

GEOCHIMIE APPLIQUÉE

(Professeur Ramdane MARMI)

M2 : Géologie de l'environnement

2020/2021

Chapitre 1 : Définitions et notions générales

1. Introduction

La Géochimie est l'étude de la chimie de la terre ou du moins de ses enveloppes accessibles à l'homme. Pour y parvenir, elle met en œuvre les outils et les concepts de la chimie et de la géologie. C'est une discipline des géosciences. Elle étudie la composition chimique et isotopique des matériaux géologiques (roche, eau, sol, gaz, minéraux...) et plus particulièrement, le comportement et le caractère des différents éléments dans l'écorce terrestre, leur migration, dispersion, concentration et abondance.

La géochimie offre de nos jours, une vision globale de l'abondance, de la distribution et du comportement des éléments chimiques dans la plupart des processus géologiques qui ont marqué notre planète. Elle permet une classification et une compréhension de plus en plus fine de la genèse et de la dynamique des systèmes géologiques et des cycles. La connaissance de ces cycles offre la possibilité de reconstituer l'histoire de la terre, de comprendre les phénomènes et de mieux gérer les ressources et les matériaux terrestres.

La géochimie occupe de nos jours une place privilégiée dans l'exploration minière.

Les méthodes de recherches géochimiques reposent sur les travaux effectués depuis la fin du XIX^e siècle par de nombreux savants appartenant à différentes disciplines des sciences de la Terre (pétrographie, minéralogie, métallogénie, géochimie, etc.).

Ces travaux ont porté notamment sur l'abondance et le comportement des éléments chimiques, sur leurs associations et les lois qui les régissent dans les différentes géosphères, sur les fluides minéralisateurs, sur la spécificité de la formation des gîtes minéraux dans des conditions géologiques bien déterminées.

2. Définitions

2.1. La **géochimie** est la science qui étudie l'abondance, la distribution, la migration et l'accumulation des éléments chimiques dans la Terre (lithosphère, atmosphère, biosphère et hydrosphère).

2.2. Le **Clarke** est la teneur moyenne d'un élément chimique dans la lithosphère solide.

2.3. **Fond géochimique** ou *Background* ou *Teneur de fond* : c'est l'abondance normale d'un élément dans un environnement étudié en dehors de tout apport extérieur. On parle de Fond locale (ou Local Background) lorsque cette teneur se limite à une zone bien délimitée et de Fond régional, lorsque cette teneur couvre une grande étendue et ayant une certaine unicité géochimique.

2.4. **Teneur** : c'est le contenu (ou concentration) exact déterminé d'un élément ou d'une substance dans un corps donné. Elle est exprimée en : g/t, en ppm (partie par million), mg/t ou en ppb (partie par milliard ou *per billion*) ou en % pour les éléments majeurs. (1 % = 10 000 000 ppb ; 1 ppm = 1 000 ppb)

3. 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 p. 100 du poids total de l'écorce terrestre.

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).

Éléments (majeurs)	O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg
CLARKE (1916)	47,5	28,8	8,0	4,6	3,5	2,4	2,5	2,2
GOLDSCHMIDT (1926)	46,6	27,7	8,1	5,0	3,6	2,8	2,7	2,1

4. Anomalie géochimique

Une anomalie peut être définie comme toute teneur plus élevée ou plus basse (anomalie négative) que le fond géochimique. Son origine n'est pas exclusivement métallique mais provenir de *pollution* tout à fait étrangère comme les pollutions en Cu par le sulfatage des vignobles, de *contaminations* par les déblais d'une exploitation minière ancienne ou récente. Il existe enfin des anomalies dites formationnelles provoquées par un élément lié de façon tout à fait préférentielle à une formation géologique déterminée (Cu des roches basiques, Pb-Zn des dolomies) mais sous une forme minéralogique (silicates à Cu) ou gîtologique (dispersion fine) qui ne le rend pas économiquement récupérable.

Cette distinction en anomalie « vraie » et anomalie « formationnelle » ou de pollution est un des objectifs majeurs du géochimiste.

