 4). L'In a été identifié et reporté dans 15 gîtes en France (sur un total de 3 667 sites).

	Nombre total de gisements en France	Nombre d'occurrences contenant du In	Ratio d'enrichissement (ER)
Intrusions alcalines et hyperalcalines	2	0	0,00
Gisements épithermaux	24	0	0,00
Complexes ignés felsiques	578	6	2,54
Complexes ignés intermédiaires	4	0	0,00
Complexes ignés de remplacement	53	0	0,00
IOCG	0	0	
Intrusions mafiques	0	0	
Gisements mafiques à ultramafiques	55	0	0,00
Or orogénique	161	0	0,00
Pegmatites	79	0	0,00
Gisements dans des roches carbonatées	329	0	0,00
Gisements associés à des grés et argiles	186	0	0,00
Gisements sédimentaires	315	0	0,00
VMS	148	1	1,65
Gisements résiduels	248	0	0,00
Veines à métaux de bases	1312	8	1,49
Placers	173	0	0,00
TOTAL	3667	15	

Tableau 4 : Calcul du ratio ER pour l'indium suivant les différentes familles métallogéniques.

Un ER > 1 est calculé pour les « complexes ignés felsiques », les « VMS » (*volcanogenic massive sulfides* ou dépôts de type sulfures massifs volcanogènes) et les « veines à métaux de bases » (Figure 12).

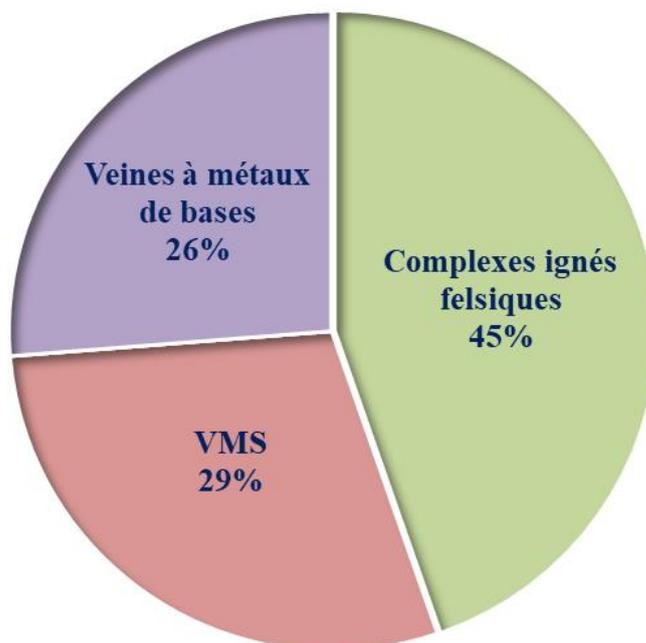


Figure 12 : Distribution des gisements contenant de l'In.

La troisième étape de l'approche DBQ, est l'identification de la signature multi-élémentaire (ou polymétallique) des familles de gisements présentant un ER > 1. Pour chaque famille métallogénique sélectionnée, une fréquence de présence dans tous les gisements contenant l'élément sélectionné est calculée, par métal. Cela permet l'identification d'une signature multi-élémentaire pour chaque famille métallogénique (Tableau 5).

Par exemple, le cuivre (Cu) présente près de 70 % de chance d'être identifié dans les gîtes de type « complexes ignés felsiques » dans lesquels l'élément In a été reporté. De même, il y a 100 % de chance de rencontrer l'étain Sn dans les gîtes de type « complexes ignés felsiques » et les « VMS » lorsque l'In a été identifié.

La dernière étape de traitement correspond au calcul de la notation « *ranking* » permettant la classification en terme de favorabilité. Tous les gîtes de la base de données sont « notés » en fonction de leur similitude avec la signature multi-élémentaires de la famille métallogénique à laquelle ils appartiennent en utilisant la formule suivante :

$$\text{Notation} = \sum_{\text{commodity \#1}}^{\text{commodity \#n 3667}} \left(\frac{\text{fréquence du métal } x \text{ présence/absence du métal}}{100} \right)$$

Les données sont ensuite pondérées par le ratio ER de chaque famille métallogénique. Cette pondération permet de souligner l'importance de certaines typologies de gisements.

