

Collection « La mine en France »

# *Exploration minière*



**TOME 4**



Collection « La mine en France »

# Exploration minière

Tome 4

Février 2017

Charles N., Bailly L., Urien P., Labbé J.-F.



## **Comité de rédaction de la collection**

### **Ministère de l'Économie et des Finances**

Coordination : Alain Liger, Rémi Galin

Rédacteurs : Rémi Galin, Jean-François Moras, Diana Guillon.

### **BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières / Service Géologique National**

Coordination : Nicolas Charles, Jean-Jacques Dupuy

Rédacteurs : Nicolas Charles, Laurent Bailly, Gaël Bellenfant, Francis Blanchard, Stéphane Chevrel, Patrice Christmann, Francis Cottard, Patrick D'Hugues, Jean-Jacques Dupuy, Jean-Claude Guillaneau, Jean-François Labbé, Bernard Lamouille, Maurice Save, Jean-François Thomassin, Pol Urien, Laure Verneyre, Guillaume Vic.

### **INERIS – Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques**

Coordination : Frédéric Poulard

Rédacteurs : Frédéric Poulard, Philippe Gombert, Xavier Daupley, Christophe Didier, Zbigniew Pokryszka.

### **Réseau d'Excellence Mine & Société (Mines ParisTech, Mines Nancy, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Mines d'Alès)**

Coordination : Philippe Kister

Rédacteurs : Hossein Ahmadzadeh, Jean-Alain Fleurisson, Damien Goetz, Philippe Kister, Yann Gunzburger, Michel Jébrak, Brice Laurent, Jack-Pierre Piguet, David Salze.

**Mots-clés** : exploration minière, méthodes, techniques, impacts, solutions, bonnes pratiques.

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

**Charles N., Bailly L., Urien P., Labbé J.-F.** (2017) – Exploration minière. Collection « La mine en France ». Tome 4, 35 p., 10 fig., 2 tabl., 1 ann.

## Sommaire

<b>1. Généralités</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Méthodes et techniques</b> .....	<b>9</b>
2.1. STADE D'EXPLORATION STRATEGIQUE .....	9
2.2. STADE D'EXPLORATION TACTIQUE.....	12
2.3. STADE DE CONTROLE ET DE SELECTION DES CIBLES.....	13
2.4. DETERMINATION DE L'ENVELOPPE MINERALISEE ET EVALUATION DE LA RESSOURCE .....	14
<b>3. Impacts socio-économico-environnementaux de la phase d'exploration</b> .....	<b>19</b>
3.1. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	19
3.2. IMPACTS SOCIETAUX, ECONOMIQUES ET CULTURELS.....	21
<b>4. Solutions envisagées et bonnes pratiques</b> .....	<b>23</b>

### Liste des figures et des tableaux

Figure 1 : Prospection géochimique à la tarière à main en Vendée (Cliché à gauche : BRGM) ou à la moto-tarière sur le permis de Saint-Pierre-Montlimart, en France (Cliché à droite : Variscan Mines). .....	10
Figure 2 : Exemple de prospection géochimique stratégique sur le secteur de Brive/Argentat/Saint-Céré (France). .....	10
Figure 3 : Prospection alluvionnaire à Porte-aux-Moines (Côtes d'Armor, France ; Cliché : BRGM).....	11
Figure 4 : Levé géophysique aéroporté avec le système VTEM <sup>TM</sup> plus (Versatile Time-Domain Electromagnetic geophysical system) de Geotech Airborne Ltd, avec un hélicoptère de Airwalser. PER Merléac, en Bretagne (Cliché : Variscan Mines).....	13
Figure 5 : Exemple d'imagerie électrique acquise en exploration.....	14
Figure 6 : Sondage carotté sur le permis d'Antully (Saône-et-Loire, France) pour le compte de la société Garrot-Chaillac et carotte de sondage (Cliché : M. Gigoux, Univ.d'Orsay-BRGM).....	15
Figure 7 : Carotte à minerai aurifère issue d'un sondage carotté, en Côte d'Ivoire (Cliché : P. Urien, BRGM). .....	15
Figure 8 : Exemple de sondeuse utilisée pour les sondages destructifs et équipement de récupération des échantillons (à droite) (Cliché : L. Bailly, BRGM).....	15
Figure 9 : Eclats ("cuttings") de roche issus d'un sondage destructif, en Côte d'Ivoire (Cliché : P. Urien, BRGM). .....	16
Figure 10 : Les rayonnements électromagnétiques produits par divers objets de la vie quotidienne. Comparaison avec un levé géophysique aéroporté (Source : BRGM). .....	20

Tableau 1 : Les différents stades et les différentes techniques d'investigation de l'exploration minière. Les valeurs exprimées en mètres pour les sondages correspondent à des longueurs cumulées.....	7
Tableau 2 : Synthèse des impacts* des travaux d'exploration sur l'environnement et la société.*Les impacts liés aux tranchées et aux sondages sont temporaires, inhérent à la période des travaux d'exploration.....	22

## Liste des annexes

Annexe 1 Impact potentiel des campagnes électromagnétiques (Note technique BRGM) .....	27
--	----

# 1. Généralités

Pour chaque stade de l'exploration minière, différentes méthodes et techniques complémentaires, à différentes échelles, sont utilisées. L'objectif premier est d'imaginer et de trouver des cibles possibles, l'objectif final étant de pouvoir appréhender le gisement dans les trois dimensions de l'espace et d'en connaître le volume et les teneurs avant de poursuivre avec des études technico-économiques plus poussées. Les différents stades de l'étape d'exploration sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Les différents stades et les différentes techniques d'investigation de l'exploration minière. Les valeurs exprimées en mètres pour les sondages correspondent à des longueurs cumulées.

<b>EXPLORATION</b>					
<b>STADE</b>	<b>RECONNAISSANCE RÉGIONALE</b>	<b>TESTS DES INDICES</b>	<b>ETUDE DES INDICES</b>	<b>DÉTERMINATION DE L'ENVELOPPE MINÉRALISÉE</b>	<b>DÉFINITION DES CORPS MINÉRALISÉS</b>
<b>TECHNIQUES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION</b>	<b>STRATÉGIQUE</b>	<b>TACTIQUE</b>	<b>TRAVAUX DE SUBSURFACE</b>	<b>SONDAGES</b>	<b>SONDAGES ET TRAVAUX MINIERS</b>
	*Géologie *Téledétection *Gîtologie *Géochimie *Géophysique aéroportée	*Géochimie sol/roche *Levés géophysiques *Levés géologiques *Caractérisation	*Puits et tranchées *Tarières *Sondages courts (destructifs) *Extrapolation des données géologiques	*Sondages Phase 1 1000-5000 m *Etude de cible Phase 2 5000-10 000 m *Essais préliminaires de traitement	*Sondages systématiques *Galeries d'exploration *Certification de la continuité de la minéralisation *Géostatistique *Essais de traitement
<b>DIMENSIONS</b>	<b>2D</b>	<b>2D</b>	<b>2,5D</b>	<b>3D</b>	<b>3D</b>
<b>SURFACES</b>	x 100-1 000 km <sup>2</sup>	x 1-10 km <sup>2</sup>	manque d'infos en profondeur	<b>SECTIONS</b>	<b>MODÈLES 3D</b>
<b>ÉCHELLES</b>	1/100k - 1/50k	1/10 000-1/5 000			
<b>OBJECTIF</b>	<b>DÉTECTION D'ANOMALIES</b>	<b>IDENTIFICATION DES CIBLES</b>	<b>SÉLECTION DES CIBLES</b>	<b>ÉTUDE DE CIBLE ESTIMATION DES RESSOURCES</b>	<b>ÉVALUATION DES RESSOURCES ÉTUDE CONCEPTUELLE</b>
<b>DURÉE</b>	<b>1 À 2 ANS</b>	<b>1 À 2 ANS</b>	<b>1 À 2 ANS</b>	<b>1 À 3 ANS</b>	<b>1 À 3 ANS</b>



## 2. Méthodes et techniques

### 2.1. STADE D'EXPLORATION STRATEGIQUE

Dans les zones où les données géologiques et minières sont peu abondantes, une première étape **d'exploration régionale** (100 à 1000 km<sup>2</sup>) dite stratégique sera réalisée afin de mieux connaître le contexte géologique et d'identifier les indices de surface pouvant permettre de focaliser les travaux. Dans de nombreux cas, les données existantes sont suffisamment précises pour se focaliser directement sur des zones de dimensions plus réduites. Au cours de cette étape, des techniques essentiellement non invasives, seront mise en œuvre à la fois au sol et dans les airs :

- télédétection par imagerie satellitaire ;
- géophysique aéroportée ;
- cartographie géologique (prospection marteau et prélèvement de roches) ;
- géochimie en sédiments de ruisseaux ou en sol ;
- prélèvement de concentrés alluvionnaires pour études minéralogiques.

La télédétection par imagerie satellitaire et/ou photographie aérienne est un ensemble de techniques se différenciant les unes des autres non seulement par le type de vecteur (avion, satellite) mais également par le mode d'acquisition (analogique ou numérique, actif ou passif), la résolution spatiale, la gamme spectrale utilisée et la surface observée. Les données de télédétection correspondent à des mesures intégrées sur une échelle spatiale (pixel) de certains caractères de la surface (luminance, température apparente, coefficient de rétrodiffusion). Ces données sont ensuite transformées en variables utiles pour différents modèles : lithologique, minéralogique, structural, morphologique, géobotanique...