5. Dispersions

Deux types de dispersion sont à envisager :

5.1. *Une dispersion primaire* liée aux phénomènes de mise en place de la concentration minérale, comme par exemple l'altération hydrothermale. L'étude des *auréoles* (halos) *primaires* ainsi formées est utile dans la reconnaissance de gisements et se fait au moyen de prélèvements de roches (carottes de sondage, cuttings). Des éléments caractéristiques dits « traceurs » sont choisis soit parmi les éléments majeurs de la roche encaissante, soit parmi les éléments métalliques de la minéralisation et permettent de tracer des auréoles et de déterminer des gradients et des polarités dans l'environnement d'un gîte.

5.2. *Une dispersion secondaire* liée aux phénomènes d'altération superficielle et de géomorphologie.

Cette dispersion, à la fois mécanique et chimique, à partir du stock métal déstabilisé dans la zone d'oxydation, provoque des *auréoles* et *trainées secondaires* qui couvrent une surface plus grande que l'intersection par la surface d'érosion d'une concentration minérale cachée par des recouvrements divers (fig. 4.1). Dans tous les cas de prospection stratégique ou tactique, ce sont les *auréoles secondaires* que la prospection géochimique cherche à mettre en évidence par l'analyse chimique des prélèvements de sols, de sédiments de ruisseau ou de roche plus ou moins désagrégée.

Dans certaines conditions, des éléments associés dans un gisement pourront avoir des mobilités totalement différentes.