Une carte représentant la densité de noyau (kernel) peut être réalisée afin de localiser les zones à fort potentiel (Figure 13). Ainsi le massif Armoricaïn, le massif Central et les Pyrénées représentent des zones favorables à fort potentiel pour ce métal critique.

Par ailleurs, l'In est principalement associé à des gîtes de « complexes ignés felsiques » et « veines à métaux de bases » sur les socles cristallins, alors que les gîtes classés comme « VMS » dans les Pyrénées semblent être favorables dans la partie ouest et les « veines à métaux de bases » dans la partie est (Figure 14).

	Toutes les familles métallogéniques	Complexes ignés felsiques	VMS	Veines à métaux de bases
In	100,00	100,00	100,00	100,00
Cu	46,67	66,67	100,00	25,00
Pb	46,67	0,00	0,00	87,50
Sn	46,67	100,00	100,00	0,00
Ag	33,33	16,67	100,00	37,50
Ge	20,00	0,00	0,00	37,50
W	20,00	50,00	0,00	0,00
As	13,33	33,33	0,00	0,00
Ba	13,33	0,00	0,00	25,00
Cd	13,33	0,00	0,00	25,00
Fl	13,33	0,00	0,00	25,00
Zn	13,33	0,00	700,00	0,00
Be	6,67	16,67	0,00	0,00
Bi	6,67	16,67	0,00	0,00
Ga	6,67	0,00	0,00	12,50
Li	6,67	16,67	0,00	0,00
Mo	6,67	16,67	0,00	0,00
Nb	6,67	16,67	0,00	0,00
Ta	6,67	16,67	0,00	0,00
U	6,67	16,67	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,00
Au	0,00	0,00	0,00	0,00
Ce	0,00	0,00	0,00	0,00
Co	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00
Cs	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00
Gr	0,00	0,00	0,00	0,00
Hf	0,00	0,00	0,00	0,00
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00
PbZn	0,00	0,00	0,00	0,00
Pd	0,00	0,00	0,00	0,00
Pt	0,00	0,00	0,00	0,00
Py	0,00	0,00	0,00	0,00
Rb	0,00	0,00	0,00	0,00
Re	0,00	0,00	0,00	0,00
REE	0,00	0,00	0,00	0,00
Rh	0,00	0,00	0,00	0,00
Ru	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	0,00	0,00	0,00	0,00
Sc	0,00	0,00	0,00	0,00
Se	0,00	0,00	0,00	0,00