La cartographie géologique consiste à représenter sur un plan (2D) l'ensemble des formations géologiques présentes et leurs relations les unes avec les autres. Ce travail de terrain est également l'occasion de prélever des échantillons de roches afin de les analyser pour connaître leur composition chimique. Une première caractérisation chimique peut être acquise directement sur le terrain à partir d'outils portables. En effet, le sol en surface est souvent l'image de son sous-sol, comme en témoignent les éléments chimiques (notamment métalliques) présents dans les premières dizaines de centimètres, et donnant une indication sur la nature plus profonde du sous-sol. Ces études peuvent être complétées au laboratoire par un examen au microscope de fines tranches de roche (lame mince) afin de caractériser les minéraux présents.

Il est également possible de prélever des sédiments de ruisseaux, des sols, des eaux et de déterminer leur composition chimique (analyses géochimiques). En effet, certains éléments chimiques sont susceptibles de voyager dans le sol et dans les eaux et constituent des témoins indirects d'objets cachés en profondeur. Il est alors possible de dessiner des cartes d'anomalies géochimiques qui reflètent, dans les cas favorables, la position en profondeur de la substance recherchée. La prospection géochimique sur sédiments de ruisseaux consiste à prélever des échantillons d'environ 1 kg d'alluvions fines (boue) dans des lits de ruisseaux. L'échantillon est séché et tamisé puis envoyé dans un laboratoire pour analyse. Pour les sols, un échantillon d'environ 1 kg est prélevé entre 10 et 30 cm de profondeur, soit manuellement soit à l'aide d'une moto-tarière (Figure 1), souvent à intervalles réguliers (maille carrée large 200 x 200 m ou plus) ou le long de layons régulièrement espacés (typiquement 100 m). L'échantillon est séché, tamisé puis envoyé dans un laboratoire pour analyses. Ces dernières permettent d'identifier des

points d'enrichissements anormaux par rapport au fond géochimique naturel (variable d'une région à l'autre en fonction de la nature des formations géologiques présentes) (Figure 2).

Le développement des techniques analytiques permet d'analyser et de quantifier la plupart des éléments chimiques à des teneurs très faibles, pouvant être bien inférieures au gramme par tonne (g/t). Un gisement contient très exceptionnellement un seul élément chimique. Outre le ou les éléments d'intérêt, d'autres éléments chimiques accompagnateurs, valorisants (sous-produits valorisables) ou pénalisants (problème de santé publique et /ou environnementaux) sont parfois présents. Il convient dès les premiers stades de l'exploration de les identifier et de mettre en place les stratégies visant à leur récupération (éléments valorisants) ou à leur élimination ou neutralisation (éléments pénalisants) en vue d'une éventuelle exploitation.



Figure 1 : Prospection géochimique à la tarière à main en Vendée (Cliché à gauche : BRGM) ou à la moto-tarière sur le permis de Saint-Pierre-Montlimart, en France (Cliché à droite : Variscan Mines).

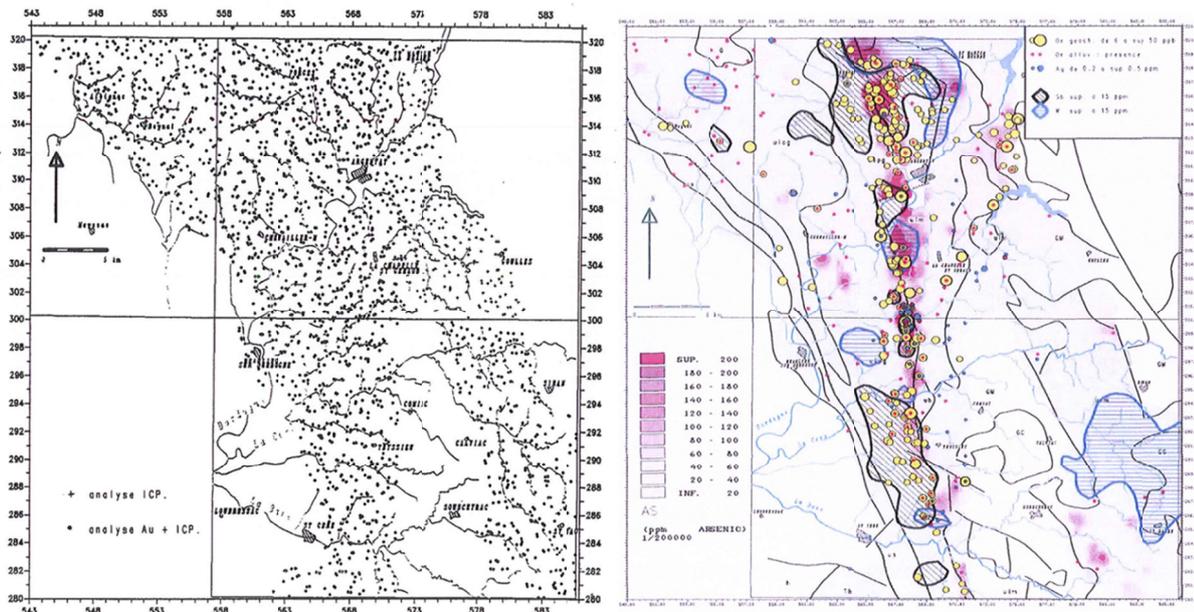


Figure 2 : Exemple de prospection géochimique stratégique sur le secteur de Brive/Argentat/Saint-Céré (France). A gauche, carte des points de prélèvement des échantillons. A droite, carte interprétative de la distribution des teneurs en arsenic, or, argent, antimoine(Sb) et tungstène (W) (d'après Lambert (1991)). Les prélèvements destinés à l'analyse géochimique ont été prélevés en majeure partie dans des

*sédiments de ruisseau ou dans des sols sur alluvions ou en fond de vallon. Les mêmes sites ont fait l'objet d'un prélèvement de la récupération des concentrés de batée pour étude minéralogique des minéraux lourds. Lambert, A. (1991). Prospection géochimique et alluvionnaire des feuilles de Brice, Argentat et Saint-Céré, Rapport BRGM DAM/DEX/T2M INV n°319, 203 p.*

La caractérisation des minéraux dits lourds peut être également utilisée en prospection dans la mesure où ces minéraux, peuvent être de bons indicateurs de la nature des roches ou des gisements dont ils dérivent. En raison de leur densité élevée, de leur résistance au transport et à l'altération, ces minéraux sont capables d'être transportés par les cours d'eau et de former des concentrations secondaires ou placers\*. La technique consiste à prélever quelques litres (le plus souvent 8 litres) d'alluvions graveleuses de ruisseaux, et d'en concentrer sur place les minéraux lourds, à l'aide d'une batée (Figure 3). L'identification des minéraux présents sera réalisée soit sur place, soit sous un microscope en laboratoire. Les gisements d'or sont fréquemment explorés avec cette technique. La cassitérite, oxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ), peut former par ce mécanisme des concentrations économiquement exploitables. Il en est de même de certains gisements d'ilménite ( $\text{FeTiO}_3$ , minerai de titane), de zircon ( $\text{ZrSiO}_4$ , principal minerai de zirconium et de hafnium utilisés dans les réacteurs nucléaires), de monazite (phosphate de terres rares légères).



Figure 3 : Prospection alluvionnaire à Porte-aux-Moines (Côtes d'Armor, France ; Cliché : BRGM).

La géophysique aéroportée ou hélicoptérée consiste à enregistrer à partir de capteurs embarqués dans un avion ou un hélicoptère, des anomalies de certains paramètres physiques comme le champ magnétique, la conductivité, la radioactivité, pouvant être liés à la présence en profondeur d'un gisement (Figure 4). Certains minéraux comme la magnétite (minerai de fer) ou certains sulfures comme la pyrrhotite ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) sont fortement à moyennement magnétiques. Leur concentration au sein d'un gisement est capable d'induire des variations naturelles du champ magnétique terrestre. D'autres minéraux présentent une radioactivité également naturelle que des capteurs spécifiques sont capables de détecter. Des masses métalliques sont aussi localisables en profondeur parce que capables de provoquer des anomalies de résistivité lorsque soumises à un courant électrique ou encore de se comporter comme des condensateurs en emmagasinant du courant et en le restituant au bout d'un certain laps de temps. C'est ce temps de restitution qui est étudié dans les mesures de chargeabilité ou de polarisation induite. Trois étapes sont nécessaires : (1) l'acquisition du signal, (2) son traitement par différents logiciels informatiques, et (3) son interprétation. Les cartes géophysiques ou cartes d'anomalies géophysiques, obtenues par toutes ces techniques révèlent les contrastes de ces paramètres entre les différentes formations présentes sous la surface. Après la cartographie de surface, ces outils permettent de visualiser, avec une plus ou moins grande précision, l'organisation et les propriétés des terrains profonds qui ne sont pas visibles en surface. Peuvent être distingués :

- Les leviers géophysiques passifs, qui mesurent des champs naturels : magnétisme terrestre, rayonnements gamma naturels, gravité. Les lignes de vol sont généralement espacées de 250 m à 1 km.
- Les leviers géophysiques actifs, qui mesurent les champs électromagnétiques induits par le sol et le sous-sol en réponse à une excitation électromagnétique. Le dispositif consiste le plus souvent en une spire qui émet un champ électromagnétique et un détecteur. Plus coûteux à réaliser que les leviers passifs, ils permettent de reconnaître une superficie plus réduite avec un espacement entre les lignes de vol compris entre 250 à 500 m.

Ces vols sont soumis à la réglementation de l'aviation civile. Souvent réalisés à basse altitude, ils font l'objet d'un encadrement spécifique (dérogation pour vols rasants) traitant des aspects de sécurité et de nuisance sonores.

Aucune de ces techniques ne peut à elle seule, donner une réponse unique permettant de rapidement localiser l'objet recherché. Ce n'est que la combinaison de plusieurs techniques et l'interprétation des résultats obtenus avec chacune d'elle qui permet de proposer un modèle géologique.

## 2.2. STADE D'EXPLORATION TACTIQUE

Dans le cas où des zones intéressantes ont été détectées au cours de la phase d'exploration stratégique, les travaux d'exploration vont se focaliser sur ces dernières de manière à mieux comprendre leur origine et leur nature. Cette phase d'**identification des cibles** de surface, dite tactique, n'utilise là encore que des techniques non invasives de surface donnant également une vision en 2D de la zone explorée (1 à 10 km<sup>2</sup>). Les techniques classiquement utilisées sont très comparables à celles utilisées dans le stade d'exploration précédent mais vont être plus détaillées. Les prélèvements en surface de roche, de sol, de sédiments vont être réalisés suivant une grille régulière avant envoi au laboratoire pour analyses. La distance entre deux points de prélèvement, relativement importante au départ, va être progressivement réduite de façon à mieux contraindre les anomalies géochimiques, et augmenter le degré de connaissance et la confiance dans l'interprétation des résultats.

Si nécessaire, des études géophysiques au sol pourront être réalisées de façon à mieux visualiser les terrains profonds. Elles sont basées sur le même principe que les études aéroportées décrites plus haut mais offrent une sensibilité beaucoup plus grande permettant de détecter des variations beaucoup plus fines. Là encore, il peut s'agir d'enregistrer des paramètres naturels des terrains (magnétisme, gravimétrie, radioactivité) ou alors de générer une réponse des terrains suite à une excitation provoquée par des courants électriques ou des ondes sismiques (Figure 5). Ces mesures sont réalisées à intervalles réguliers (ex. 50 m) le long de layons (i.e. sentiers rectilignes) régulièrement espacés (ex. 100 m). Ces techniques sont généralement mises en œuvre sur des surfaces relativement réduites, autour des anomalies géochimiques par exemple ou encore à travers des structures géologiques plus ou moins linéaires comme des filons ou des failles potentiellement minéralisées.



Figure 4 : Levé géophysique aéroporté avec le système VTEM<sup>TM</sup> plus (Versatile Time-Domain Electromagnetic geophysical system) de Geotech Airborne Ltd, avec un hélicoptère de Airwalser. PER Merléac, en Bretagne (Cliché : Variscan Mines).

### 2.3. STADE DE CONTROLE ET DE SELECTION DES CIBLES

Ce stade, qualifié de travaux de subsurface (2,5D), utilise des outils superficiels de la phase tactique, éventuellement plus en détail, mais également des investigations en sous-sol immédiat (par tranchées, sondages à la tarière ou puits). Lorsqu'une cible d'exploration a été identifiée, au moyen d'anomalies géochimiques et/ou géophysiques, il est nécessaire de connaître sa nature (toutes les anomalies géophysiques ne correspondent pas nécessairement à un gisement caché), et sa dimension en profondeur. Dans le cas de gisements cachés proches de la surface (1 à 2 m), des tranchées pourront être réalisées à l'aide d'excavateurs hydrauliques, comme ceux utilisés pour les tranchées de travaux publics. Des puits d'exploration de 1 à 1,5 m de largeur ou de diamètre et jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur pourront également être réalisés dans le cas de gisements présentant une faible épaisseur ou extension verticale. C'est le cas par exemple des gisements de bauxite, minerai principal d'aluminium, qui se forme généralement sur des surfaces horizontales et dont la profondeur moyenne est de l'ordre de la dizaine de mètres. Des échantillons peuvent être prélevés dans les tranchées ou les puits (grand volume, plusieurs tonnes) afin de réaliser des essais de traitement minéralurgiques en pilote.

Dans le cas de gisements cachés ou se développant à plus grande profondeur, la seule solution pour recueillir les informations nécessaires à leur caractérisation (nature et structure des terrains et de la minéralisation, teneurs en éléments valorisants et/ou pénalisants) consiste à réaliser des forages, comme ceux réalisés pour rechercher ou exploiter l'eau. Il s'agit de forer

des trous cylindriques verticaux ou inclinés, le plus souvent de 6 à 16 cm de diamètre (normes nationales et internationales), et de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Ces sondages peuvent être carottés et permettent dans ce cas de remonter les terrains profonds sous forme de cylindre de roche de différents diamètres, « les carottes », à l'aide d'une couronne diamantée rotative, remontés en surface, examinés et échantillonnés pour analyse (Figure 6 et Figure 7). Ces sondages nécessitent parfois l'utilisation de boues de forage, mélange d'eau et d'air additionné de produits naturels et/ou synthétiques, en fonction de la densité requise (ex. bentonite, produits biodégradables). Le rôle de ces boues est multiple : stabilisation des parois du forage, lubrification et refroidissement des outils, remontée des déblais de forage. Les sondages peuvent également être destructifs (rotary, roto-percussion ou marteau fond de trou) (Figure 8). La roche traversée est alors fragmentée en petits morceaux, « les cuttings » (Figure 9). De nombreuses informations peuvent être tirées de l'examen des carottes ou des cuttings : phases minérales présentes, chimie, déformation, etc.

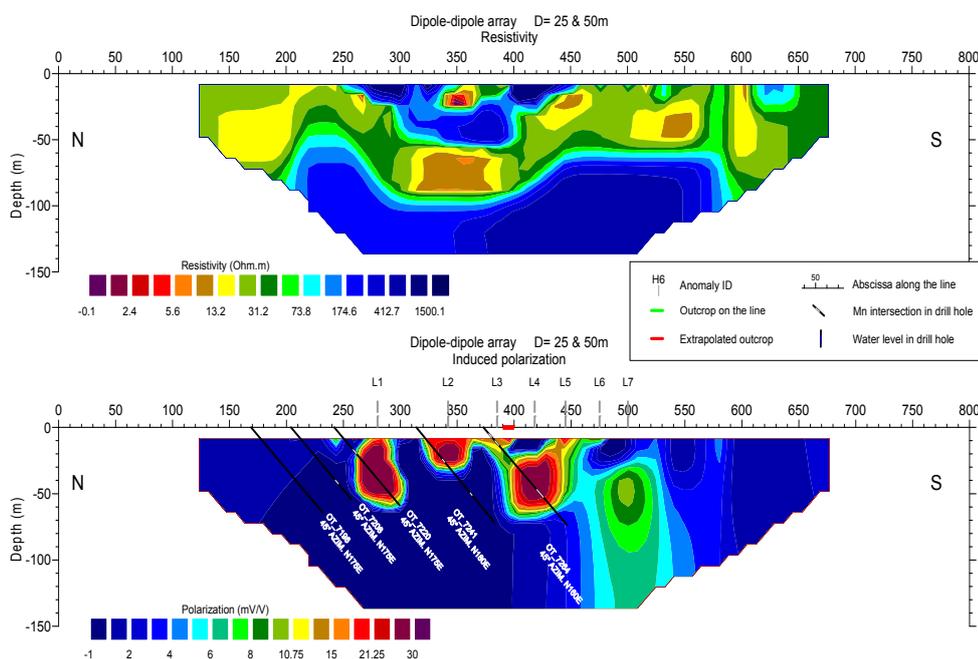


Figure 5 : Exemple d'imagerie électrique acquise en exploration : résistivité (en haut) et polarisation induite (en bas) acquise au cours de l'exploration d'un gisement de manganèse (Source : BRGM). Un courant électrique est injecté dans les électrodes régulièrement espacées (ici 25 et 50 m) afin de remonter la résistivité apparente des terrains situés au droit de la zone d'étude. Le profil de résistivité permet de caractériser la disposition des terrains en profondeur. La polarisation induite permet l'identification des masses métalliques en profondeur (anomalies rouges et violettes).

## 2.4. DETERMINATION DE L'ENVELOPPE MINERALISEE ET EVALUATION DE LA RESSOURCE

Les derniers stades visant à **déterminer l'enveloppe** du corps minéralisé et **évaluer la ressource** en profondeur (3D) utilisent surtout des sondages, destructifs et/ou carottés, d'abord ponctuels (épars) puis resserrés systématiquement selon une maille régulière, avec éventuellement des mesures des propriétés des roches traversées directement en sondage. Ces données informatisées sont utilisées pour générer des modèles géologiques en 3 dimensions qui permettent de visualiser l'enveloppe du corps minéralisé et ses principales caractéristiques.



Figure 6 : Sondage carotté sur le permis d'Antully (Saône-et-Loire, France) pour le compte de la société Garrot-Chaillac et carotte de sondage (Cliché : M. Gigoux, Univ.d'Orsay-BRGM).



Figure 7 : Carotte à minerai aurifère issue d'un sondage carotté, en Côte d'Ivoire (Cliché : P. Urien, BRGM).



Figure 8 : Exemple de sondeuse utilisée pour les sondages destructifs et équipement de récupération des échantillons (à droite) (Cliché : L. Bailly, BRGM).



Figure 9 : Eclats ("cuttings") de roche issus d'un sondage destructif, en Côte d'Ivoire (Cliché : P. Urien, BRGM).

La combinaison de l'ensemble des informations acquises à toutes les échelles tout au long de la phase d'exploration sont combinées afin d'aboutir à un modèle du gisement caché qui intègre un maximum, sinon la totalité, de ces données. De puissants logiciels informatiques permettent :

- De replacer spatialement l'ensemble des différentes informations acquises en surface (cartographie, géochimie) et en profondeur (géophysique, données de sondage) ;
- D'interpoler les résultats acquis entre deux points ou deux sondages distants. Il est clair que plus la densité d'information est élevée (ex. : plus le nombre de sondages est élevé), plus l'interpolation sera fiable et représentative de la réalité ;
- De modéliser la morphologie ou l'enveloppe du corps minéralisé en profondeur et donc son volume ;

D'estimer, à partir de l'analyse chimique préliminaire des minerais, le tonnage et les teneurs en éléments valorisants en chaque point de ce volume. En d'autres termes de calculer les ressources\* voire les réserves\* de ce gisement.

*En résumé, les travaux d'exploration consistent en deux grandes étapes :*

- *la mise en œuvre d'un ensemble de techniques et d'analyses permettant d'identifier au sein d'une vaste surface, les zones potentiellement les plus intéressantes en termes de ressources exploitables qualifiées de cibles. Il s'agit principalement de travaux de reconnaissance au sol à l'aide du marteau et de la boussole, du prélèvement de différents types d'échantillons en vue de leur caractérisation en laboratoire, de la mise en évidence d'anomalies géophysiques au moyen du survol de la zone par des avions, hélicoptères ou drones équipés de récepteurs spécifiques. A ce stade, les impacts de ces techniques sont très limités, l'essentiel des travaux utilisant les chemins existants ou la voie des airs ;*
- *la caractérisation de ces cibles par des techniques et analyses fines permettant de délimiter spatialement l'objet recherché, d'identifier la nature des éléments valorisants et pénalisants présents, de proposer un modèle de gisement. Les techniques mises en œuvre sont comparables aux précédentes avec en plus l'acquisition de données géophysiques au sol et la réalisation de sondages selon une maille régulière centrée sur l'objet recherché. La diminution de la taille de la maille de forage permet une meilleure connaissance et caractérisation de cet objet. Les impacts en lien avec cette étape concernent principalement la réalisation de pistes si elles n'existent pas et le passage d'engins de forage, et de plateformes pour ces derniers.*

*Au cours de ces travaux d'exploration on assiste à une réduction progressive des surfaces investiguées, à une augmentation des informations recueillies sur les cibles intéressantes. Les techniques utilisées au cours de ces travaux sont complémentaires dans la mesure où aucune d'entre elle, prise séparément, ne fournit une solution unique. Seul le croisement des différents résultats permet d'accroître la confiance dans le modèle proposé. Ces résultats permettent de décider si les travaux plus précis de caractérisation doivent être poursuivis ou si les conditions ne sont pas réunies pour envisager une exploitation future.*

*Les travaux ont lieu sur des propriétés privées, après négociation financière avec le propriétaire et ou les organes collectifs de la profession agricole en vue d'indemniser la perte de production ou la gêne occasionnée. L'accès au foncier ne peut se faire sans avoir demandé l'accord du propriétaire et informé les maires.*

*Les travaux ne peuvent être entrepris, sauf cas particulier, que si l'opérateur dispose d'un permis exclusif de recherches. Ce droit d'engager concrètement les travaux sur le terrain est obtenu après avoir satisfait aux processus de déclaration ou d'autorisation. Les demandes sont systématiquement accompagnées de documents permettant d'apprécier l'impact des travaux. Si les travaux envisagés relèvent de l'autorisation, une enquête publique préalable est réalisée. Dans tous les cas, le préfet a la possibilité de régler et de refuser les travaux.*



### 3. Impacts socio-économico-environnementaux de la phase d'exploration

Il convient de distinguer les impacts temporaires (augmentation du trafic routier) et permanents (modification du paysage) mais également des impacts directs (disparition de zones agricoles) et indirects (baisse de la fréquentation touristique) liés aux techniques mises en œuvre au stade de l'exploration :

- la reconnaissance géologique au sol avec prélèvement d'échantillons de roche ;
- les levés géophysiques aéroportés ;
- les travaux de géophysique au sol ;
- les prélèvements géochimiques dans les cours d'eau (eau et alluvions), et les sols ;
- la réalisation de tranchées et/ou de puits ;
- la réalisation de sondages carottés et/ou destructifs.

#### 3.1. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les levés géologiques et la prospection marteau ont un impact environnemental quasi-nul ne passant que par le prélèvement d'échantillons de quelques centaines de grammes pour examen, études microscopiques ou analyses. Le géologue utilisera les routes et les pistes d'accès préexistantes et se déplacera à pied lorsqu'il n'y a pas de voies carrossables.

- Les levés géophysiques aéroportés par avion, hélicoptère et désormais éventuellement de drone, ont des impacts environnementaux limités. Le bruit lié au survol de l'appareil est comparable à celui de tout autre appareil volant à altitude modeste (avions d'aéroclubs de loisirs, hélicoptères de surveillance ou de secours, aéromodéliste dans le cas de drone, etc.). Une courte et temporaire perturbation des populations et de la faune sauvage (notamment en période de reproduction) est possible. Ces perturbations ont cependant une durée très limitée et n'ont pas d'effets permanents. L'impact potentiel des ondes électromagnétiques émises par les équipements géophysiques sur la population riveraine et l'environnement restera très faible au regard des expositions domestiques communes et comparable à celui d'un fil électrique domestique (Figure 10).

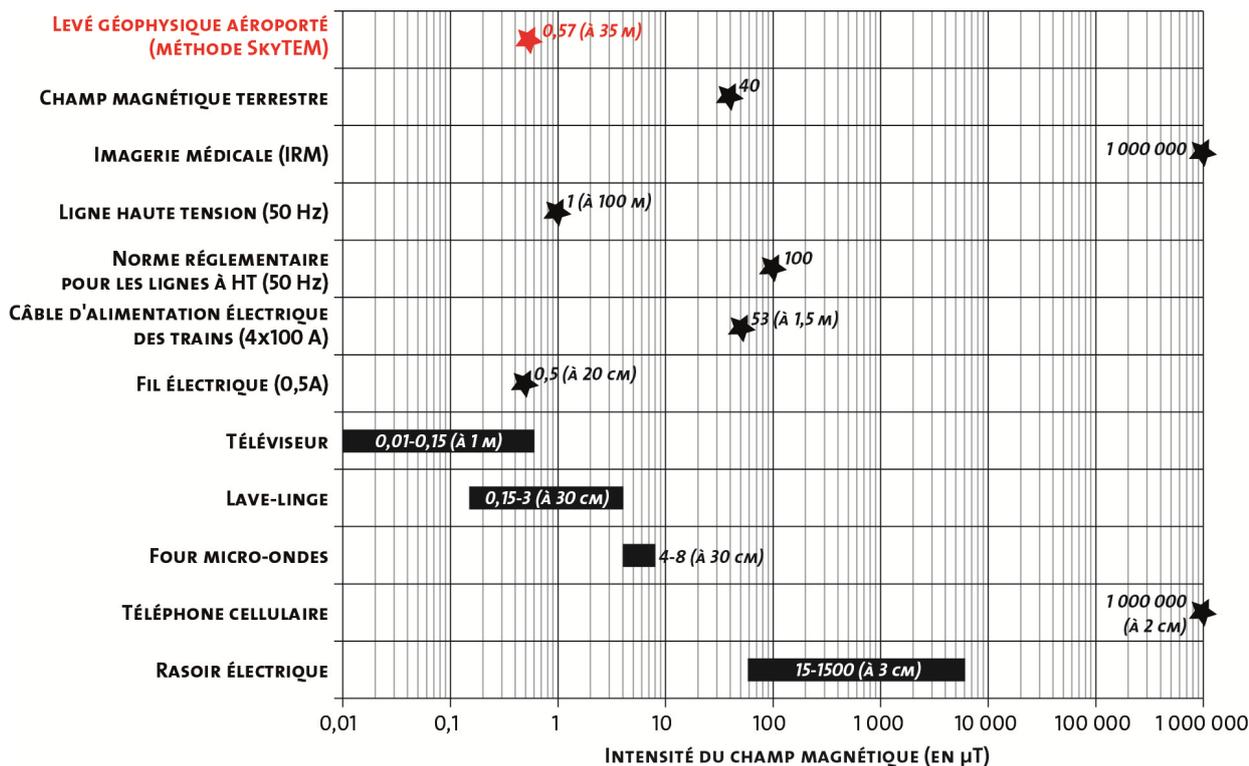


Figure 10 : Les rayonnements électromagnétiques produits par divers objets de la vie quotidienne. Comparaison avec un levé géophysique aéroporté (Source : BRGM).

- Les levés géophysiques passifs au sol n'ont pas d'impacts environnementaux sauf s'ils nécessitent l'aménagement de pistes pour le transport du matériel et la réalisation des mesures le long de layons rectilignes. Cela peut conduire à la fragmentation temporaire d'habitats végétaux ou animaux ou altérer temporairement d'éventuelles espèces endémiques ou rares. Lors des levés géophysiques actifs au sol, les courants électriques ou champs magnétiques provoqués sont minimes, ponctuels et temporaires et n'ont pas d'impacts observés sur la flore et la faune du sol et du sous-sol.
- Les prospections par géochimie en sédiments de ruisseaux et en concentrés alluvionnaires n'ont aucun impact environnemental significatif : l'impact sera éventuellement limité à une turbidité très localisée et très temporaire au moment du prélèvement.
  - Les impacts environnementaux liés à la méthode géochimie sol consistent en :
    - L'ouverture de layons le long des profils d'échantillonnage, avec élagage de la végétation basse (ex. ronces, arbustes, etc.). L'impact demeure temporaire, le layon étant généralement rapidement ré-envahi par la végétation ;
    - L'ouverture d'un trou d'échantillonnage d'environ 30 cm de diamètre sur 30 cm de profondeur (limité à 10 cm de diamètre dans le cas de l'utilisation d'une tarière à main). Ce trou pourra être rebouché immédiatement avec des matériaux environnants si nécessaire. L'impact physique du creusement se rapproche de celui d'un prélèvement pour analyse de qualité d'un sol agricole, ou de recherche environnementale de polluants, ou encore d'un terrier de lapin.

- Pour les tranchées et les puits, les impacts environnementaux seront les mêmes que ceux de travaux publics (perturbation locale et temporaire du paysage, bruit de l'engin de chantier, consommation temporaire d'espace voire de terrains arables). Les tranchées sont généralement réalisées à la pelle hydraulique qui peut selon les configurations du terrain nécessiter la réalisation de pistes d'accès pouvant perturber temporairement la faune et la flore. La terre végétale sera stockée à l'écart de la partie profonde et remise en place après les levés géologiques et l'échantillonnage ce qui annihilera les impacts indésirables. Il conviendra de protéger le chantier et d'en interdire l'accès aux personnes non-autorisées.
- Les techniques de sondages miniers ne sont pas très différentes des techniques de forage pour eau, leur impact environnemental éventuel est similaire, à condition que la profondeur d'investigation reste du même ordre de grandeur (<100-200 m). Au-delà, il peut s'agir d'opérations de plus longue durée, nécessitant le transport de gros matériels et la présence de plusieurs personnes pendant plusieurs jours, d'où un impact potentiellement significatif sur l'environnement. En outre, un forage profond est susceptible de générer un volume significatif (~2 m<sup>3</sup> par tranche de 100 m de profondeur) de cuttings. Les sondages peuvent se faire de façon isolé ou à maille rapprochée. Les impacts d'un sondage minier sont décrits plus en détail dans le Tome 11.

L'impact environnemental commun à tous les types de sondages est (Cf. Tome 11) :

- au moment du forage, l'impact des éventuels aménagements d'accès (piste sommaire) et d'une plateforme d'une centaine de mètres carrés, terrassée si nécessaire ; les impacts visuel, sonore et vibratoire de la présence du chantier (sondeuse avec moteur diesel, véhicules de chantier). Pour les sondages carottés, la couronne diamantée doit être refroidie par circulation d'eau, d'où une consommation d'eau, et souvent additionnée d'agents de viscosité et d'agents lubrifiants : les « boues de forage ». Parmi les composants de ces boues, la bentonite (argile naturelle sans toxicité) a été couramment utilisée et l'est encore par certains sondeurs. Néanmoins, ce sont désormais surtout des polymères spécifiques qui sont utilisés. Ces derniers, autorisés par les réglementations européennes sont non toxiques et biodégradables ;
- après le forage, la présence d'un orifice en surface, en général de moins de 16 cm de diamètre, qui pourra être colmaté par un caillou ou devra être soigneusement refermé avec un bouchon cimenté durable dans le temps. Dans certains cas particuliers et généralement rares, le forage pourra avoir pour conséquence une circulation d'eau indésirable (amenée d'eau au contact d'aquifères isolés ou de roches sensibles, telles que des sulfures, ou d'anhydrite). Il faudra alors cimenter l'ensemble du sondage pour éviter ces circulations à long-terme.

### 3.2. IMPACTS SOCIÉTAUX, ÉCONOMIQUES ET CULTURELS

L'impact sociétal de l'exploration minière revêt différents types : social, économique et culturel. En France, il s'agira principalement d'impact :

- économique : meilleure connaissances des ressources, acquisition de nouvelles compétences, un regain ou soutien d'activité temporaire dans les régions explorées (hôtellerie, restauration, commerces, etc.) ;
- social et culturel : acceptation/rejet des populations riveraines notamment vis-à-vis des sondages/sondeuses, gestion des réticences locales (« un forage de reconnaissance ne signifiant pas une exploitation consécutive »).

Tableau 2 : Synthèse des impacts\* des travaux d'exploration sur l'environnement et la société.\*Les impacts liés aux tranchées et aux sondages sont temporaires, inhérent à la période des travaux d'exploration.

	RECONNAISSANCE GÉOLOGIQUE	LEVÉS GÉOPHYSIQUES		ÉTUDES GÉOCHIMIQUES			TRANCHÉES ET PUIITS	SONDAGES	
		Aéroporté	Au sol	Sol	Ruisseau	Eau		Isolés	Maille rapprochée
<b>IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX</b>									
Consommation d'espace	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Faible et temporaire	Faible et temporaire	Modéré et temporaire
Suppression de terrains arables	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Faible et temporaire	Négligeable	Modéré et temporaire
Disparition d'espèces animales	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Disparition d'espèces végétales	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Disparition d'éléments du patrimoine culturel	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Modification du régime hydraulique	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Atteinte au paysage	Négligeable	Négligeable	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Faible
Coupure de continuité écologique	Négligeable	Négligeable	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Faible
Restructuration des voiries et réseaux divers	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Pollution de l'air	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Pollution de l'eau	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Pollution des sols	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Production de déchets	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Risques technologiques	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Odeurs	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Emissions de poussières	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Faible et temporaire	Faible et temporaire
Bruit	Négligeable	Faible et temporaire	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Faible et temporaire	Faible et temporaire	Faible et temporaire
<b>IMPACTS SOCIAUX</b>									
Incidences sur le marché immobilier	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Baisse de fréquentation touristique	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable

## 4. Solutions envisagées et bonnes pratiques

Un certain nombre de dispositions légales existent et encadrent le bon déroulement de ces travaux d'exploration en ce qui concerne par exemple, la marche à suivre administrative, la réduction des nuisances, et un certain nombre d'institutions sont en charge de vérifier que ces dispositions sont effectivement appliquées. Le détenteur du permis exclusif de recherche (PER) se doit de veiller au respect de ces dispositions par son propre personnel mais également par le personnel des sous-traitants à qui il confie certains des travaux d'exploration. Il doit également s'assurer du sérieux et des aptitudes professionnels des sous-traitants. Pour les travaux confiés à des laboratoires extérieurs, en particulier pour les analyses géochimiques, le détenteur du PER doit s'assurer que ces entreprises disposent de toutes les certifications en vigueur pour réaliser les tâches qui lui sont confiées.

Au-delà de ces dispositions légales, tout un ensemble de bonnes pratiques peuvent être mises en œuvre afin de réduire au maximum les impacts environnementaux et sociaux des travaux d'exploration. Il existe divers recueils de bonnes pratiques environnementales en exploration minière. Un exemple spécifique au contexte australien est fourni par le Conseil de l'industrie minière de l'État de la Nouvelle-Galles du Sud ([www.nswmining.com.au](http://www.nswmining.com.au)). De même, le projet européen I<sup>2</sup>MINE, qui se termine en 2015, vise à créer une base de données de bonnes pratiques en matière d'exploration et d'exploitation minière (Green Mining), en synthétisant des exemples internationaux ([www.i2mine.eu](http://www.i2mine.eu)).

La réalisation d'une notice d'impact préalable à la campagne d'exploration accompagnée, le cas échéant, d'un plan financé d'actions de mitigation, si la campagne d'exploration est réellement de nature à avoir un impact environnemental significatif, est souhaitable. Cette notice devrait, en cas de travaux en zones d'intérêt écologique particulier, s'inspirer des lignes directrices contenues dans le document de la Commission européenne « L'extraction des minéraux non-énergétiques et Natura 2000 ». Cette notice d'impact doit être adaptée à la réalité du projet. En fonction de ses caractéristiques techniques (méthode et moyens d'investigation), de sa localisation sur un territoire donné, de son organisation locale (1 poste/jour, en continu, week-end ou non...) et de sa durée, chaque projet génère en effet ses propres impacts.

Après obtention du permis exclusif de recherche, il peut être bienvenu, avant d'entreprendre tous travaux d'exploration proprement dit, de réaliser un « état de référence » du permis. Cette étude, réalisée proportionnellement aux enjeux, sera plus approfondie sur les zones concernées par les travaux miniers. Ce travail a pour objectif de recenser par exemple :

- Les pollutions anthropiques qu'elles soient liées à d'anciens travaux miniers, à des industries existantes ou passées, des décharges. Les anciens travaux miniers ont pu générer un certain nombre d'impacts (anciennes installations et équipements, déchets miniers et autres, résidus de traitement, excavations non condamnées/sécurisés). Les données de la littérature permettent dans un premier temps de dresser un historique des différentes activités humaines. Les activités agricoles et l'utilisation d'engrais ou de produits phytosanitaires peuvent être à l'origine de teneurs anormales en certains éléments dans les sols (ex : le cuivre en domaine viticole). De même les zones de chasse peuvent être à l'origine de teneurs anormales en plomb dans les sols ;
- Les « pollutions naturelles » - certaines formations géologiques, riches en sulfures, peuvent générer des eaux acides par attaque de ces sulfures par les eaux de pluies. Il est intéressant de faire des analyses des eaux de sources afin de connaître leur chimisme (présence d'éléments polluants) ;

- Les évidences de travaux anciens pouvant nécessiter la réalisation d'un inventaire archéologique ;
- Les espèces animales et végétales présentes – faire le point des données de la littérature dans lesquelles des inventaires ont pu être réalisés ;
- La présence de sites classés et/ou de zones Natura 2000 ;
- L'existence de Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) ;
- Les recommandations du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE).

Cet état de référence pourra être intégré à la notice d'impact qui accompagne systématiquement le dossier de demande de permis exclusif de recherche. Cette notice indique les incidences éventuelles des travaux projetés sur l'environnement et les conditions dans lesquelles l'opération projetée satisfait aux préoccupations environnementales.

A ce stade, il importe que l'opérateur minier améliore sa connaissance du territoire, des acteurs et des enjeux environnementaux, sociaux et économiques en réalisant des états de référence. Les travaux d'exploration sont l'occasion de créer et d'entretenir un dialogue et des relations de confiance avec les propriétaires, les riverains et les maires, ce qui suppose la capacité de présenter clairement un projet, le respect des réglementations et des engagements pris. L'issue incertaine du projet est un facteur de complication dans la création de ce dialogue. Les informations techniques (géologie, milieu naturel, paysage, urbanisme, infrastructures, possibilités de logement, potentiels de recrutement d'employés, etc.) seront précieuses en cas de poursuite du projet. En cas d'arrêt des travaux, ces informations viennent enrichir les bases de connaissance du territoire à un coût nul pour les pouvoirs publics locaux.

Les engagements possibles dans le domaine de l'exploration minière sont :

- Respecter la démarche étape par étape du développement minier depuis la reconnaissance jusqu'aux études de faisabilité et maîtriser l'ensemble des risques tout en informant régulièrement les parties-prenantes ;
- Optimiser, lors des phases de reconnaissance amont notamment, le ratio entre les méthodes d'investigation non invasives (télé-détection, géophysique, géochimie, etc.) et les méthodes d'exploration de terrain plus impactantes (tranchées, sondages, travaux miniers) ;
- Conduire les activités d'exploration générant le minimum de désordres sur l'environnement en ménageant le cadre de vie des populations (identifier en amont les terrains et les populations affectés) en concertation avec les parties-prenantes ;
- Au cours de sondages, prévoir d'identifier la présence et caractériser les substances naturelles potentiellement nocives, comme certains gaz (méthane, sulfure d'hydrogène, dioxyde de carbone, amiante, minéraux radioactifs).

### **Concertation**

- Prévoir un mécanisme de concertation approprié avec les populations locales (réunions publiques d'information, presse locale, visites de chantier,....) pour présenter et discuter chaque phase de la démarche d'exploration dans le contexte global du projet minier ainsi que les possibles impacts en lien avec ces activités ;
- Les travaux d'exploration à réaliser dans des propriétés privées doivent nécessairement se faire après contact et accord avec le propriétaire.

**Société**

- Etablir, avec les spécialistes locaux ou nationaux, des calendriers et horaires de travaux pour limiter les inconvénients dans et à proximité des zones sensibles pour la faune et les populations locales ;
- Intégrer la population locale (ex. main d'œuvre, séance d'information publique) aux premières phases de travaux de terrain ;
- Prévoir des mesures d'atténuation des impacts probables avant le démarrage des stades de reconnaissance ciblées lourdes (tranchées, sondages) ;
- Sélectionner les zones à explorer tout en assurant un équilibre entre tous les facteurs d'ordre économique, environnemental et sociétal. Ainsi, orienter les recherches vers les gisements au potentiel économique avéré disposant dans le même temps du meilleur potentiel d'acceptation sociale et environnementale.

**Environnement**

- Limiter le défrichement au strict besoin et respecter le cycle des cultures ;
- Identifier très tôt et préserver les atouts exceptionnels d'ordre écologique, paysager et architectural d'intérêt local ou national ;
- Stocker et entreposer les terres décapées pour favoriser la réhabilitation ;
- Identifier à l'avance et préserver les éléments importants (habitats de faune, flore, zone de reproduction,...) du milieu biologique ;
- Limiter la production de déchets au strict minimum ;
- Réaliser un système de gestion de la totalité des déchets liquides, solides, toxiques produits par les activités d'exploration minière ;
- Former et sensibiliser tout le personnel (permanent et sous-traitant) pour concevoir des comportements ayant le minimum d'impact sur l'environnement ;
- Reboucher toute excavation (tranchées, puits, sondages) ;
- Réaménager et remettre en état le site au fur et à mesure ;
- Effectuer toute activité d'exploration dans le respect de l'environnement et de l'éthique des aires naturelles protégées (ex. Patrimoine mondial de l'UNESCO, zones d'adhésion des Parc nationaux, Parcs naturels régionaux, Natura 2000, ZNIEFF1 et 2, Réserves naturelles régionales et nationales, etc.).

**Sécurité**

- Former et sensibiliser tout le personnel sur les risques et dangers liés aux situations particulières et aux produits utilisés lors des opérations d'exploration minière ;
- Concevoir et appliquer des mesures de sécurité (limitations d'accès, installations de sécurité, entreposage des produits toxiques et dangereux, programme de gestion des risques, programme de révision des mesures de sécurité établie au besoin,...) et un plan d'urgence pour éviter tous risques et dangers lors des opérations d'exploration minière ;
- Former tout le personnel sur ces mesures de sécurité et plan d'urgence.



## **Annexe 1**

# **Impact potentiel des campagnes électromagnétiques hélicoptées sur la population et l'environnement en termes d'exposition aux rayonnements électromagnétiques**

Note technique BRGM  
J. Perrin (2013)





## Impact potentiel des campagnes électromagnétiques héliportées sur la population et l'environnement en termes d'exposition aux rayonnements électromagnétiques

### • Préambule

Le domaine du risque lié à l'exposition aux émissions d'ondes électromagnétiques pulsées est particulièrement vaste et complexe, ainsi que la législation correspondante.

Cette note technique présente une analyse du point de vue de l'utilisateur géophysicien. Elle identifie les principaux paramètres mis en jeu ainsi que les recommandations en vigueur et situe les équipements utilisés en géophysique vis-à-vis des niveaux admissibles. Aussi, elle ne prétend être ni exhaustive, ni définitive.

Pour évaluer précisément le niveau d'exposition engendré par un équipement particulier, un travail plus approfondi est nécessaire par une équipe pluridisciplinaire constituée d'experts en géophysique, en rayonnement d'antennes, en risque électromagnétique, ainsi que de spécialistes de la législation et de la réglementation.

Le domaine est actuellement en développement et en évolution. Il est animé, en particulier dans le secteur des télécommunications, par de nombreuses équipes travaillant sur l'aspect réglementaire en liaison avec les instances nationales et internationales.

### • Introduction

Des campagnes géophysiques utilisant les méthodes électromagnétiques en domaine temporel sont mises en œuvre couramment dans le cadre de projets visant à améliorer la connaissance géologique, hydrogéologique ou pour la prospection de ressources minérales souterraines. En effet, les dispositifs électromagnétiques héliportés (désignés dans le jargon géophysique par l'acronyme HTEM -Heliborne Transient Electromagnetic Methods-) sont très populaires depuis le début des années 2000 pour leur capacité à imager finement la résistivité de la subsurface.

Contrairement aux méthodes géophysiques de magnétisme<sup>(1)</sup> ou de radiométrie<sup>(2)</sup> spectrale gamma qui sont toutes deux passives et enregistrent le signal tellurique naturel, les systèmes électromagnétiques sont actifs et mettent à profit un signal contrôlé émis par un générateur d'ondes électromagnétiques. La méthode HTEM repose sur l'analyse de la réponse du sous-sol soumis à un champ magnétique variable dans le temps.

La question de l'impact potentiel de la mise en œuvre de cette méthode géophysique sur la population et l'environnement se pose pour les ondes émises par les dispositifs électromagnétiques<sup>(3)</sup>.

<sup>1</sup> En magnétisme, les capteurs utilisent une technologie à « pompage optique » à vapeur de Césium stable.

<sup>2</sup> En radiométrie, les détecteurs de rayonnement gamma sont à cristaux d'iodure de sodium.

<sup>3</sup> Les autres capteurs mis en œuvre sont d'utilisation courante en aéronautique (GPS, radio-altimètres, altimètres laser, systèmes de navigation). Les systèmes embarquent également des micro-ordinateurs non spécifiques et leurs périphériques associés (disques, interfaces, cartes WIFI). Tous ces équipements sont normalisés.

- Dispositifs électromagnétiques héliportés

Quelques dizaines de systèmes HTEM sont opérés dans le monde par quelques sociétés géophysiques spécialisées (Fugro-CGG Veritas, Geotech, Skytem, etc.). Il existe environ une demi-douzaine de systèmes différents (DighEM, VTEM, HeliTEM, SkyTEM, entre autres). Chacun est protégé par un ou plusieurs brevets. À l'exception de ce qui concerne le signal géophysique mesuré, les constructeurs communiquent assez peu sur les caractéristiques détaillées de leur émetteur (forme d'onde, spectre de fréquence, diagramme de rayonnement).

Les différents systèmes HTEM utilisent le même principe qui consiste à faire circuler un courant haché dans une boucle de grande dimension jouant le rôle d'antenne émettrice. Les fréquences de base des courants pulsés mis en œuvre sont généralement dans la gamme de quelques 10 kHz. La géométrie de la boucle, les formes d'ondes et les fréquences utilisées varient parfois selon les opérateurs. Pour l'analyse décrite ci-après, la référence choisie est le système SkyTEM dont nous avons la meilleure connaissance pour l'avoir mis en œuvre dans des programmes récents de levés géophysiques en France.

Le dispositif HTEM SkyTEM est présenté en figure 1. Pour cette analyse, nous retiendrons que le système comporte une antenne d'émission électromagnétique constituée d'une large boucle (300 m<sup>2</sup>).

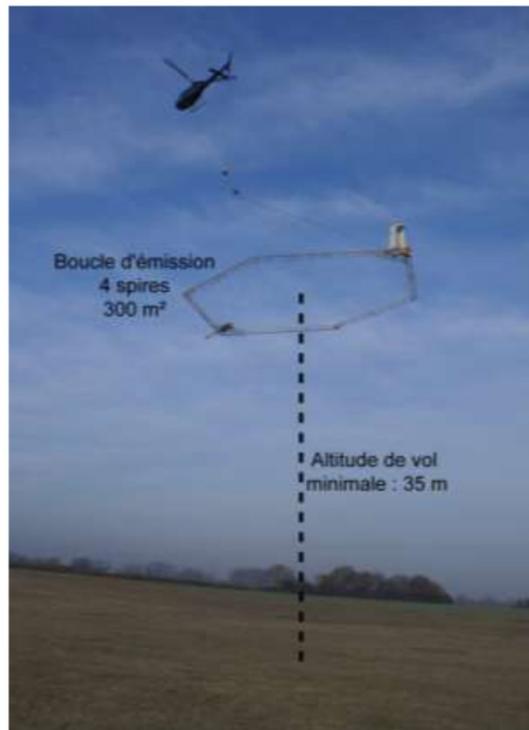


Figure 1 - Le système SkyTEM en plein vol.

En opération, cette boucle-antenne doit être maintenue à une altitude relativement basse (35-50 m de distance au dessus du sol). Afin de couvrir une zone d'étude, celle-ci est héliportée à faible vitesse (45-90 km/h) le long de trajectoires d'un plan de vol préétabli du lever géophysique. Les mesures sont réalisées en continu pendant le déplacement à vitesse stabilisée du système.

Selon les objectifs du lever géophysique, le plan de vol est classiquement constitué d'un réseau de lignes de vol espacées d'environ 400 m (pouvant être localement resserrées).

L'émission électromagnétique est produite en faisant circuler un courant pulsé dit « transitoire » dans la boucle-antenne du dispositif.

La puissance de cette antenne est caractérisée par l'intensité du courant (ex. 110 A), le nombre de spires de la boucle de courant (ex. 4 spires) et sa superficie (ex. 300 m<sup>2</sup>). Le produit de ces valeurs constitue le moment émetteur du dispositif HTEM. Plus le courant injecté est fort ou plus la boucle possède de spires, plus ce moment magnétique sera important.

Le phénomène géophysique d'induction recherché nécessite un champ variable. Il est obtenu par l'utilisation d'un courant pulsé dont la forme d'onde est schématisée en figure 2. L'injection du courant dans l'antenne est hachée, c'est-à-dire séquencée à basse fréquence

### Note technique – Géophysique aéroportée

par des périodes d'arrêt (coupures) durant lesquelles le signal géophysique (la réponse du sous-sol) est enregistré. L'émission est caractérisée par les durées des différentes phases du cycle (ex. 10 ms), l'intensité de crête du palier de courant (ex. 110 A) et la fréquence de répétition du cycle (ex. 25 Hz).

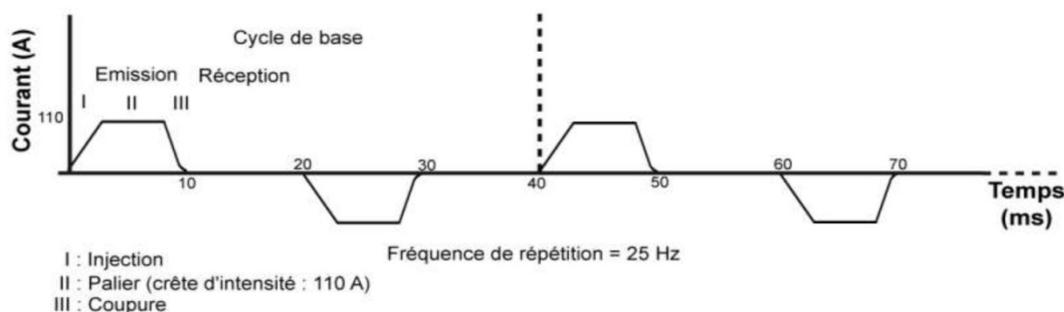


Figure 2 - Forme du courant utilisé en émission HTEM (système SkyTEM).

#### • Évaluation de l'intensité du champ magnétique

L'intensité du champ magnétique produit par une boucle HTEM peut être calculée grâce à la loi de Biot et Savart :

$$B = \mu \frac{IN}{2a} \times \frac{a^3}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

avec  $I = 110$  A (crête d'intensité atteinte),  
 $N = 4$  (nombre de spires),  
 $a = 10$  m (rayon de la boucle),  
 $\mu = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  T.m/A (perméabilité magnétique du vide),  
 $z =$  distance du point d'observation à l'émetteur.

Les valeurs numériques sont celles du SkyTEM. La décroissance du champ magnétique en fonction de la distance à la boucle est illustrée par la courbe rouge de la figure 4.

Pendant un lever géophysique et compte tenu des conditions de mise en œuvre du SkyTEM décrites ci-dessus, tout observateur au sol se situe à plus de 30 m de l'antenne. Le champ magnétique auquel il se trouve soumis est inférieur à  $1 \mu\text{T}$  et décroît rapidement avec la distance (échelle logarithmique, soit  $0,57 \mu\text{T}$  à 35 m, par exemple).

Il est également important de noter que la durée de l'exposition potentielle d'un observateur est extrêmement brève. En effet, le système hélicoptère se déplace et parcourt plus de 500 m en 30 s. L'éventualité de répétition avec le retour de l'appareil lors de la progression du lever est quasi inexistante (passage unique selon le plan de vol).

#### • Comparaison à quelques niveaux de références

Beaucoup d'installations humaines et d'équipements électriques utilisés quotidiennement émettent des champs magnétiques. Le risque associé d'exposition au rayonnement électromagnétique est étudié dans de nombreux domaines (distribution de l'électricité, télécommunications, équipements industriels ou domestiques).

Ces études ont débouché sur certaines recommandations ou sur la normalisation de niveaux limites admissibles d'émission (références bibliographiques ci-après). Dans un grand nombre de cas, les effets des ondes électromagnétiques sont analysés par rapport à l'intensité du

champ magnétique émis (en micro Tesla,  $\mu\text{T}$ ). Afin de disposer d'un ordre de grandeurs, quelques valeurs extraites de ces travaux sont rassemblées dans le tableau 1.

	Intensité du champ ( $\mu\text{T}$ )
Rasoir électrique*	15-1500 (à 3 cm)
Téléphone cellulaire**	1 000 000 (à 2 cm)
Four micro ondes*	4-8 (à 30 cm)
Lave-linge*	0,15-3 (à 30 cm)
Téléviseur*	0,01-0,15 (à 1 m)
Fil électrique (0,5 A)	0,5 (à 20 cm)
Câble d'alimentation électrique des trains (4 x 100 A)	53 (à 1,5 m)
Norme réglementaire pour les lignes à haute tension (50 Hz)***	100
Ligne haute tension**	1 (à 100 m)
Imagerie médicale (IRM)	10 <sup>b</sup>
Champ magnétique terrestre	40
<b>SkyTEM</b>	<b>0,57 (à 35 m)</b>

Tableau 1 - Valeurs caractéristiques de l'intensité du champ magnétique.