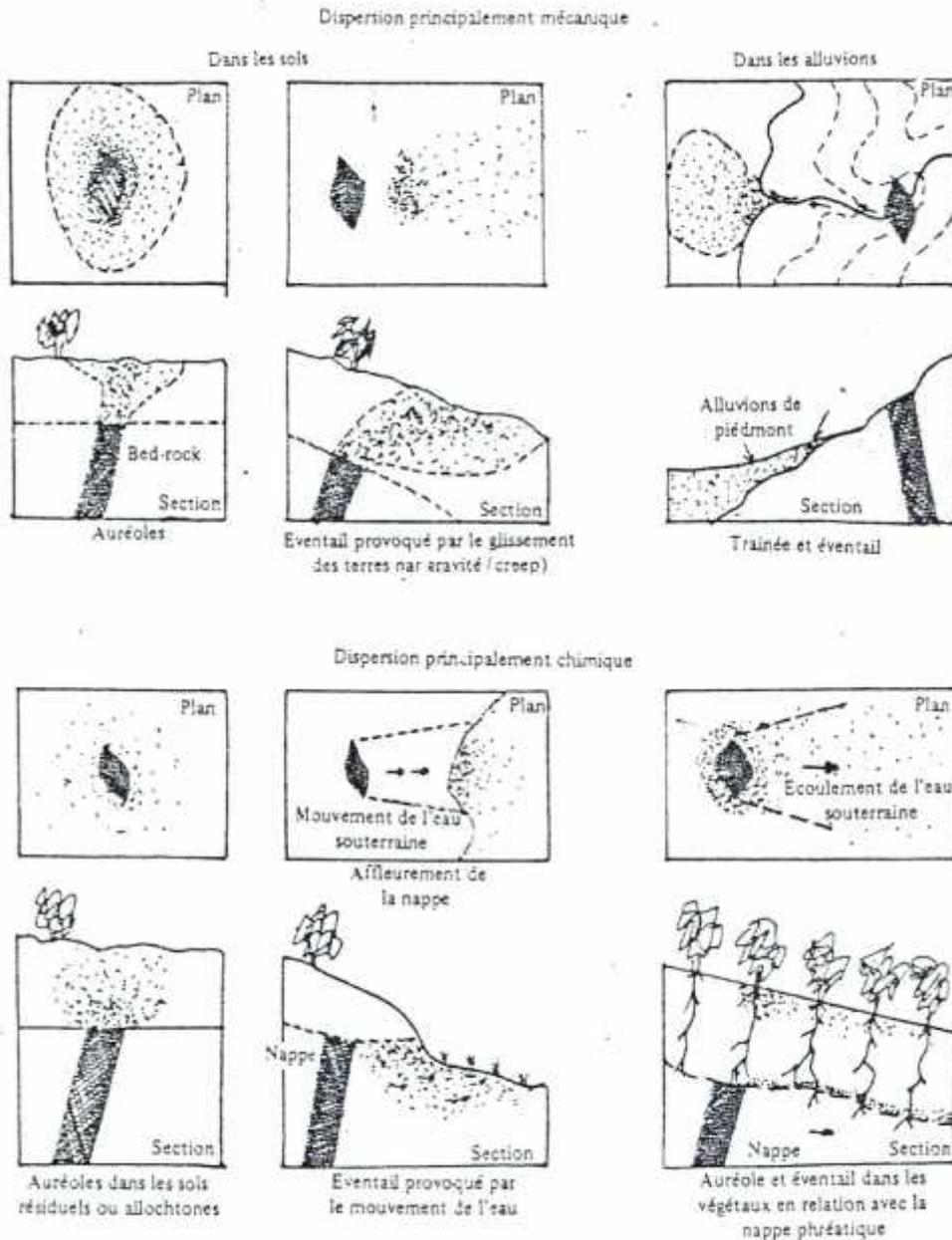


FIG. 4.1. — Auréoles et trainées secondaires déplacées par rapport à la source.

Chapitre 2 : Mise en œuvre de la prospection géochimique

1. Définition

La prospection géochimique consiste en la mesure systématique du contenu en un ou plusieurs éléments en traces des roches, des sols, des sédiments de ruisseau, de la végétation, de l'eau ou des gaz.

Le but de ces mesures est la mise en évidence d'anomalies géochimiques, c'est-à-dire de concentrations anormales en certains éléments contrastant nettement avec leur environnement qui représente le fond géochimique ou background. La formation des anomalies résulte de la mobilité et de la dispersion des éléments concentrés dans la minéralisation.

2. Etapes de la prospection géochimique et buts à atteindre

- a. *Reconnaissance générale* (reconnaissance régionale),
Ech : 1/500 000^{ème} à 1/200 000^{ème}

Elle 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 : sédimentaires ou socle, ...)
- Pédologique (type d'altération, nature des sols, présence de sédiments de ruisseau, ...)
- *Densité de prélèvements et buts*

L'échantillonnage effectué le long d'itinéraires et coupe de reconnaissance n'est ni systématique ni tout à fait régulier. On s'attachera dans la mesure du possible à orienter ces coupes perpendiculairement aux formations et 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 prospecter en géochimie stratégique et le choix des méthodes à employer sur ces zones sélectionnées.

b. *La prospection stratégique*, Ech : 1/200 000^{ème} à 1/50 000^{ème}

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.

On prélève la plupart du temps des sédiments de ruisseau (stream sediments), technique qui, à l'heure actuelle, paraît la mieux adaptée. 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 (oxydes, hydroxydes) qui pourrait être isolée et dont l'analyse permettrait d'obtenir des niveaux de teneurs et des contrastes géochimiques (teneurs anormales/teneur de fond) plus élevés. Cette étude peut être faite dès le stade de la reconnaissance générale au cours de laquelle on essaie tous les types de prélèvements.

La densité d'échantillonnage se fait à large maille avec une densité de 1 à quelques prélèvements au Km², s'il s'agit de sédiments de ruisseau. La notion d'espacement des 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 géochimique ne devrait pas descendre en dessous d'un échantillon/Km². 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 anormal, même isolé, devra être pris en considération.

On peut toutefois être conduit pour différentes raisons, à prélever partiellement des échantillons de sols. Il faudra alors augmenter la densité d'échantillonnage et prélever les sols en zones basses plutôt qu'en zone de crêtes. Pour certains métaux, particulièrement ceux dont les minéraux sont sous forme d'oxydes (W, Sn) l'analyse du concentré de batée couplée avec son examen optique fournit des résultats moins dispersés à des niveaux de teneurs plus élevés.

c. *Prospection tactique ou de détail*, Ech : 1/500 000^{ème} à 1/10 000^{ème} (et même plus grande)

Elle 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 teneurs atteints.

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

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 moins 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.

- *Maille d'échantillonnage*

A ce stade, les prélèvements étant faits suivant une grille régulière, on ne parlera plus de densité au Km², mais de maille. Celle dernière sera variable en fonction du métal recherché. Une maille carrée 200m x 200m est normalement suffisante pour une première localisation d'anomalies de 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 « surmaillage » initial.

NB. Il faut bien noter qu'à ces trois stades de prospection 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 : anomalies secondaires.

3. Méthodes de prospection géochimique

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.

a. 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, chalcopirite, 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.

b. 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.

c. *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.

4. Echantillonnage et analyse

a. *Echantillonnage*

Les programmes de collecte et de préparation des échantillons doivent être conçus de manière à fournir des données de qualité optimale en fonction de la nature du corps minéralisé visé et des conditions de sol en présence. C'est pourquoi il est impératif de :

- Chercher à obtenir un échantillon de taille, de volume ou de poids ainsi que de composition optimums;
- Établir des procédures d'homogénéisation et de fragmentation des échantillons,
- Produire des doubles des échantillons à chaque étape du processus de fractionnement et de réduction afin de pouvoir déterminer la marge d'erreur à chaque étape,
- Établir des contrôles de qualité lors de la préparation et de l'analyse des échantillons effectués en laboratoire spécialisé.

b. *Méthodes d'analyse les plus courantes*

Spectrométrie d'émission à partir d'une source plasma: Cu, Pb, Zn, Ag, W, Sb, Ba, Ni, Mn, Fe, Cr, Sn. Dix éléments utiles, soit en tant qu'éléments accompagnateurs, soit pour la cartographie géologique: V, P, As, Mo, B; Be, Cd, Co, Ni, Y.

Spectrométrie d'émission optique à lecture directe: quantomètre qui dose simultanément 7 majeurs et 26 éléments traces (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO; CaO, Na₂O, K₂O; 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).
 Spectrométrie d'absorption atomique (AAS): pour analyses courantes mono-élémentaires (teneurs en ppm ou ppb).

5. Préparation des échantillons et traitement des données d'analyses

a. Types d'attaques aux acides pour analyses des échantillons

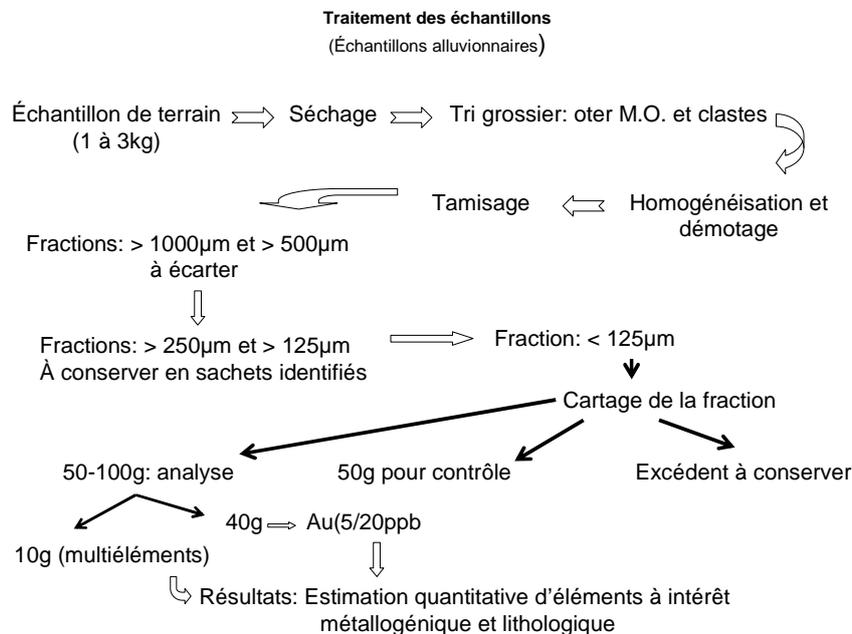
- Attaque totale à chaud (mélange d'acides perchlorique-nitrique-chlorhydrique et reprise des insolubles par l'acide fluorhydrique),
- Attaque au nitrate d'ammonium 10% à froid : contact 30mn
- Attaque à l'acétate d'ammonium N à froid : contact 30mn
- Attaque à l'acide nitrique N à froid : contact 10mn
- Attaque à l'acide citrique N à froid : contact 15mn
- Attaque à l'acide citrique N à froid : contact 30mn
- Attaque à l'acide citrique N à froid : contact 60mn