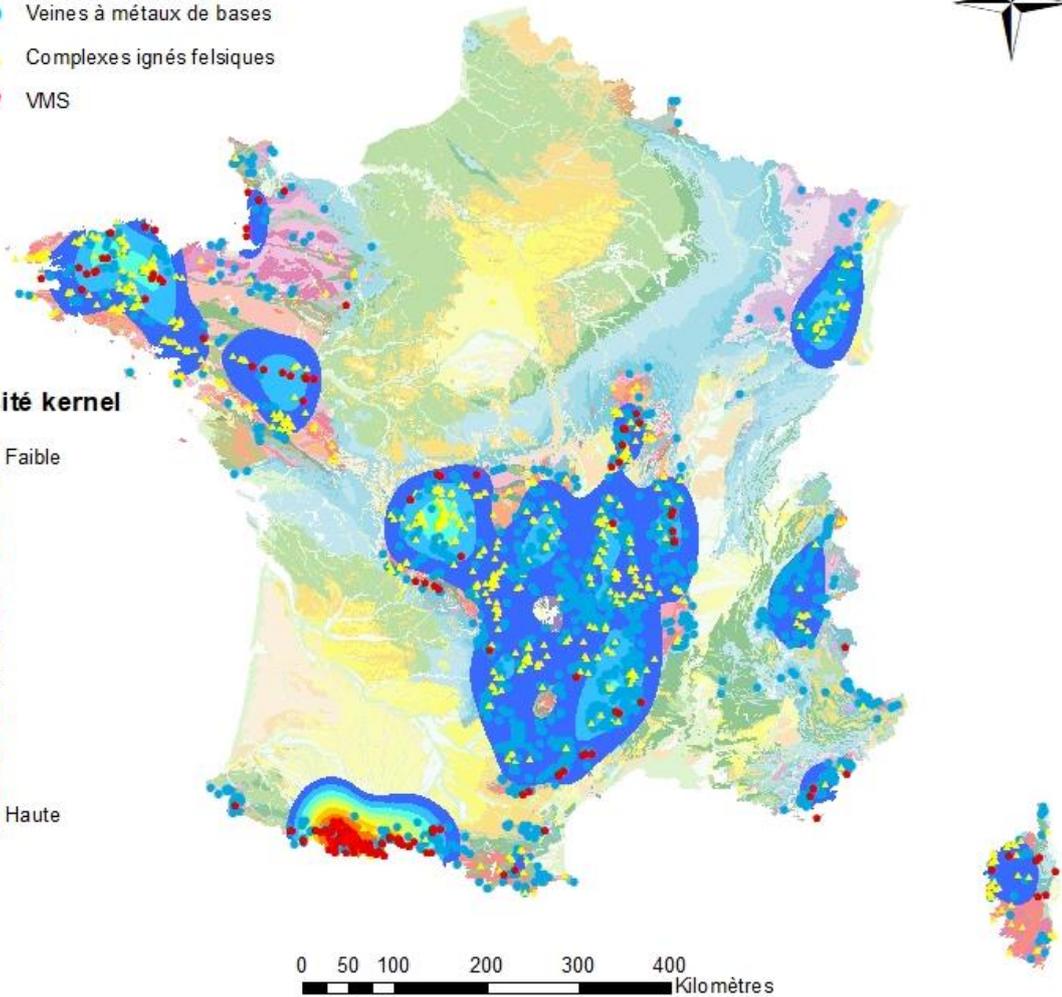
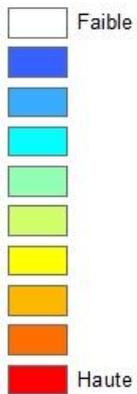
Tableau 5 : Signatures multi-élémentaires pour les familles métallogéniques potentiellement enrichies en In. Notez que Sn, W et Sb (mis à jour cette année) sont indiqués en rouge.

Légende

Famille métallogénique

- Veines à métaux de bases
- ▲ Complexes ignés felsiques
- VMS

Densité kernel



Source des données:
Base de données ARMADA / ProMine au 22/09/2020
Carte géologique de la France au 1:1 000 000

Figure 14 : Répartition cartographique des familles métallogéniques et de la densité de noyau (kernel) calculée pour l'in.

6. Perspectives

En termes de perspectives, et afin de pérenniser cette action réalisée entre 2018 et 2020, il est recommandé d'assurer une veille documentaire et économique des substances relatives aux occurrences minéralisées présentes sur le territoire français, ainsi qu'une mise à jour régulière de la base de données « Gisements, gîtes et indices » France.

La crise sanitaire et économique engendrée par la pandémie de COVID-19 en 2020 a permis de relever l'importance à l'échelle française et européenne de sécuriser les approvisionnements en ressources minérales stratégiques et critiques. La volonté à tendre vers une économie circulaire s'inscrit notamment via la mise en place d'actions telles que la rationalisation de l'extraction et des usages pour une gestion plus intégrée et durable des ressources sur notre territoire et l'amélioration des filières de récupération et des techniques de recyclage. Cependant, ces actions ne suffisent pour l'instant pas à satisfaire la demande actuelle croissante en petits métaux notamment pour les développements technologiques du numérique et des moyens de communication ou les besoins de la transition énergétique. D'après les travaux du BRGM, 56 % de l'indium primaire produit est actuellement utilisé pour la fabrication d'écrans plats, 3 % pour les semi-conducteurs et 8 % pour les cellules de panneaux photovoltaïques (*cf.* fiche de criticité In publié sur le site MinérallInfo). Il n'existe pas de mine d'indium, extrait par métallurgie en sous-produits de concentrés de zinc, ce qui questionne sur le potentiel minier français en ce type de petits métaux stratégiques.

