

LA PROSPECTION GEOCHIMIQUE

PRINCIPES ET METHODES

COURS 1

BUT, PRINCIPES ET METHODES DE LA PROSPECTION GEOCHIMIQUE

La prospection géochimique est l'une des parties de la géochimie appliquée à la recherche minière. Elle est généralement considérée comme une méthode indirecte de prospection.

I - BUTS ET PRINCIPES DE BASE

La prospection géochimique a comme principale préoccupation ***la localisation d'indices*** pouvant déboucher sur un gisement. S'appuyant essentiellement sur les halos de dispersion mécanique et chimique des éléments, elle ***élargit les cibles et en facilite la détection et la localisation***.

Elle consiste à utiliser des mesures systématiques d'un ou de plusieurs éléments chimiques sur des matériaux naturels pour localiser les halos de dispersion marqués par :

- des traces chimiques fortes indiquant la présence de concentrations métalliques;
- des traces chimiques indiquant des phénomènes d'altération;
- Des traces chimiques précisant le contexte géologique.

L'interprétation de ces halos est devenu possible et même facile grâce aux résultats des 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 - leurs migration et leurs dispersion et concentration dans la lithosphère, l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère;
- leurs associations et les lois qui les régissent dans les différentes géosphères - isomorphisme, paragenèse, biogenèse, radiogéochimie, etc.
- les fluides minéralisateurs,
- la spécificité de la formation des gîtes minéraux dans des conditions géologiques bien déterminées.
- Mais, surtout, le grand nombre des résultats analytiques qui a permis de déterminer la teneur moyenne (*clarke*) de la plupart des éléments chimiques entrant dans la composition de la lithosphère, de certains groupes de roches, des sols, des eaux superficielles et souterraines et des cendres de plantes.

Cependant les principaux facteurs qui ont conduit au développement de cette méthode de prospection sont :

- la taille souvent petite des gisements,
- le recouvrement des gisements (gisements cachés, aveugles ou recouverts);
- et la difficulté d'identification (ex gisement d'or ou de platine à minéraux invisibles, gisement de Zn de Oued Amizour où le minérale est invisible,...).

La prospection géochimique a été mise en pratique pour la première fois en Russie (ex: Union soviétique) vers les années 1940. Elle a évolué en 3 étapes qui sont :

- 1 - du début de la prospection géochimique vers les années 40 et qui est la conséquence des travaux de Goldshmidt et Fersman;
- 2 - de l'utilisation systématique de cette méthode vers les années 50 et qui a conduit à la découverte de nombreux gisements;
- 3 - enfin la 3^{ème} étape a débuté vers les années 70 avec le développement des méthodes analytiques et l'informatique qui facilite le traitement des données.

Tout gisement peut être considéré comme un objet chimico-minéralogique ayant des relations strictes avec son environnement lithologique. A l'exception de la géochimie en roche qui s'appuie sur la connaissance de ces relations (propriétés spécifiques) toutes autres s'appuient sur l'image géochimique que produisent les gisements dans les conditions de surface :

Gisement + environnement immédiat (halo primaire) + phénomènes de surface=>IMAGE GEOCHIMIQUE

Exemple : ***La présence d'un gisement de sulfure subaffleurant peut être marquée par la présence d'une zone d'oxydation.= image géochimique***

La connaissance des lois physico-chimiques impliquées dans cette image géochimique permet plus ou moins facilement la démarche inverse :

Nature du gisement = IMAGE GEOCHIMIQUE =====>Localisation du gisement
Selection des anomalies

La zone d'oxydation - image géochimique => présence d'un gisement de sulfure subaffleurant.

Pour permettre la transposition image géochimique-gisement, il faut connaître et comprendre les mécanismes du devenir des minéraux et des éléments chimiques entre le site cristallographique initial et le site d'échantillonnage comme il est nécessaire de connaître les associations chimiques et minéralogiques types des gisements classiques et de leur environnements. La méthode de prospection future dépendra de l'interprétation de la campagne géochimique et donc de la lecture correcte des signatures géochimiques. Le signal lié à un gisement sera d'autant plus significatif qu'il sera établi sur une association d'éléments variés et non pas sur un seul. Exemple : soient 2 concentrations aurifères, la 1^{ère} en Au seulement et la 2^{ème} en Au et As; la 1^{ère} correspondrait à un placer et la 2^{ème} à un gisement primaire et donc la méthode de prospection futur sera différente suivant le cas.

L'analyse multi-élémentaire portant sur des éléments à comportement géochimiques contrasté, combiné avec les possibilités du traitement statistique des données a, depuis quelques années conduit à une bien meilleure efficacité de la prospection géochimique.

II - PRINCIPALES METHODES ET ECHELLES DE PROSPECTION GEOCHIMIQUE

En fonction du type de dispersion des éléments chimiques, de leurs piègeages et de leurs fixations, les principales méthodes de prospections géochimiques sont la lithogéochimie (métallométrie), l'hydrogéochimie, l'atmogéochimie (gaz), la radiométrie et la biogéochimie.

La prospection géochimique comporte deux principales étapes qui sont la prospection stratégique et la prospection tactique.

II. 1. - PRINCIPALES METHODES DE PROSPECTION GEOCHIMIQUE

*** - Prospection lithogéochimique (métallométrique)**

Ce type de prospection géochimique a pour but :

- soit la localisation des auréoles de dispersion primaire (dispersion dans les environs immédiats même du gisement) en étudiant la répartition des éléments chimiques dans les roches en place encaissantes du gisement
- soit les auréoles de dispersion dites secondaires et les trainées de dispersions en étudiant la répartition des éléments dans le sol et les sédiments de ruisseau.

*** - Prospection hydrogéochimique**

Elle est basée sur l'étude des teneurs en éléments chimiques des eaux transformées dans le sous-sol sous l'influence des corps de minerais. Cette méthode est efficace dans les régions où l'on note la présence de beaucoup de sources. Cette méthode permet de détecter les gisements de Mo, Zn, Cu, Ni, Co, U, V, Cr, Sn et Au. La prospection hydrogéochimique comporte les étapes suivantes:

- Le prélèvement des échantillons;
- la détermination des ions sulfates, Cl-ions, pH, Eh, la somme des métaux,
- la description géologique et hydrogéologique des sources,
- l'analyse des échantillons au laboratoire,
- Le traitement des données et l'interprétation géologique.

*** - Prospection atmogéochimique (gaz)**

Cette méthode est basée sur l'étude de la diffusion des gaz à partir du sous sol. Elle permet de localiser les auréoles de dispersions gazeuses des éléments chimiques ou molécules tels que Hg, H, He et CO₂ et les différents gaz naturels (hydrocarbure). Elle a été utilisée surtout pour la recherche de gisement d'hydrocarbure.

*** - Prospection Radiométrique**

La prospection radiométrique qui est aussi considérée comme une méthode géophysique est basée sur la mesure de la radioactivité des roches. Elle a pour but la localisation et l'étude des roches et minerais radioactifs. On effectue des levés radiométriques et après traitement des données, les anomalies sont localisées.

*** - Prospection biogéochimique**

La prospection biogéochimique est basée sur la capacité des végétaux et animaux à absorber les éléments chimiques. Il a été démontré que les teneurs en éléments chimiques (Cu, Ni, Mo ...) de la flore qui poussent dans les limites d'une auréole de dispersion sont de 10 à 100 fois plus élevées que les teneurs habituelles dans ces mêmes plantes. Dans la pratique on procède de la façon suivante : perpendiculairement à la zone minéralisée supposée, on établit des profils de prospection distants de 100 à 500 m suivant l'étape de prospection. Sur chacun des profils, on ramasse des feuilles ou de petites branchettes totalisant un poids de 15-20 g. Ces branchettes sont séchées à, environ 40°C avant le broyage et la calcination. Les résultats du dosage sont traités et reportés sur la carte géologique.

II. 2. - LES ECHELLES DE PROSPECTION GEOCHIMIQUE

De par les dimensions des régions prospectées et l'objectif à atteindre, on distingue la prospection stratégique et la prospection tactique.

A - Prospection stratégique

C'est la prospection qui est faite sur de très grandes surfaces à des échelles inférieures à 1:50 000, avec une densité d'échantillonnage de quelques prélèvements (moins de 10) au Km². Elle doit permettre la sélection des zones qui seront ultérieurement détaillées et travaillées en prospection tactique.

B - Prospection tactique

La prospection tactique s'effectue sur une faible superficie (quelques Km²) avec une forte densité d'échantillonnage (10 à 500 échantillons au km²). Son but c'est de localiser et de circonscrire les corps minéralisés, soit après une phase de prospection stratégique, soit en extension autour d'indices déjà connus. L'échelle de travail varie de 1:2 000 à 1:25 000.

Le choix d'une approche géochimique dépend du degré de connaissance de la région et du type de problème posé. A titre indicatif, aux USA et au Canada durant les années 70, les pourcentages des types d'échantillons prélevés s'établissent comme suit :

Sols	: 45.6 %
Roches	: 23.2 %
Sédiment de ruisseau	: 23.3 %
Autres	: 7.9 %

Ces données montrent que c'est la prospection lithogéochimique sol et roches en place qui est la plus utilisée dans le monde. En Algérie, l'Office Nationale de la Recherche Géologique et Minière - ORGM – prélève des dizaine de milliers d'échantillons lithogéochimiques chaque année.

COURS 2

ABONDANCE CRUSTALE ET COMPORTEMENT GEOCHIMIQUE DES ELEMENTS

L'abondance moyenne des éléments chimiques est très variable dans la lithosphère. Elle est exprimée soit :

- par le pour cent poids - X%,
- par le gramme par tonne (g/t), terme utilisé en recherches minières et qui correspond au ppm (partie par million);
- par le milligramme par tonne (mg/t) qui équivaut au ppb (partie par billion, le milliard des Anglo-Saxons).

I - CLASSIFICATION PONDERALE DES ELEMENTS CHIMIQUES

Les éléments chimiques ont été classés en fonction de leur abondance en **éléments majeurs et éléments en traces**.

I. 1. - Les éléments majeurs

Les huit éléments O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K et Mg, sont appelés «majeurs». Ils représentent près de 99 p. 100 du poids total de l'écorce terrestre. Leurs teneurs moyennes respectives sont comprises entre 50 et 1 p. 100 (50 à 1%) suivant la nature des formations.

I. 2. - les éléments en traces

Les autres éléments sont dits en traces. Les teneurs moyennes de ces derniers vont de quelques centaines de grammes à quelques milligrammes par tonne (g/t). L'étude chimique des minéraux et des roches a montré que les éléments chimiques dits en traces - peuvent exister en petites quantités au sein des minéraux. Ils peuvent être localisés aussi bien dans les réseaux des minéraux, que dans les fissures et/ou dans l'espace intergranulaire. Leur localisation dépendrait des différents processus géologiques auxquels a été soumise la roche ou le minérale. La répartition des éléments en traces peut servir à la compréhension des différents processus géologiques et de la formation d'un gîte minéral. Ces éléments en traces peuvent être récupérés (Sous-produits) à partir des minerais.

II - NOTION DE CLARKE, FOND GEOCHIMIQUE ET D'ANOMALIES GEOCHIMIQUES

II. 1. - Le clarke

le clarke, par définition, est la moyenne arithmétique des résultats d'analyse d'un élément dans des échantillons provenant d'une formation donnée de l'écorce terrestre.

Le grand nombre des résultats analytiques a permis de déterminer le *clarke* de la plupart des éléments chimiques entrant dans la composition de la lithosphère, de certains groupes de roches, des sols, des eaux superficielles et souterraines et des cendres de plantes.

La distribution des éléments varie d'une région à l'autre, il est alors possible de définir des

«*provinces géochimiques*». Chaque province est constituée de formations géologiques composantes: massifs intrusifs, séries effusives, métamorphiques et sédimentaires.

L'échantillonnage et les analyses chimiques des formations naturelles et les sédiments meubles qui ne sont pas touchés par des phénomènes minéralisateurs endogènes ou exogènes rendent possible la détermination des «*fonds géochimiques*» ou *clarkes 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.

Lorsque, dans certains secteurs, les phénomènes géologiques (ex circulation de solutions hydrothermales) sont accompagnés de l'apport de certains éléments et du départ de certains autres, l'analyse de roches, de sols, de sédiments ou de plantes pour les éléments en «traces» peut donner des teneurs anormales par rapport aux teneurs de fond géochimique. Ces teneurs anormales constituent des anomalies géochimiques. Ces anomalies sont dites positives si les teneurs sont supérieures aux fonds géochimiques et négatives si les teneurs sont inférieures au fond géochimique.

II. 2. - Les anomalies 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 conduisent à la formation, dans les plantes croissant dans cette région, d'anomalies «biogéochimiques». Ces dernières peuvent concerner toutes les plantes ou certaines d'entre elles (plantes indicatrices).

Les anomalies géochimiques sont dites « 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, 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.

Il est donc nécessaire, dans l'interprétation de tout résultat 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.

Les anomalies sont soit liées directement au phénomène de mise en place des concentrations minérales : ce sont les *anomalies syngénétiques* ou anomalies primaires et forment les auréoles primaires ; soit liées au phénomène d'altération supergène des gisements et des auréoles primaires : ce sont les *anomalies épigénétiques* qui forment les auréoles secondaires.

Concentration et dispersion des éléments chimiques (anomalies) sont dus aux mouvements de leurs atomes. Ces mouvements sont souvent appelés migration mais aussi dispersion.

COURS 3

LA MIGRATION ET PRECIPITATION DES ELEMENTS CHIMIQUES

Les facteurs qui sont à l'origine de la migration (dispersion) des éléments chimiques sont classés en deux grandes catégories; ce sont les facteurs internes (endogènes) et les facteurs externes ou exogènes.

I - LA MIGRATION ENDOGÈNE

La migration endogène est la conséquence des propriétés thermiques, gravitationnelles, chimique et radioactives des éléments chimiques.

- **Les propriétés thermiques** sont responsables de la fusion et la volatilité des éléments durant les processus géologiques et cosmiques.....

- **Les propriétés gravitationnelles** sont responsables de la dispersion des éléments et de leur redistribution basée sur les volumes spécifiques des particules.

Ex : dans les chambres magmatiques ce sont les éléments lourds qui se déposent à la base.

- **Les propriétés chimiques** jouent un rôle important d'autant plus que la migration provient surtout dans la phase aqueuse et gazeuse. La mobilité des éléments dans un milieu aqueux dépend essentiellement de la stabilité de la composition chimique. Les solutions étant en continuel interaction avec les roches encaissantes sont relativement saturés en éléments majeurs et des éléments tels que les chlorures, fluor et d'ions carbonés divers.

La migration se fait sous forme d'ion complexe, minéral insoluble ou sous forme ionique simple. Leur réaction et dépôt dans l'encaissant forme ce que l'on appelle auréoles de dispersion primaire.

II - LA MIGRATION EXOGÈNE

La migration des éléments dans les milieux supergènes dépend des conditions thermodynamiques et chimiques du médium dans lequel il migre. Généralement la migration dans les milieux supergènes s'effectue à pression pratiquement constante (1kg/cm²) et à très faible variation de la température. L'environnement chimique est déterminé par le pH et Eh (0.1 à 0.7 EV). La migration se fait sous forme chimique, colloïdale ou biologique. Cette dernière s'effectue en 3 étapes :

- désintégration ou désagrégation sous l'effet de facteurs biologiques dont le résultat c'est la solubilité d'un certain nombre d'éléments;

- l'extraction d'un certain nombre d'éléments des roches, de l'eau et de l'air et leurs concentrations dans les organismes;

- l'accumulation, la décomposition et la fossilisation de corps organiques.

III - LES AUREOLES DE DISPERSION

Un des objectifs des méthodes lithogéochimiques c'est la mise en évidence et la localisation zones de dispersion primaires de gisements ou de corps minéralisés – Ces zones sont appelées auréoles primaires, ainsi que des zones de concentrations dans les formations de dépôts secondaires (alluvion, elluvion,) dispersions secondaires – Auréoles secondaires et traînées de

dispersion.

III. 1. - Auréoles de dispersion primaires

Les auréoles primaires d'un corps minéralisé ou d'un gisement sont les zones de roches encaissantes entourant celui-ci, enrichies de certains éléments lors des processus de mise en place de la minéralisation. La formation d'auréoles primaires de gisements endogènes nécessite un apport des éléments chimiques par les solutions minéralisantes. Cet apport s'accompagne généralement de transformation plus ou moins grande des roches encaissantes par la redistribution de leurs composants. Dans les gisements endogènes, les principaux éléments entrant dans la composition du minerai et leurs éléments accessoires (accompagnateurs), apportés dans les roches encaissantes par les solutions hydrothermales au cours de différentes étapes minéralisatrices, sont les éléments indicateurs directs. Par contre, les éléments lithophiles et les éléments sidérophiles redistribués dans les roches encaissantes lors de leur transformation par métasomatose et donnant à celles-ci des zonalités caractéristiques sont des éléments indicateurs indirects.

Les divers constituants des auréoles primaires sont étroitement liés à la genèse et à la composition des concentrations minérales. Ce fait permet, d'après les particularités de la paragenèse des éléments dans les auréoles primaires, d'avoir des présomptions sur le type de gîte caché.

Les teneurs des éléments représentatifs des auréoles décroissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du corps minéralisé et tendent vers les valeurs respectives du fond géochimique local.

Les particularités et caractéristiques des auréoles sont leurs zonalités horizontale et verticale. La zonalité horizontale correspond, en plan, à des dimensions (largeur, longueur) des auréoles qui peuvent être différentes selon les éléments. La zonalité verticale est fonction de la distribution verticale des éléments et de leur pouvoir de migration: certains éléments se situent de préférence au-dessus du corps minéralisé, d'autres au-dessous et, enfin, d'autres se concentrent aussi bien dans les parties hautes que dans les parties basses des auréoles.

La forme des auréoles primaires dépend du type de gîte et elle est déterminée par des facteurs structuraux: présence de failles et fracturation, porosité des roches encaissantes, conditions de situation du gîte, etc. Elle est généralement proche de la forme du corps minéralisé: pour des corps subverticaux, elle est symétrique au corps de minerais.

Pour des corps faiblement inclinés ou subhorizontaux, la forme des auréoles est asymétrique et elle est d'avantage développée au toit (partie supérieure).

La taille des auréoles est importante pour les recherches de gisements ; Si les auréoles primaires sont grandes, alors la découverte de gîtes est plus facile. Les dimensions des auréoles primaires sont de dix à cinquante fois supérieures à celles du corps minéralisé: pour des minéralisations hydrothermales subverticales, par exemple, la présence d'auréoles primaires se fait sentir à plusieurs centaines de mètres au-dessus de celui-ci.

Les auréoles primaires peuvent être utilisées, en particulier, pour la recherche de gisements sous une couverture de dépôts volcaniques, pour la connaissance du niveau d'érosion de gisements ou d'indices et pour l'évaluation des anomalies géochimiques endogènes et exogènes.

III. 2. - Auréoles de dispersion secondaires

L'auréole de dispersion secondaire est le secteur caractérisé par des teneurs élevées des éléments chimiques caractéristiques d'un gisement donné, dans les formations meubles et les sols. Ce secteur se serait constitué suite à la destruction du gisement par les phénomènes d'altération

superficielle et le déplacement et formations des roches meubles.

La traînée de dispersion d'un gisement est la zone à teneur élevée de ses éléments chimiques caractéristiques, jouxtant l'auréole de dispersion secondaire ou primaire. Elle se développe dans les roches et les sols, le long des pentes, par déplacement gravitationnels, aussi bien sur les solides que sur les liquides.

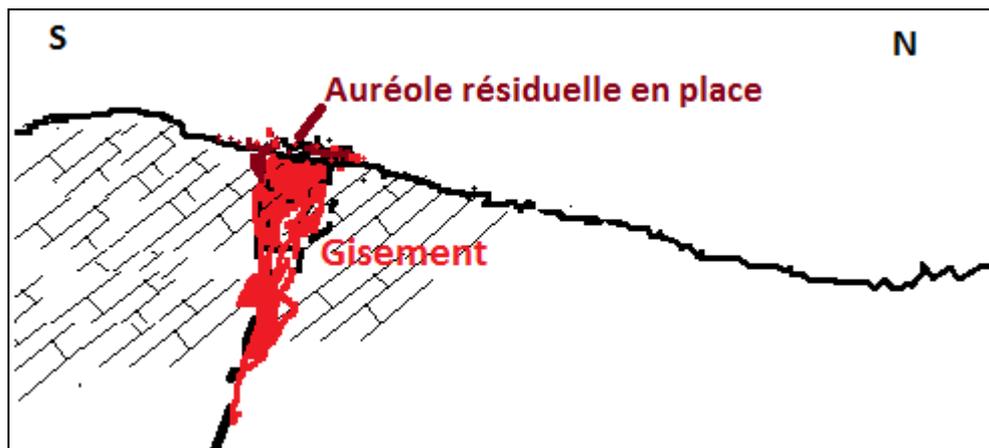
Les auréoles de dispersion secondaires comprennent:

A - **les auréoles de dispersion mécanique**, constituées par des minéraux primaires ou secondaires, stables dans la zone d'altération superficielle;

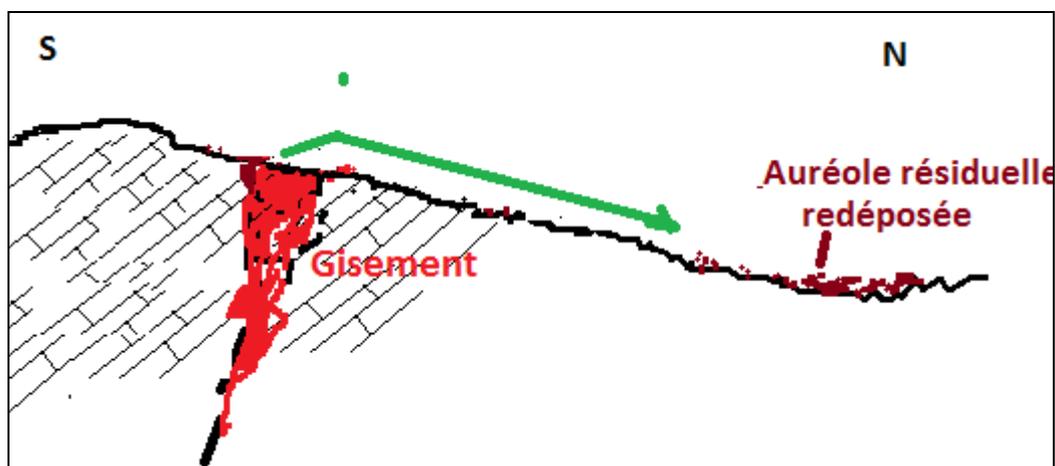
B - **les auréoles «salifères» chimiques**, provenant de la solubilisation totale ou partielle des minéraux primaires ou secondaires, de leur réprécipitation et de la formation de sels métalliques ou organo-métalliques plus ou moins complexes par des facteurs physiques, chimiques ou biologiques.

C - **Les auréoles résiduelles** - Les gîtes anciens et leurs auréoles primaires, plus ou moins altérés sur place, donnent dans les formations éluviales ou de pentes actuelles des auréoles résiduelles. Ces auréoles résiduelles sont dites :

- - **Auréoles résiduelles en places** si celles-ci se situaient spatialement juste à la verticale sur le gisement. Elles sont constituées généralement de minéraux stables (cinabre, cassitérite,..) et qui sont le résidu du lessivage.
- - **Auréoles résiduelles redéposées** si celles-ci sont constituées des résidus du lessivage mais légèrement déplacés vers le bas d'une pente sur quelques centaines de mètres.



a)



b)

Fig. 1 – Coupe à travers des auréoles résiduelles –a) en place ; b) redéposée

Par opposition à celles-ci, il y a les **auréoles surimposées** (Gisement de mercure de Fendek – Azzaba-Skikda), ou «**anomalies de fuite**», proviennent de la diffusion des éléments chimiques dans les formations superficielles allochtones d'une minéralisation primaire sous-jacente.

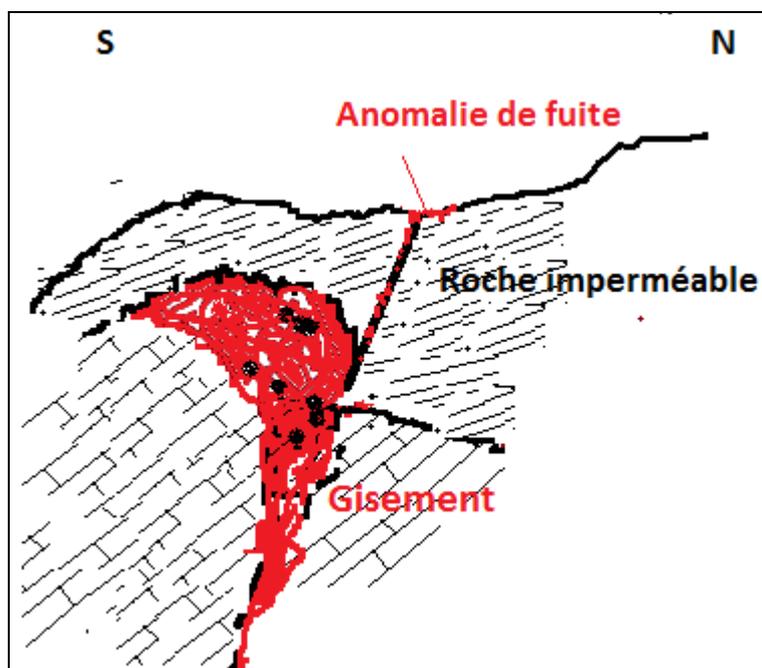


Fig. 2 – Coupe à travers un gisement avec anomalie de fuite

Lorsque le gîte primaire ancien, érodé, est surmonté de formations géologiques recouvertes par des produits d'altération superficielle allochtones, la diffusion des éléments peut produire des **auréoles d'accumulation**. Celles-ci peuvent être soit à l'aplomb du gîte, avec une zone intermédiaire stérile, soit, suivant la topographie, plus ou moins déplacées par rapport à celui-ci.

Enfin, lorsque la diffusion n'atteint pas la surface, **les auréoles sont dites cachées** et peuvent appartenir aux différents types d'auréoles précitées.

Il est évident que, pour les recherches minières, les auréoles résiduelles et surimposées sont les plus intéressantes, la mise en évidence d'auréoles cachées nécessitant des travaux laborieux d'échantillonnage. Les teneurs, dans ces auréoles, varient de quelques dizaines à des milliers de grammes par tonne.

La localisation d'anomalies résulte de l'étude de la distribution des éléments dans les sols résiduels ou dans les formations superficielles allochtones.

La forme et dimension des anomalies dépend de la forme du gîte, des conditions morphologiques et climatiques et de la couverture de la région explorée. Leurs dimensions sont variables. Dans le cas d'anomalies résiduelles, elles sont généralement bien supérieures à celles des auréoles primaires. Cependant, dans le cas d'anomalies de diffusion, elles peuvent être inférieures par suite d'une mauvaise migration des éléments à travers le recouvrement (Gisement de Fendek). Un gîte important, assez profondément enfoui, peut donner lieu à de faibles teneurs en surface, tandis qu'un indice subaffleurant et de peu d'importance aura une anomalie assez étendue à très fortes teneurs.

III.3 - Les traînées de dispersion

On désigne par « Trainée de dispersion » la zone de teneurs élevées qui se développent le long de cours d'eau dans les sédiments de ruisseau et des pentes sur les flancs de montagnes. C'est donc un type de dispersion secondaire. Dans la direction des cours d'eau, la teneur diminue jusqu'à

atteindre le fond géochimique. Les trainées de dispersion peuvent avoir plusieurs kilomètres de longueur. Le réseau hydrographique et le relief présentent une importance capitale dans l'interprétation de ces trainées de dispersion.

COURS 4

LES ETAPES D'UNE CAMPAGNE DE PROSPECTION GEOCHIMIQUE

Chaque campagne de prospection géochimique comporte les principales étapes suivantes :

- l'établissement du projet;
- les travaux de terrain de laboratoire,;
- le traitement des résultats d'analyse chimique et la localisation et l'interprétation des anomalies à l'aide des données géologiques.