b. Echantillonnage et analyse

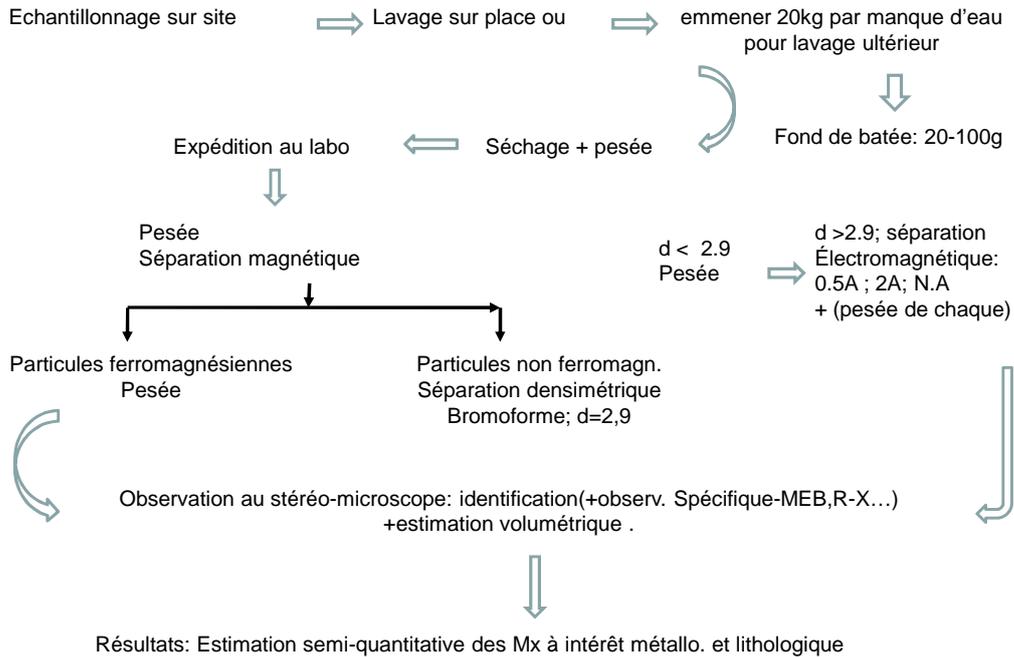
Les programmes de collecte et de préparation des échantillons doivent être conçus de manière à fournir des données de qualité optimale en fonction de la nature du corps minéralisé visé et des conditions de sol en présence. C'est pourquoi il est impératif de :

- Chercher à obtenir un échantillon de taille, de volume ou de poids ainsi que de composition optimums;
- Établir des procédures d'homogénéisation et de fragmentation des échantillons,
- Produire des doubles des échantillons à chaque étape du processus de fractionnement et de réduction afin de pouvoir déterminer la marge d'erreur à chaque étape,
- Établir des contrôles de qualité lors de la préparation et de l'analyse des échantillons effectués en laboratoire spécialisé.

c. Traitement (préparation) des échantillons



Prospection à la batée



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.

Prospection géochimique alluvionnaire

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 panning 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 leur 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

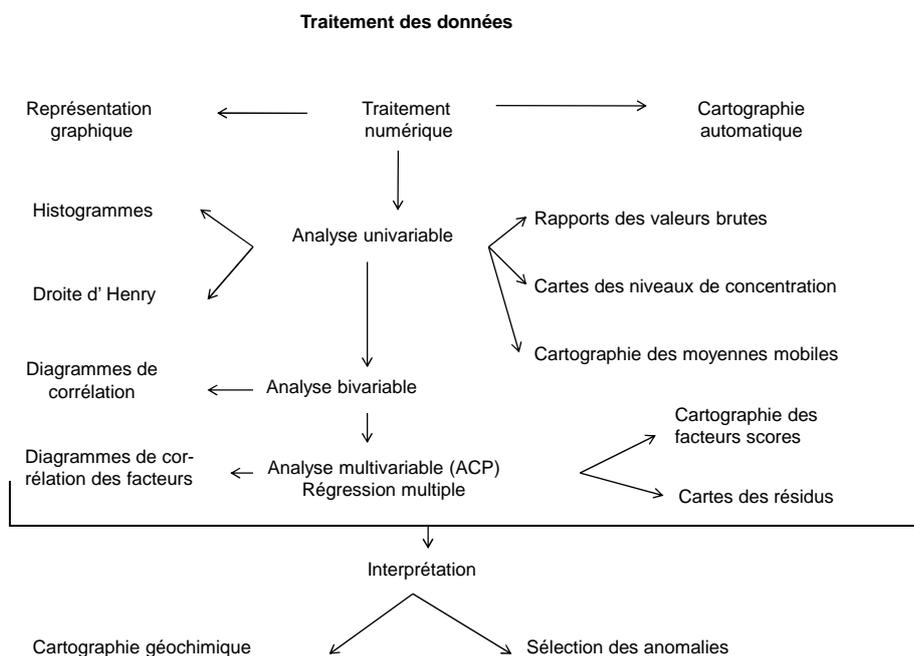
Objectif : recherche de métaux de base (Pb, Zn, Cu, Sb.....)