Par ailleurs, la plupart des métaux critiques (Ge, Ga, In, Co, Bi, *etc.*) sont présents de façon très subordonnée et ne sont que très rarement identifiés dans l'analyse chimique des gîtes minéralisés historiques et donc peu reportés dans la base de données Armada, puisque les besoins en ces métaux sont récents et les techniques de détections de ces faibles concentrations également. Leur étude est par conséquent complexe, mais peut être facilitée par la méthode prédictive DBQ développée par le BRGM (Billa *et al.*, 2016 ; Bertrand *et al.*, 2017). Cette méthode permet de prévoir la présence potentielle ou l'absence de métaux lorsque ceux-ci n'ont pas été recherchés lors des études antérieures grâce à leurs associations métalliques et les types de gisements associés. Ainsi, cette méthode permettrait d'identifier de potentielles nouvelles zones d'exploration minérale pour les petits métaux critiques et pourrait être une application directe à la valorisation des données du BRGM.

7. Bibliographie

Ouvrages :

Bertrand G., Cassard D., Billa M., et al. (2017) – Predictive assessment of rare earth occurrences in Europe using the Database Querying method. The 2nd conference on European Rare Earth Resources, 28-31 May 2017, Santorini, Greece, Oral presentation.

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 en 1994. Notice explicative. BRGM Ed., 102 p.

Billa M., Bertrand G., Cassard D. (2016) – Méthode de sélection par requête et notation d'indices à métaux critiques (Ge, Ga, In, Ta, Co) non identifiés, à partir d'une base de données géologique (ProMine). Rapport final. BRGM/RP-655590-FR, 41p., 30 ill., 1 CD.

Cassard D., Bertrand G., Billa M., et al. (2015) – ProMine Mineral Database: New tools to assess primary and secondary mineral resources in Europe, in: P. Weihed (ed.), 3D, 4D and predictive modelling of major mineral belts in Europe. Mineral Resource Reviews, pp. 9-58.

Deschamps Y., Vadala P., Gentilhomme Ph. et al. (2002) – L'inventaire Minier de la France Métropolitaine, BRGM/RP-51455-FR, CD-ROM.

Guiollard, P.-C. (2009) - L'industrie minière de l'antimoine et du tungstène : Emergence, prospérité et disparition des exploitations de France métropolitaine aux XIX et XX siècles. Thèse de l'Université de Haute-Alsace Mulhouse - Colmar

Méloux J., Chévremont P., Langevin C. et al. (1978) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 - Feuille Lyon

Méloux J., Rouveyrol P., et Guigues J. (1979) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 - Feuille Rouen

Méloux J. (1979) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 – Feuille Nantes

Méloux J., Rouveyrol P., et Cartier A. (1980) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 - Feuille Marseille

Méloux J. (1982) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 - Feuille Strasbourg

Méloux J. et Guillou Y. (1984) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 - Feuille Bordeaux

Méloux J. et Gauthier B. (1984) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 - Feuille Toulouse

Méloux J. et Dejonghe L. (1987) - Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 - Feuille Bruxelles

Tincelin E. (1975) – Les mines de fer de Lorraine. Les résultats de l'expérience et les perspectives d'avenir. Annales des Mines, Mai 1975, pp. 27-48.

Vaute L., Khat M-O, Douche A., et al. (2005) – Construction et mise en œuvre d'un simulateur hydrologique et chimique du bassin ferrifère lorrain – Phase 1 : Synthèse hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-53277-FR, 93 p., 36 fig, 4 tabl., 5 ann (sur cd-rom), 22 planches (vol. séparé).

Site internet :

Bibliothèque nationale de France, <http://catalogue.bnf.fr/>

Bibliothèque patrimoniale numérique, <https://patrimoine.mines-paristech.fr/>

Les mines de fer de Lorraine, site personnel de François Xavier Bibert, <https://www.bibert.fr/Mines%20de%20Fer/Mines%20de%20Fer.htm>

S&P Global Market Intelligence – Base de données des projets miniers dans le monde, <https://www.spglobal.com/marketintelligence/>



Centre scientifique et technique
Direction des g eoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - T el. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr