

## **CHAP.I. RAPPELS ET DEFINITIONS**

### **1. Définitions**

La prospection géochimique a pour objectif, dans une région donnée, d'avoir une estimation aussi précise et exhaustive que possible des contenus métalliques en éléments majeurs et/ou traces des roches ou horizons pédologiques qui en dérivent de façon à définir au mieux le fond géochimique naturel et ce qui est concentration anormale d'origine naturelle ou anthropique.

**La géochimie** est la discipline qui étudie la répartition des éléments chimiques, de leur distribution dans les objets du système solaire, de leur origine, de leur nature et de leur comportement au cours des processus géologiques. La méthode de prospection repose sur l'analyse systématique des teneurs (très faibles) en métal recherché, dans la terre superficielle, l'eau de ruissellement ou les feuilles des plantes.

C'est une Science qui étudie l'histoire et le comportement des éléments chimiques qui composent les zones profondes et superficielles du globe terrestre à l'aide des méthodes conjointes de la géologie et de la chimie. La géochimie proprement dite s'efforce d'approfondir les problèmes théoriques que pose l'origine de la répartition des éléments chimiques et de leurs combinaisons dans les diverses couches du globe terrestre.

### **2. Éléments majeurs et éléments mineurs**

L'abondance moyenne des éléments chimiques est très variable dans la lithosphère. Pour les principaux types de roches et de sols, les éléments O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K et Mg, communément appelés «majeurs», représentent près de 99 % du poids total de l'écorce terrestre. Leurs teneurs moyennes respectives y sont comprises entre 50 et 1% suivant la nature des formations. Le titane représente déjà 0,45 % à lui seul des autres éléments dits «mineurs». Les teneurs moyennes de ces derniers vont de quelques centaines de grammes à quelques milligrammes par tonne. Le gramme par tonne (g/t), terme utilisé en recherches minières, correspond au ppm (partie par million); le milligramme par tonne (mg/t) équivaut au ppb (partie par billion, le milliard des Anglo-Saxons). Pour les eaux et les cendres de plantes, les teneurs des éléments mineurs s'expriment généralement en milligrammes par tonne et en microgrammes par tonne.

Les méthodes de la prospection géochimique sont basées sur la connaissance de la distribution des éléments mineurs dans les roches, les sols, les eaux et les plantes, dans le but de déterminer les régions où cette distribution est anormale pour un ou plusieurs éléments, les anomalies pouvant trahir l'existence de gîtes métallifères.

#### **2.1. Fonds géochimiques**

Lorsque les formations naturelles et les sédiments meubles qui les recouvrent, ainsi que les eaux et la flore, ne sont pas touchés par des phénomènes minéralisateurs endogènes ou exogènes, il est possible, après un échantillonnage massif et sélectif, de déterminer, à l'aide de moyens analytiques appropriés, les «fonds géochimiques» régionaux ou locaux, c'est-à-dire les teneurs représentatives des formations étudiées pour certains éléments, calculées par des méthodes statistiques. Par exemple, pour un certain type de roche ou de sol dans une région donnée, les fonds géochimiques peuvent être inférieurs ou supérieurs aux clarkes respectifs des éléments (le Clarke, par définition, est la moyenne arithmétique des résultats d'analyse d'un certain élément dans des échantillons provenant d'une formation donnée de l'écorce terrestre).

#### **2.2. Anomalies géochimiques**

Lorsque, dans certains secteurs, les phénomènes endogènes ou exogènes sont accompagnés de l'apport de certains éléments et du départ de certains autres, l'analyse de roches, de sols, de sédiments pour les éléments en «traces» peut donner des teneurs anormales par rapport aux teneurs de fond géochimique. Ces teneurs anormales constituent des «anomalies lithogéochimiques» (ou simplement géochimiques). Les teneurs anormales, dans les eaux superficielles ou souterraines, sont appelées «anomalies hydrogéochimiques». La présence, dans une région, de teneurs anormalement élevées dans les roches, les sols et les eaux conditionne la présence, dans les plantes croissant dans cette région, d'anomalies «biogéochimiques». Ces dernières peuvent concerner toutes les plantes ou certaines d'entre elles (plantes indicatrices ou concentratrices).

Les anomalies géochimiques peuvent être vraies ou fausses. Les vraies anomalies sont principalement liées aux gisements métallifères proprement dits, à leurs auréoles de dispersion primaire et secondaire ainsi qu'à leurs traînées de dispersion (cf. *Méthodes lithogéochimiques et hydrogéochimiques*), soit suivant la topographie, soit suivant le réseau hydrographique situé à l'aval de la formation minéralisée. Les fausses anomalies proviennent généralement de pollutions artificielles, de concentrations des éléments dispersés par les effets biochimiques, l'évaporation, l'absorption, ou de roches à fond géochimique élevé, telles que les roches ultrabasiques à forte teneur en nickel.

Il est donc nécessaire, dans l'interprétation de tous résultats géochimiques (fonds et anomalies géochimiques) de tenir compte de toutes les données géologiques, structurales, métallogéniques et morphologiques dont on peut disposer sur la région prospectée, ainsi que de tous les facteurs physico-chimiques pouvant les influencer.

## **CHAP.II. STADES (OU ETAPES) DE LA PROSPECTION GEOCHIMIQUE ET BUTS A ATTEINDRE**

### **I. Les stades de prospection**

La prospection géochimique s'applique aux différentes phases de la prospection géochimique en général :

- Reconnaissance générale (ou reconnaissance régionale), éch. 1/500 000 à 1/200 000
- Prospection stratégique : 1/200 000° à 1/50 000
- Prospection tactique ou de détail : 1/50 000 à 1/10 000 (et même plus).

Ces stades sont fondés principalement sur la mise en évidence d'anomalies secondaires.

**1. La reconnaissance régionale**, consiste à parcourir une région peu connue par des itinéraires à large maille et vise à recueillir les premières données de caractère :

- Géographique (réseau hydrographique, relief, voies d'accès,...)
- Géologique (nature des formations rencontrées : sédimentaire ou socle, etc...)
- Pédologique (type d'altération, nature des sols, présence de sédiments de ruisseaux, etc...).

En prospection générale, la géochimie s'applique à la recherche de métaux dont les minéraux sont facilement altérables (Pb, Zn, Cu, Mo, Sb, Hg, V, U...), donc difficilement décelables en prospection alluvionnaire; ou à la recherche de tous les métaux, lorsque les conditions géomorphologiques sont telles qu'elles font craindre de passer à côté des gisements sans les voir, ni même les soupçonner.

Ce pourrait être le cas, par exemple, de gisements appartenant à différents types génétiques se trouvant dans des zones forestières ou d'accès difficile, ou bien recouverts par des couches de sédiments alluviaux, éluviaux, latéritiques, éoliens, glaciaires, ou de formations géologiques plus ou moins épaisses; ou celui de gisements ayant pu donner, dans des régions à relief jeune ou rajeuni, des affleurements visibles, mais dont les minéraux primaires ou secondaires ont été lessivés (Mo, U, V...); ou bien il s'agit de gisements n'affleurant pas actuellement, mais ayant pu affleurer à d'autres époques; ou, encore, de gisements subaffleurements, c'est-à-dire à peine touchés par l'érosion ou seulement sur le point de l'être. Enfin, ce pourrait être le cas de gisements cachés proprement dits, qui n'ont pas subi l'influence de l'érosion et qui peuvent être décelés par ces méthodes dans des régions où les conditions géologiques structurales et métallogéniques sont favorables.

### **2. La Prospection stratégique**

C'est une prospection systématique qui doit donner une information continue sur toute l'étendue de la surface prospectée. Son rôle est de mettre en évidence, dans une région déterminée des zones anormales en relation probable avec des minéralisations.

### **3. Prospection détaillée ou «tactique»**

La prospection détaillée concerne les problèmes les plus particuliers: extension de gisements ou de structures minéralisées en surface et en profondeur; dispersions primaires ou secondaires dans les travaux miniers, permettant de détecter des corps minéralisés au voisinage; recherches de structures particulières par application de méthodes indirectes (étude des éléments mineurs de minéralisations principales: As pour les minéraux arseniés et dans la pyrite située au toit de gisements de stibine; Se et Te dans les «chapeaux de fer» des gîtes sulfurés; Cd dans les roches encaissant les filons de blende; Hg dans les gîtes polymétalliques; Ta, As, Hg, Sb, F, Br, I dans les roches, pour localiser les gîtes par rapport à leur niveau actuel d'érosion).

La prospection détaillée ou «tactique» est aussi une méthode systématique. Elle précise dans les zones des anomalies stratégiques, l'origine de celles-ci, leur extension superficielle et les niveaux de teneur atteints.

Il faut bien noter qu'à ces trois stades on n'obtient par des renseignements de surface, que l'image plus ou moins déformée de l'intersection du gîte avec la surface d'altération : anomalie secondaire.

Dans certains cas, la géochimie pourra être complétée par des opérations plus ponctuelles de reconnaissance en surface : géochimie en tarière, analyses en tranchées, etc....

## II. Type de prélèvements (échantillonnage)

### Introduction

Les prélèvements porteront sur des sédiments de ruisseau, des sols ou des roches. Pour ces trois types, on fait généralement une étude méthodologique préalable pour déterminer la meilleure tranche granulométrique à analyser ou pour voir s'il existe une phase porteuse privilégiée des métaux (hydroxydes, oxydes) qui pourrait être isolée et dont l'analyse permettrait d'obtenir des niveaux de teneurs et des contrastes géochimiques (teneurs anomaux/teneurs fond) plus élevés. Cette étude peut être faite dès le stade de la reconnaissance générale au cours de laquelle on essaie tout les types de prélèvements.

L'échantillonnage effectué le long d'itinéraires et coupe de reconnaissance n'est ni systématique ni tout à fait irrégulier. On s'attachera, dans la mesure du possible, à orienter ces coupes perpendiculairement aux formations et à collecter des prélèvements d'une manière assez continue le long des coupes pour mettre en évidence les variations des fonds géochimiques.

Cette approche régionale est orientée vers la mise en évidence des principales unités géochimiques. Elle permet la sélection des zones à prospector en géochimie stratégique et le choix des méthodes à employer sur ces zones sélectionnées.

1. **Dans le cas d'une prospection stratégique**, on prélève la plupart du temps des sédiments de ruisseau (stream-sediments), technique, qui, à l'heure actuelle, paraît la mieux adaptée. On peut toutefois être conduit pour différentes raisons, à prélever partiellement des échantillons. Il faudra alors augmenter la densité d'échantillonnage et prélever les sols en zones basses plutôt qu'en zones de crêtes. Pour certains métaux, particulièrement ceux dont les minéraux sont sous forme d'oxydes (W, Sn) l'analyse de concentré de batée couplée avec son examen optique fournit des résultats moins dispersés à des niveaux de teneurs plus élevés.

2. **Toute prospection tactique** est basée sur l'échantillonnage en sol, normalement à la base de l'horizon A. La présence d'une altération particulière, cuirasse latéritique, ou d'un recouvrement plus ou allochtone peut obliger à l'emploi de techniques spéciales de prélèvement : par exemple prélèvement des fractions grossières du sol en pays désertique à recouvrements éoliens possibles, prélèvement dans l'horizon C à la tarière en cas de recouvrements allochtones caractérisés.

## III. Densité de prélèvements

La densité d'échantillonnage varie suivant l'échelle de la prospection et suivant la taille des cibles recherchées. En prospection stratégique on travaille généralement à une échelle variant de 1/200 000 à 1/50 000. L'échantillonnage se fait à large maille avec une densité de 1 à quelques prélèvements au Km<sup>2</sup>, s'il s'agit de sédiment de ruisseau.

La notion d'espacement de prélèvements suivant le réseau doit céder le pas à la notion de densité moyenne, beaucoup plus importante pour obtenir une information continue. Dans le cas de prélèvements mixtes sols et sédiments de ruisseau, la densité devra être augmentée. Quoi qu'il en soit, une densité de prospection stratégique ne devrait pas descendre d'un Km<sup>2</sup>. Une telle maille vise à « accrocher » directement des anomalies liées à des concentrations minérales. Cette densité permet en outre une visualisation satisfaisante du fond géochimique local. Tout point anomal, même isolé, devra être pris en considération.

Au stade tactique, les prélèvements étant fait suivant une grille régulière, on ne parlera plus de densité au Km<sup>2</sup>, mais de maille. Celle-ci sera variable en fonction du métal recherché. Une maille carrée 200m x 200m est normalement suffisante pour une première localisation d'anomalies Pb, Zn ou Cu, mais il faudra choisir une maille 50m x 50m dans le cas d'anomalies Sb ou W. Un resserrement ultérieur est toujours préférable à un « sur maillage » initial.

## IV. Analyses

C'est un poste essentiel, et le choix d'une technique plutôt qu'une autre pourra changer totalement l'efficacité et la signification de la campagne envisagée.

La technique utilisée doit être à la fois sensible, reproductible et peu coûteuse.

Deux grandes stratégies se dégagent :

- Adopter des méthodes simples permettant une utilisation sur le terrain par exemple en camion laboratoire,
- Choisir une technique plus sophistiquée, disponible dans un laboratoire central.

Toutes les deux ont leurs avantages et leurs inconvénients.

Il existe de nombreux laboratoires effectuant commercialement des analyses de type prospection géochimique, auxquels l'on peut sous-traiter les travaux de dosage. Une précaution essentielle sera néanmoins d'introduire des étalons à teneur connue, afin de contrôler à la fois la reproductibilité et le niveau des teneurs des analyses fournies par le laboratoire.

L'application de techniques d'analyse multiéléments a modifié les critères de choix, elle est de plus fréquente au stade de la prospection stratégique.

Au stade de la prospection tactique, le problème est normalement beaucoup mieux défini et seul un petit groupe d'éléments sera analysé, cependant que certains autres que ceux que l'on recherche directement sont très utiles pour juger du caractère métallogénique ou non des anomalies. Par exemple, Ni sera systématiquement analysé dans une prospection tactique pour Cu ; de même As, Ag, Mo, Cd, Sb sont des indicateurs intéressants pour les prospections Pb-Zn.

Au stade de la reconnaissance d'indices et spécialement s'il s'agit d'étudier des auréoles primaires à partir de la géochimie en roche, des analyses multiéléments seront indispensables : intérêt primordiale des variations des éléments majeurs et intérêt des halos métalliques composites permettant dans certains cas de visualiser la polarité et le niveau d'érosion d'un gisement.

Dans le cas d'études de chapeau de fer, ce sont les éléments tels que Sn, Bi, Sb, Ag, Mo,....qui permettent de faire un diagnostic sur la valeur de la minéralisation. Il faudra même dans certains cas avoir recours à des techniques d'analyse en infra-traces pour Au, Ag, etc...

### **Méthodes d'analyse les plus courantes**

Deux techniques d'analyses multi-éléments sont utilisées le plus couramment :

- Spectrométrie d'émission à partir d'une source plasma :
  - 12 éléments prioritaires : Cu, Pb, Zn, Ag, W, Sb, Ba, Ni, Mn, Fe, Cr, Sn ;
  - 10 éléments utiles, soit en tant qu'éléments accompagnateurs, soit pour la cartographie géochimique : V, P, As, Mo, B, Be, Cd, Co, Ni, Y.
- Spectrométrie d'émission optique à lecture directe : quantomètre qui dose simultanément 7 éléments majeurs et 26 éléments traces (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O-Mn, P, Ti, Zr, B, Ba, Sr, La, Y, Nb, Pb, Zn, Cu, Ag, Cd, As, Sb, Bi, Li, Sn, W, Mo, Cr, Co, V, Ni).

Pour les analyses courantes mono-élémentaires, la technique la plus employée est l'Absorption Atomique. Les résultats d'analyses sont généralement donnés en p.p.m. (partie par million, c-à-d gramme par tonne), parfois en p.p.b. (partie par milliard). Pour les éléments majeurs, ils sont donnés en %.

#### *Recommandation importante*

Les différentes techniques d'analyse ayant des sensibilités distinctes selon les métaux analysés, il est absolument impossible de comparer des résultats provenant de techniques différentes.

Une campagne stratégique devra par conséquent être exécutée entièrement avec la même technique analytique.

Enfin, pour s'assurer de la reproductibilité et de la précision des analyses, on intercalera des échantillons doubles ou des échantillons témoins à raison d'environ 1 échantillon toutes les 100 analyses. Les échantillons doubles de contrôle seront obtenus soit par double prélèvement, soit par quartage d'un échantillon abondant. Les échantillons témoins se feront par l'intermédiaire d'étalons géochimiques internes.

Il conviendra de prévoir des numéros sans échantillon pour y placer les témoins.

## **CHAP.III. METHODES DE RECHERCHES**

### **A. Méthodes lithogéochimiques**

Les méthodes lithogéochimiques sont fondées sur la mise en évidence d'auréoles de dispersion primaires de gisements ou de corps minéralisés, ainsi que de leurs auréoles secondaires et traînées de dispersion.

Hypothèse : la mise en place d'un corps minéralisé exerce une influence sur son encaissant sous forme d'une auréole (halos de dispersion).

Elle consiste alors à faire un échantillonnage de roches selon des profils perpendiculaires aux structures géologiques afin de mettre en évidence les faciès porteurs de la minéralisation.

Elle se pratique en surface, dans les tranchées, sondages et galeries afin de délimiter les corps minéralisés, établir la zonalité géochimique et gîtologique du site minéralisé.

### B. Prospection géochimique de Sol (Métallométrie)

Méthode appliquée dans les zones recouvertes par un sol résiduel,  
Se base sur l'analyse chimique des matériaux de sols prélevés dans l'horizon B,  
L'échantillon prélevé est tamisé sur place pour obtenir la fraction granulométrique comprise entre 75 et 180 µm.

Les objectifs de la prospection géochimique au sol :

- connaître la présence d'éléments métalliques dans le sol, au préalable à toute autre opération,
- permettre d'identifier un fond géochimique naturel dans le sol susceptible de révéler des indices de minéralisation en profondeur.

Pour cela, on effectue :

- soit un prélèvement de sol, au moyen d'une petite pelle ou d'une tarière à main.
- soit la récolte de fragments de roches en « pierres volantes » visible à la surface.

Les échantillons recueillis sont ensuite analysés afin de connaître la présence d'éléments métalliques et d'avoir une première idée de leurs teneurs.

Une carte est ensuite établie afin de connaître un état initial de la chimie du sol (métaux contenus en quantité suffisante) et de cerner des anomalies qui révèlent des objets minéralisés en profondeur (fig.4.5).

On peut également réaliser une carte par élément chimique analysé.

Grâce à ces cartes on pourra positionner les sondages à réaliser pour connaître, plus précisément et en profondeur, l'origine des anomalies détectées.

### C. Prospection géochimique alluvionnaire

Elles sont appliquées aux sédiments de ruisseaux. Les échantillons alluvionnaires sont prélevés dans le lit des cours d'eau. Ils sont de deux types : les sédiments de ruisseau (" stream sediments ") et les minéraux lourds formant la partie dense des graviers alluvionnaires. Les premiers se trouvent souvent au fond des cours d'eau et sont formés par des boues ou matériaux noirâtres très fins. Les seconds sont des graviers lavés à la batée jusqu'à obtenir un concentré final comprenant la plupart des minéraux denses tels que silicates ferro-magnésiens d'origine magmatique - pyroxènes, micas, amphiboles, olivine, sphène – ou de genèse métamorphique - andalousite, disthène, sillimanite, grenat - ou encore et le plus souvent des oxydes divers - magnétite, ilménite, goethite, spinelle difficilement altérables.

Une fraction légère (quartz, minéraux felsiques, apatite, monazite, ...) trop importante peut être complètement éliminée par séparation aux liqueurs denses en laboratoire.

Les " streams " sont placés dans des sachets en plastique résistants avant d'être numérotés et envoyés pour analyses.

#### Alluvionnaire et Stream-sediment

Dispersion des minéraux et des éléments chimiques par altération des corps minéralisés et des roches encaissantes et leur entraînement vers le ruisseau.

Objectif : recherche des minéraux lourds (Au, Ag, Pt, Pd, Sn, W, Zr.....)

Se base sur l'analyse chimique et minéralogique des concentrés alluvionnaires (minéraux lourds) préparés par panage des sédiments de ruisseaux prélevés en aval des cours d'eaux. Les ML proviennent de la fragmentation des roches, ils sont transportés et déposés par les cours d'eau sous forme de grain mono ou polyminéral. Durant le transport, ces minéraux ont les propriétés qui leurs permettent de résister à l'abrasion mécanique et à l'altération chimique.

Densité des minéraux

Lourds		Légers	
Or natif	19,3	Calcite	2,7
Platine	19	Anhydrite	2,9
Argent	10,5	Ankérite	3
Scheelite	6	Béryl	2,7
Wolframite	7,4	Chrysocolle	2,1
Sylvanite	8,1	Feldspath	2,6
Covellite	4,6	Gypse	2,3
Cinabre	8,1	Halite	2,1
Diamant	8,52	Kaolin	2,26

Uraninite	9,4	Sylvite	2
-----------	-----	---------	---

### Echantillonnage :

**Cible :** alluvions du lit vif du cours d'eau

Matériel utilisé

Tamis : tamisage de l'échantillon, collecte de la fraction < 2mm

Pannage de l'échantillon : concentré alluvionnaire au fond de la batée.

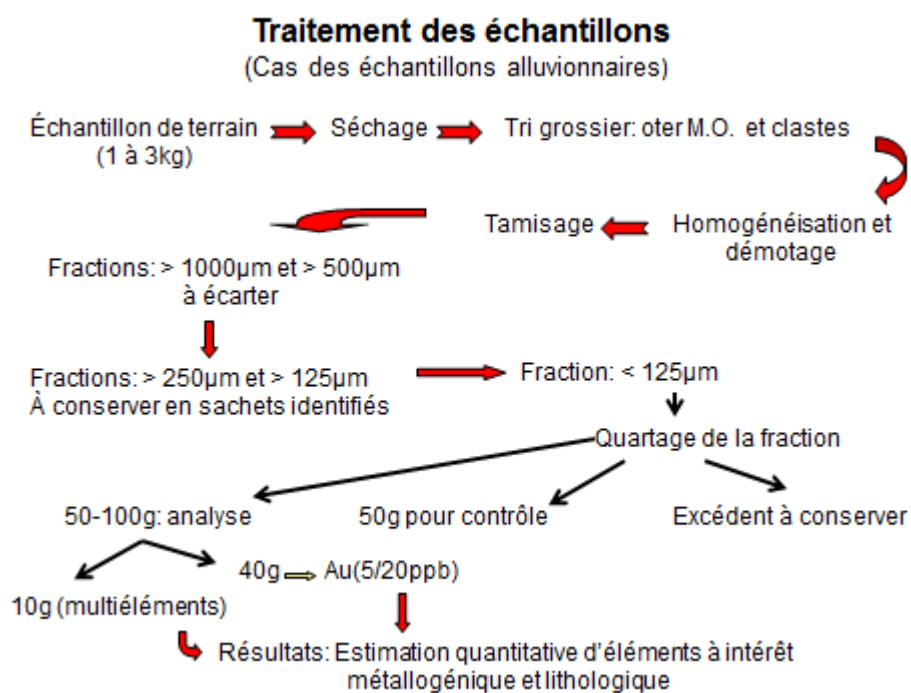
### Stream-sediment

Objectif : recherche de métaux de base (Pb, Zn, Cu, Sb.....)

- Se base sur l'analyse chimique des sédiments fins de ruisseaux (argile, dépôt silteux...) prélevés en aval de cours d'eau. Les éléments chimiques proviennent de l'altération chimique des roches, puis transportés par les cours d'eau. Ces éléments sont fixés par les argiles, les oxydes et les hydroxydes de fer....

- L'échantillon prélevé est tamisé sur place pour obtenir la fraction granulométrique inférieure à 180 µm

- Les méthodes alluvionnaires et stream-sediment sont complémentaires.



### D. Méthodes hydrogéochimiques

Les méthodes hydrogéochimiques sont fondées sur la mise en évidence d'auréoles et de traînées de dispersion dans les eaux superficielles ou souterraines.

La formation d'auréoles de dispersion hydrogéochimiques résulte de divers processus physico-chimiques auxquels est soumis un gîte. Selon la composition du corps minéralisé, la nature de la formation encaissante et les conditions climatiques, les étapes d'altération du gîte et de son milieu sont différentes. Pour les gisements essentiellement composés de sulfures (blende, galène, pyrite, chalcopryrite, etc.), les solutions d'acide sulfurique (formées par l'action de l'oxygène de l'air sur les sulfures, puis de l'eau sur les produits d'oxydation) jouent un rôle très important dans leur dégradation progressive. Pour les gîtes à oxydes (cassitérite, wolframite, etc.), l'influence des phénomènes d'hydrolyse et de solutions aqueuses chargées en acide carbonique provenant de l'air est prédominante. Si les gîtes à sulfures sont situés à grande profondeur et en présence d'eaux captives, la solubilisation de minéraux sulfurés par processus électrochimiques permet la formation d'auréoles hydrogéochimiques.

Les auréoles et les traînées de dispersion hydrogéochimiques ont une zonalité horizontale qui provient de la concentration de certains éléments dans les eaux baignant le gîte ou proches de celui-ci, puis de l'abaissement des teneurs, au fur et à mesure de leur éloignement. Le pouvoir de migration des éléments dans les eaux dépend principalement des propriétés oxydo-réductrices et acido-basiques du milieu.

La migration verticale, correspondant à la zonalité verticale des éléments d'une nappe à une autre, peut se faire soit par diffusion ou capillarité, soit par décharge, si la nappe minéralisée est en charge. Les auréoles hydrogéochimiques peuvent être cachées ou affleurantes et possèdent des indicateurs directs (éléments principaux du gîte) et indirects (mis à part les éléments alcalins, ce sont les ions  $S^{4-}$ ,  $Cl^-$ ,  $HC^{3-}$ , le pH, la minéralisation totale, la résistivité).

Les teneurs du fond hydrogéochimique en éléments métalliques (alcalins exceptés) sont généralement exprimées en mg/t. Les teneurs anormales dépassent rarement 10 g/t, exception faite pour les teneurs provenant de prélèvements d'eau particuliers effectués, par exemple, dans les travaux miniers ou dans les sondages à proximité des corps minéralisés. Les anomalies les plus intenses se trouvent dans les zones de forte oxydation.

La dimension des anomalies est de l'ordre de quelques centaines de mètres (de 400 à 600 m). Leurs traînées, dans les cas favorables, se font sentir sur quelques kilomètres à partir de l'origine de la minéralisation.

Outre les fausses anomalies, qui sont nombreuses et dues à la précipitation de certains éléments (par suite du changement du pH des eaux, des effets de décharge des nappes minéralisées en charge et de la concentration des éléments par effets biochimiques), les désavantages de la recherche hydrogéochimique sont représentés par la distribution irrégulière ou le manque de points d'eau dans certaines régions, le changement, dans le temps, de la teneur des éléments dans les eaux – nécessitant des observations spéciales de leur régime – et la difficulté d'interprétation et d'évaluation des anomalies (par suite de leur très faible teneur). Malgré tout, les avantages de la recherche hydrogéochimique restent importants: profondeur d'investigation et étendue de la dispersion.

#### **E. Méthodes biogéochimiques**

Les méthodes biogéochimiques sont fondées sur le lien entre la composition chimique, la morphologie des organismes végétaux ou animaux, et leurs associations, et la composition chimique de leur milieu nourricier.

Les *méthodes géobotaniques* reposent sur la recherche de plantes indicatrices. Le lien entre la composition chimique des plantes et celle des roches, des sols qui en dérivent et des eaux est loin d'être simple. Elle est influencée par une série de facteurs dont les principaux sont: la teneur habituelle en éléments du type de plante considéré; l'irrégularité de la distribution des éléments dans les différentes parties de la plante (racines, feuilles...); l'âge de celle-ci; les conditions climatiques; la dépendance des teneurs d'un élément donné dans les plantes par rapport à leur composition totale et aux types de sols sur lesquels elles croissent (ainsi, certaines plantes, appelées «concentratrices», s'enrichissent sélectivement en certains éléments indépendamment de la teneur de fond du milieu environnant).

Ces divers facteurs, dont il faut tenir compte, font que les recherches géobotaniques sont plutôt délaissées au profit des recherches lithogéochimiques, plus simples.

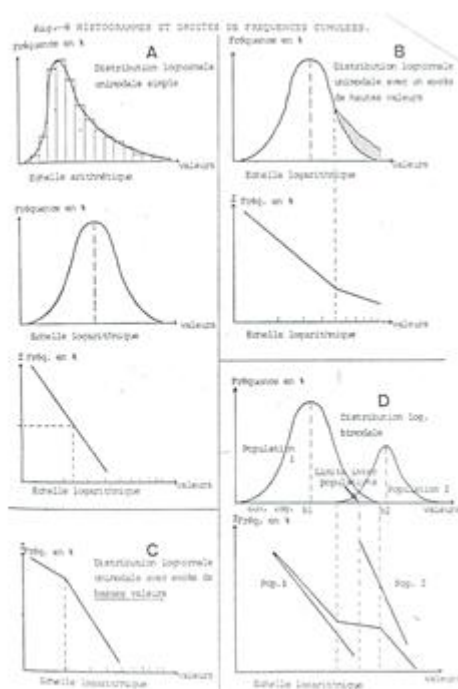
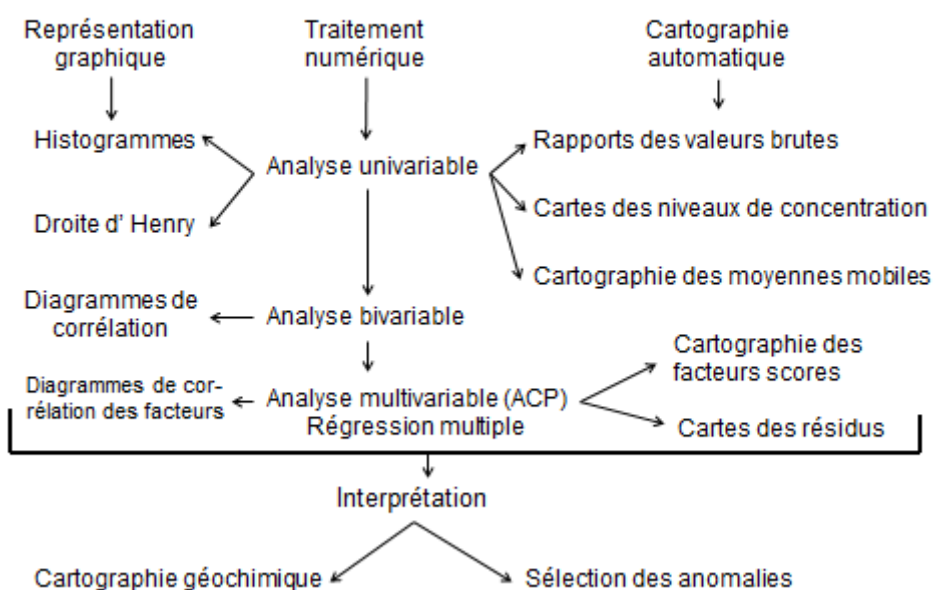
Néanmoins, dans certains cas (zones humides où les sols sont ou peuvent être lessivés ou drainés en profondeur, régions semi-arides où le recouvrement par les formations allochtones est important), l'échantillonnage des plantes à système racinaire profond (de 15 à 20 m) peut apporter de bonnes informations. D'autre part, la présence de corps minéralisés donnant lieu à des teneurs élevées dans les sols peut amener des modifications dans les particularités biologiques locales, telles qu'un changement dans la composition des associations, la croissance de plantes spécifiques (indicatrices), l'atrophie, le gigantisme.