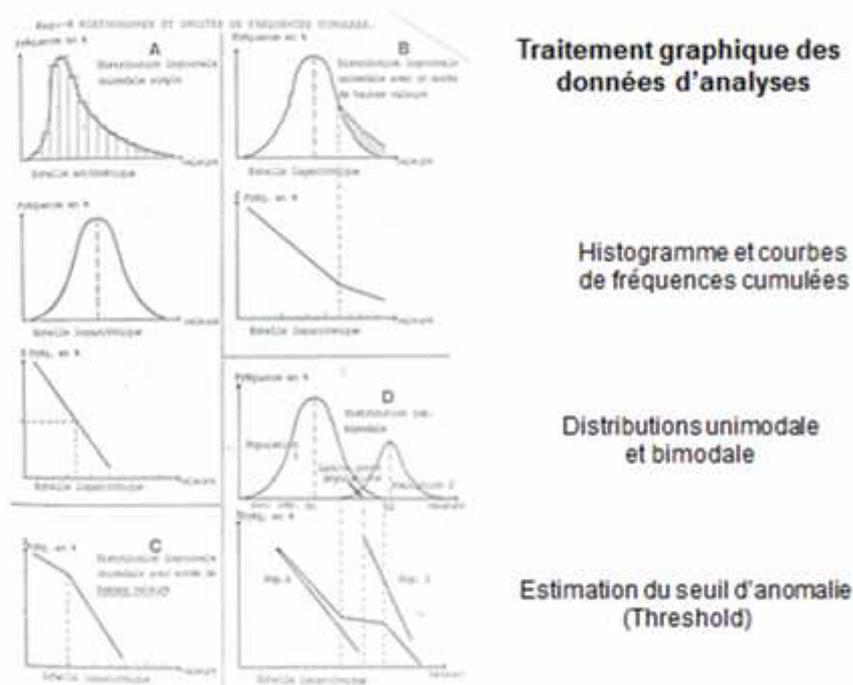
- Se base sur l'analyse chimique des sédiments fins de ruisseaux (argile, dépôt silteux...) prélevés en aval de cours d'eau. Les éléments chimiques proviennent de l'altération chimique des roches, puis transportés par les cours d'eau. Ces éléments sont fixés par les argiles, les oxydes et les hydroxydes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

7.2. Traitements des données (numérique et graphique)





NB : pour le traitement numérique, voir TD

6. Cartographie des contaminations des sols

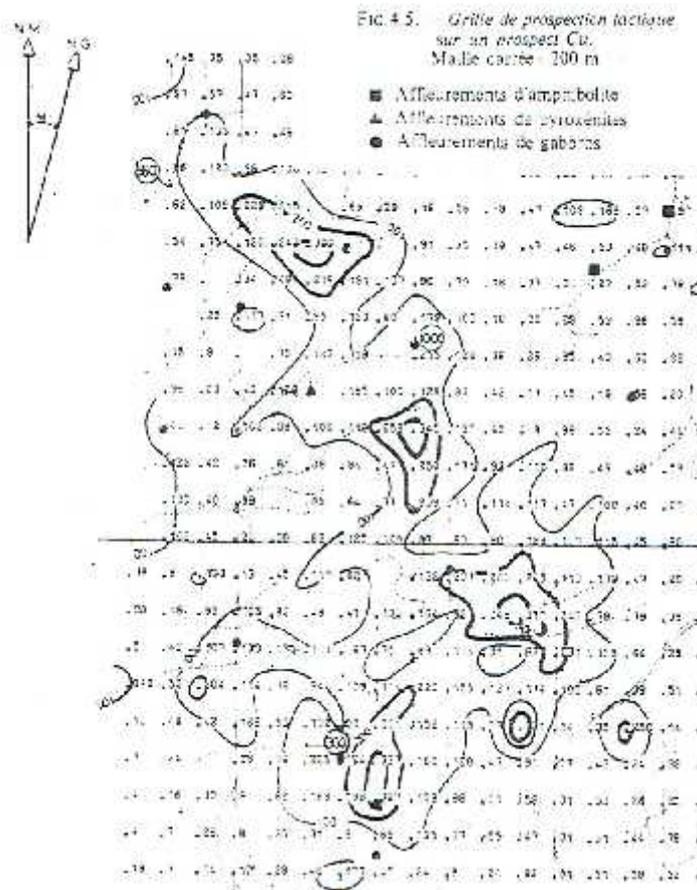
Elles sont cependant plus fréquemment d'origine anthropique, et peuvent résulter d'apports massifs de sources locales bien identifiées ou d'apports diffus d'origine plus lointaine (Baize, 1997).