Sources : \*\* Office fédéral de protection contre les rayonnements, Allemagne 1999. \*\* Rayonnements électromagnétiques des téléphones portables, cahier documentaire INRS ND 2112-176-99 - N° 176, 1999. \*\*\* AMF-RTE, lignes électriques haute et très haute tension et champ magnétiques de très basse fréquence, septembre 2010.

Le niveau du champ magnétique émis en mode d'acquisition par le SkyTEM, ainsi que l'intensité du champ magnétique terrestre normal, complètent ce tableau.

La lecture de ces valeurs permet de hiérarchiser le niveau d'exposition du public lors d'une campagne géophysique aéroportée au regard des niveaux induits par des objets de la vie courante :

- il est comparable à l'utilisation d'un appareil électrique de 100 W alimenté par un câble électrique ;
- il est bien moins important que la plupart des autres cas cités.

#### • Situation vis-à-vis des seuils d'exposition recommandés

Sur la base des valeurs de référence ci-dessus et en considérant la durée d'exposition extrêmement limitée, il n'apparaît pas que les dispositifs HTEM aient un impact sur la population et l'environnement.

Pour compléter cette analyse, il faut également prendre en compte les fréquences émises par le système. En effet, les recommandations des différentes commissions (ICNIRP<sup>(4)</sup>, OMS<sup>(5)</sup>...) sont toujours modulées selon les gammes de fréquences considérées. Le graphe reproduit en figure 3 fournit une image synthétique de la gamme des niveaux d'exposition recommandés pour le public et les travailleurs dans une large bande des fréquences électromagnétiques.

La position des émetteurs HTEM dans ce spectre n'est pas définie avec précision mais on peut raisonnablement considérer que le rayonnement est dominé par la fréquence de répétition des pics de courant (ex. 25 Hz) ou leurs harmoniques proches qui sont également souvent mises à profit (ex. 200 Hz) en géophysique.

<sup>4</sup> ICNIRP : International Commission on Non-ionizing Radio Protection.

<sup>5</sup> OMS : Organisation mondiale de la Santé.

Note technique – Géophysique aéroportée

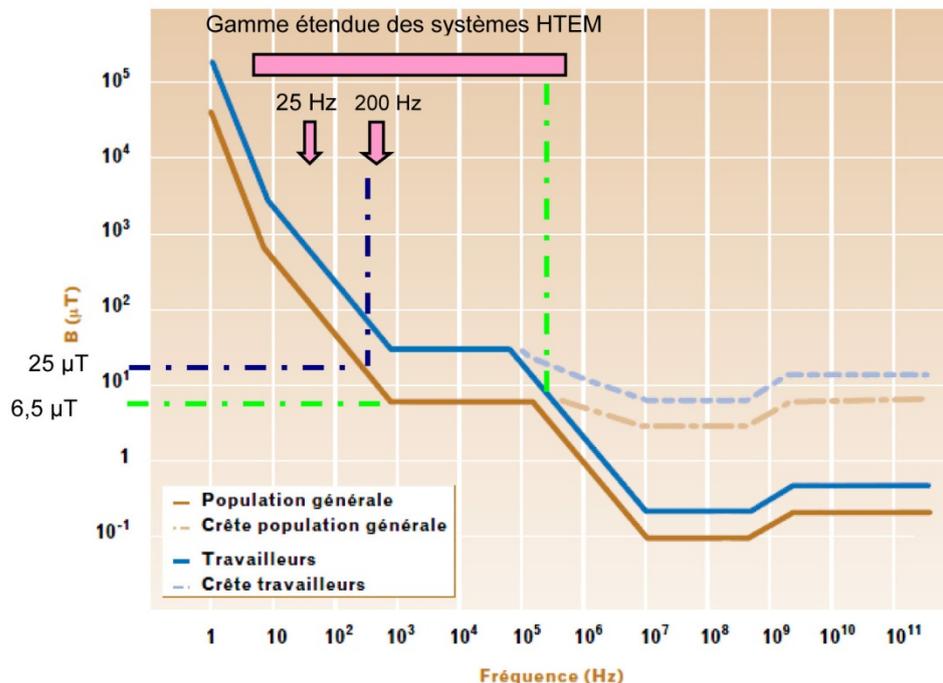


Figure 3 - Niveaux de référence pour l'exposition à des champs magnétiques variables dans le temps.

Source : Hygiène et sécurité au travail – n° 182, 1<sup>er</sup> trimestre 2001, INRS.

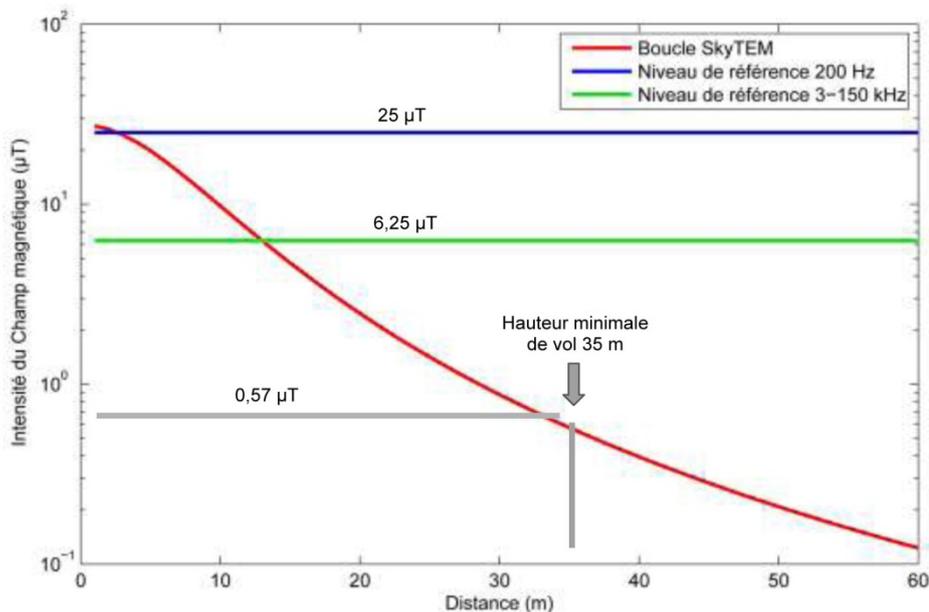


Figure 4 - Intensité du champ magnétique émis par la boucle du système SkyTEM.

Les niveaux de référence à 200 Hz et 3-150 kHz sont également indiqués.

Dans la partie haute du spectre, il faut certainement aussi considérer les phénomènes transitoires intervenant à la coupure du courant. Usuellement les récepteurs géophysiques limitent leur analyse dans la gamme 3-150 kHz. Ces fréquences sont reportées sur la figure 3 et permettent de déterminer de possibles niveaux de références pour les systèmes HTEM (6,25  $\mu$ T dans l'hypothèse la plus conservatrice).

Ce niveau de référence est d'ailleurs du même ordre de grandeur que celui des seuils tolérés en niveaux crêtes aux plus hautes fréquences ( $> 10^7$  Hz). Il constitue donc sans doute un niveau de référence fiable comme limite d'exposition tout public à un appareil électromagnétique de type HTEM.

Les niveaux de référence relevés ci-dessus sont reportés en figure 4 sur le graphe d'intensité du champ magnétique émis par une boucle SkyTEM. Celle-ci apparaît toujours très inférieure (dans un rapport supérieur à 10) aux seuils d'exposition définis précédemment.

Ainsi, on peut conclure qu'une campagne de levés géophysiques aéroportés de type HTEM n'engendre pas de risque d'exposition de la population aux ondes électromagnétiques.

- **Quelques références bibliographiques**

ICNIRP International Commission on Non-ionizing Radiation Protection ([www.icnirp.de/PubEMF.htm](http://www.icnirp.de/PubEMF.htm))

ICNIRP (1998) - Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74(4), p. 494-522.

Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L.32 du Code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques ([www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr))

Organisation mondiale de la Santé ([www.who.int/peh-emf](http://www.who.int/peh-emf))

BRGM - Direction des Géoressources  
3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009  
45060 Orléans Cedex 02  
33 (0)2 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

janvier 2013

## COLLECTION « LA MINE EN FRANCE »

Tome 1 - Industrie minérale et activité minière en France

Tome 2 - Législation et réglementation minière

Tome 3 - Projet minier et parties-prenantes

Tome 4 - Exploration minière

Tome 5 - Développement, financement, construction

Tome 6 - Exploitation minière et traitement des minerais

Tome 7 - Fermeture, reconversion et gestion de l'après-mine

Tome 8 - Exploration et exploitation minière en Guyane

Tome 9 - Le concept de «mine responsable». Parangonnage des initiatives mondiales

Tome 10 - Mines européennes. Quelques exemples de mines de métaux

Tome 11 - Sondages miniers

Tome 12 - Bonnes pratiques de l'activité minière

Tome 13 - Lexique

[www.mineralinfo.fr](http://www.mineralinfo.fr)