#### **F. Méthodes atmogéochimiques**

Les méthodes atmogéochimiques (ou atmochimiques) font partie des méthodes directes pour la recherche de minéraux radioactifs, de pétrole, de gaz naturel, de charbon ou de mercure (par les émanations respectivement de radon, d'hydrocarbures et de vapeurs de mercure). Elles peuvent être «aéroportées» ou employées directement au sol, selon que les éléments sont analysés dans l'air de l'atmosphère ou qu'ils le sont par pompage, dans l'air contenu dans le sol ou diffusé en surface.

Ces méthodes demandent des moyens d'analyse extrêmement sensibles et donnent de bons résultats.

## Traitement des données



### Traitement graphique des données d'analyses

Histogramme et courbes de fréquences cumulées

Distributions unimodale et bimodale

Estimation du seuil d'anomalie (Threshold)



## b. Cartographie géochimique

Après le traitement statistique des données et le traitement graphique, on détermine le seuil d'anomalie (threshold) à duquel on établit les teneurs anormales qui serviront à la cartographie géochimique (localisation des anomalies)



## References bibliographiques

- ANDREWS - JOHNES D. A. (1968) - The application of geochemical techniques to mineral exploration. *Colo. School Mines, Mineral Indust. Bull.* 11, n° 6.
- Annels, A.E. (1991) - Mineral deposit evaluation: A practical approach, Chapman and Hall, London.
- Artignan D. & Viallefond L. (1995) - La géochimie. Applications dans les domaines de la prospection et de l'environnement, cas du BRGM. *Rev. Industr. Minér., Fr.*, oct. 1995, p.43-52.
- Artignan D. (1986) - Fiche technique : étude minéralogique des fonds de batée. Traitement statistique des résultats. Traitements statistiques des données chimiques acquises sur les fonds de batée. Note SGN/GMX n° 936, 6 p.
- Barbier J. & Chéry L. (1995) - Valorisation des données de l'Inventaire géochimique pour l'identification de risques de teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux. (Vol.) - Étude de faisabilité. Rapport R 38721.
- Barbier J. & Wilhelm E. (1978) - Superficial geochemical dispersion around sulphide deposits: some examples in France. *J. Geochem. Expl.*, 10, p. 1-39.
- Beguinet J., Sakowitsch W., Barbier J. & Wilhelm E. (1979) - Un quart de siècle de prospection géochimique au BRGM. *Bull. BRGM, Sect. II*, n° 2-3, p. 53-64.
- Boucetta M. & Fritsche M. (1979) - Utilisation d'un plasma conducteur associé à un spectromètre à échelle pour l'analyse multi-élémentaire des échantillons géochimiques. *Bull. BRGM, sect. II*, n° 2-3, p. 65-74.
- Callier L., Husson Y. & Leduc C. (1992) - Synthèse du domaine mancelien en Basse-Normandie, annexe 1 : les données géochimiques et minéralogiques alluvionnaires. Rapport BRGM, R 35284.
- Chaussier J.B. (1981) - Manuel du prospecteur minier. Ed. BRGM, Manuels et méthodes, n° 2.
- Darmendrail D., Baize D., Barbier J., Freyssinet Ph., Salpeteur I. & Wavrer Ph. (2000) - Fond géochimique naturel. État des connaissances à l'échelle nationale. Rapport BRGM, INRA RP-50518-Fr., 93 p.
- Evans, A.M. (1995) - Introduction to mineral exploration, Blackwell scientific publications, Oxford,
- Greffié C. (1998) - Les couvertures géochimiques régionales. Étude bibliographique sur les méthodologies et mesures du fond géochimique. Rapport BRGM DR/MGGINT98/04, 12 p.