De nombreux exemples de cartographie des contaminations existent dans la littérature récente (Liénard et al., 2014; Lee et al., 2016; Cao et al., 2017; Liu et al., 2017; Marugo-Negrete et al., 2017 ; Shen et al., 2017). Ces recherches combinent le développement de systèmes d'information géographique et les techniques d'interpolation géostatistiques pour la spatialisation des contaminations, avec l'usage d'indicateurs universels ou locaux dédiés à l'estimation du fond pédogéochimique – *enrichment factor* (EF), *geoaccumulation index* – ou à la caractérisation de la gravité de la pollution – *pollution index* – (Wu et al., 2014). En particulier, les approches spatiales basées sur les analyses multivariées visent à identifier les sources de pollution dès lors que celles-ci ne présentent pas les mêmes associations de métaux (Liénard et al., 2014).

Pour estimer les contaminations des sols il est nécessaire d'établir le niveau des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) des sols lié au fond pédogéochimique naturel, d'une part, et de cartographier l'ampleur des contaminations par ailleurs.

Le fond pédogéochimique correspond aux teneurs dans les sols qui résultent de l'héritage de la roche-mère (fond géochimique) et des redistributions naturelles liées aux processus de pédogenèse et aux cycles biogéochimiques (Baize, 1999; Colinet, 2003). Le fond pédogéochimique est généralement estimé à partir des teneurs totales, mesurées à partir d'extractions chimiques par un mélange d'acides forts ou par fusion alcaline.

Après le traitement statistiques des données et le traitement graphique, on détermine le seuil d'anomalie (threshold) à partir duquel on établit les teneurs anormales qui serviront à la cartographie géochimique (localisation des anomalies, fig. ci-dessous).



Cartographie géochimique (Carte d'isoteneurs du Cuivre dans les sols)

Références 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. & 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.

Baize D., 1997. Un point sur : Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Paris : INRA.

Baize D., 1999. Éléments traces dans les sols. Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles : définitions et utilités. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 57, 63-72.

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. & 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.

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.

Cao S., Lu A., Wang J. & Huo L., 2017. Modeling and mapping of cadmium in soils based on qualitative and quantitative auxiliary variables in a cadmium contaminated area. *Sci. Total Environ.*, 580, 430-439.

Chaussier J.B. (1981) – Manuel du prospecteur minier. Ed. BRGM, Manuels et méthodes, n° 2.

Colinet G., 2003. Éléments traces métalliques dans les sols. Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge. Thèse de doctorat : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).

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,

Gillot L., 2008. Contribution à l'estimation de l'impact des contaminations métalliques sur les propriétés des sols et étude des transferts des éléments traces métalliques dans les systèmes sol-plante (Lubumbashi, Katanga, RDC). Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).

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 Armoricain : 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.

John A., 2009. Contribution à l'évaluation du risque de contamination de la chaîne alimentaire par les éléments traces métalliques, dans le cadre des activités d'élevage et de production agricole à Lubumbashi. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique).

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 <125µ et <63µ. 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.

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 µ et < 63 µ. Rapport BRGM 84 SGN 352 GMX, 7 p.

Lee H., Choi Y., Suh J. & Lee S.O., 2016. Mapping copper and lead concentrations at abandoned mine areas using element analysis data from ICP–AES and Portable XRF instruments: a comparative study. *Int J. Env. Res. Public Health*, 13, 384.

Lepeltier C. (1969) - A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Eco. Geol.*, Vol. 64, 538-550.

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.

Liénard A., Brosteaux Y. & Colinet G., 2014. Soil contamination near a former Zn-Pb ore treatment plant: Evaluation of deterministic factors and spatial structures at the landscape scale. *J. Geochemical Exploration*, 147, 107-116.

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., 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. 2nd 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.