- Guigues J. & Desvignes P. (1969) - La prospection minière à la batée dans le Massif Armoricaïn : méthodes, résultats, atlas minéralogique, Paris Éd. BRGM, Mémoire BRGM n° 71, 171 p.
- Holmes C.W. (1982) - Geochemical indices of fine sediments transport North west Gulf of Mexico. *Jour. Sed. Pet.*, vol. 52, n°1, 307-323.
- Husson Y. (1997) - Cartographie des concentrations et des fonds géochimiques métalliques connus du massif des Vosges. Rapport BRGM DRIRE R39979, 21 p.
- JENNY E. A. (1968) - Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn concentrations in soils and water : the significant role of hydrous Mn and Fe oxides. *Amer. Chem. Soc., Advances In Chemistry series*, n° 73, p.337-387.
- Lambert A. (1990) - Synthèse régionale du Sud-Limousin, analyse des données des prospections géochimiques et alluvionnaires stratégiques (annexe 4). Rapport BRGM 31814 DEX-DAM-90.
- Laville-Timsit L. & Zeegers H. (1984) - Rôle de la granulométrie : comparaison des réponses géochimiques obtenues sur les mêmes échantillons à partir de l'analyse des fractions <125 $\mu$  et <63 $\mu$ . Rapport BRGM 84 SGN 352 GMX, 7 p.
- Laville-Timsit L. (1984) - Essai de prise en compte spécifique de la dispersion chimique des métaux pour la recherche de gisements cachés. Note BRGM GMX, n° 1003, Fév., 847 p.
- Laville-Timsit L., Artignan D., Husson Y., Gandolfi J.M. & Delbos R. (1993) – Cartographie régionale des concentrations en métaux lourds dans les sols. Essai de corrélation avec la qualité des eaux souterraines. Phase III : Interprétation et synthèse. Rapport BRGM R 36862, 12 p.
- Lecomte P. (1984) - Rôle de la granulométrie : comparaison des réponses géochimiques obtenues sur les mêmes échantillons à partir de l'analyse des fractions < 125  $\mu$  et < 63  $\mu$ . Rapport BRGM 84 SGN 352 GMX, 7 p.
- Lepeltier C. (1969) - A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Eco. Geol.*, Vol. 64, 538-550.
- LEVINSON A. A. (1974) - Introduction to exploration geochemistry. Calgary, Alberta, Canada, 1ère édition, p. 1-614.
- LEVINSON A. A. (1980) - Introduction to exploration geochemistry. Calgary, Alberta, Canada, 2ème édition, p. 615-924.
- Levinson A.A. (1980) - Exploration geochemistry. Second Edition, vol. 2, Wilmette, Illinois, 615-924.
- MARMI R. (1989) - Méthodologie de prospection géochimique appliquée à la recherche de gîtes polymétalliques du type Pb-Zn, cas du Djebel Bou Arif-Batna (Algérie), *Mémoire de Magister en Géologie minière*, Univ. Constantine, 184p.
- Moal Y. & Pinault J.L. (1979) - Utilisation de la spectrométrie d'émission sur poudres pour l'analyse multi-élémentaire des échantillons géochimiques. *Bull. BRGM*, sect. II, n° 2-3, p. 75-84.
- Mrna F., Cadek J. and Pavlir (1979) - Methods of geochemical prospecting. Geological Survey, Prague, 156 p.
- Peters, W.C., (1987) - Exploration and mining geology. John Wiley and Sons, deuxième édition, 685p
- Reeves R.D. and Brooks R.R. (1979) - Trace elements of geological materials, John Wiley et Sons, New York, 187p.
- Roquin C. (1979) - Analyse structurale de la carte géochimique en prospection régionale par traitement numérique des données. *Bull. BRGM*, sect. II, n° 2-3, p. 161-174.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E., et Webb, J.S., 1979- Geochemistry in Mineral Exploration .Academic Press, 657p. Manuel de géochimie d'exploration.
- Sakovitsch W. (1963) - Review of geochemical prospecting. *Ann. des Mines*, Fr., vol. 11, p. 687-696.
- Salpeteur I. & Itard Y. (2000) - Test d'échantillonnage géochimiques à faible densité des sols, des sédiments de ruisseaux et des limons d'inondation pour une estimation des fonds géochimiques naturels dans la zone de La Châtre (Indre). Rapport BRGM RP 50327-Fr, 133 p.
- Salpeteur I., Itard Y., Mouvet C. & Baize D. (1999) - Comparison of various methodologies (Stream sediments at various densities, overbank sediments, soils) for the determination of baseline

concentrations of trace elements at the regional scale. 2<sup>nd</sup> Conference Environmental geochemical baseline mapping in Europe. Vilnius Lithuania, Abstracts, p. 75 80.

Steinberg.M et al, 1979- Géochimie : Principes et méthodes, Ed Doin

Wilhelm E. & Laville-Timsit L. (1977) - Optimisation des méthodes de prospection géochimiques régionales. Rapport BRGM SGN GMX GCA, n° 107, 27 p.

Wilhelm E. & Zeegers H. (1984) - La prospection géochimique au BRGM. Techniques opérationnelles et recherches méthodologiques. *Géol. Jb*, Dtsch A75, p.49-75.

Wilhelm E. (1981) - Application industrielle de la géochimie multi-éléments, outil de la recherche minière systématique. Résumé, congrès de l'Industrie minière. Metz, 1981, 12 p.