I - ETABLISSEMENT DU PROJET

Afin de mener à terme et dans les meilleures conditions possible une campagne de prospection géochimique, cette dernière doit être minutieusement préparée et un projet doit être établi. Dans le projet, doivent être mentionnés :

- les tâches et le but de la campagne;
- l'argumentation des choix des méthodes de prospections (géochimie sol, stream-sédiment, ...);
- l'argumentation de l'échelle de prospection;
- la méthodologie d'échantillonnage et de dosage en indiquant les éléments chimiques à doser et la limite de détection pour chacun des éléments. Cette partie nécessite des travaux d'essais et de mise au point. Le but recherché ici, c'est la détermination des éléments indicateurs et leurs relations et de définir le mode de prélèvement, de préparation et d'analyse des échantillons pour ne pas diminuer de leur efficacité;
- l'organisation, la durée et le coût des travaux.

II - LES TRAVAUX DE TERRAINS ET DE LABORATOIRE

Cette étape comprend le prélèvement, la préparation et l'analyse chimique des échantillons ainsi que le contrôle et la précision des travaux réalisés.

II. I. - PRELEVEMENT ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

La préparation des échantillons et leur analyse chimique dépendra des objectifs de la prospection, de la nature des échantillons et des méthodes analytiques disponibles. Cependant il y a nécessité de préparer à moindre coût, avec fiabilité (reproductibilité) et sans pollution significative.

1 - Les roches

Le volume ou poids de l'échantillon conditionne la préparation pour assurer la représentativité exigée au prélèvement. Le problème n'a pas de solution générale en raison des divers sites minéralogiques possibles de l'élément concerné. On utilise, généralement, les mêmes procédés que pour l'échantillonnage d'évaluation minière. Comme il faut concasser et quarter les échantillons, on peut utiliser les mêmes calculs que pour le quartage ou la prise d'échantillons pour l'analyse en fonction de la granulométrie après réduction. Suivant les problèmes posés et la méthode analytique, l'analyse portera sur la roche totale ou sur une extraction sélective plus ou moins empirique mais reproductible (exemple "Uranium soluble"). Mais il faut faire attention aux contaminations, surtout lors du concassage-broyage. Pour évaluer la contamination, on peut

toujours traiter des matériaux purs (par exemple du quartz) et en analysant la teneur finale qui correspond à la pollution.

2 - Sols et alluvions

Généralement, on procède à un tamisage de 80 mesh (0.18 mm) pour éliminer les cailloutis qui risquent de fausser la représentativité de l'échantillon. Cette règle doit être appliquée avec précaution car, par exemple, dans une prospection de stream-sédiment de l'étain, le tamisage à 0.18 mm n'est pas du tout recommandé puisque la majorité des grains de cassitérite sont plus gros.

3 - Végétaux

Pour les végétaux, aucune précaution spéciale n'est à prendre. Il faut sécher à environ 40°C avant de broyer et de calciner.

4 - Les eaux

Certaines déterminations doivent se faire sur le site de prélèvement (pH, Eh, température ...). Il faut un maximum de précautions pour l'emballage (en général polyéthylène ou polypropylène) et la stabilisation de l'eau (acidification à pH=1 avec acide nitrique). Le problème posé est celui du filtrage de l'eau qui peut avoir une influence considérable sur les résultats.

II. 2. - PREPARATION POUR ANALYSE

La préparation des échantillons pour l'analyse chimique dépend de la méthode analytique utilisée -solide ou liquide ?. Le problème posé est celui de l'attaque sélective quand il y a passage par voie humide. que veut-on analyser? - est-ce que c'est tout l'élément chimique ou la part de l'élément chimique contenu sous une forme précise (cas de l'étain adsorbé ou sous forme de cassitérite, de même pour l'uranium).

II. 3. - ANALYSE CHIMIQUE

Suivant les laboratoires, les équipements varient beaucoup. Parmi les méthodes d'analyse chimique utilisées, il y a la colorimétrie, la spectrométrie d'absorption (absorption atomique), la spectrométrie d'émission (semi-quantitative ou à lecture directe, sources plasma = ICP), la fluorescence X, les méthodes électrochimiques (pour F, Cl, I, Cu, B). Le choix de la méthode dépendra du programme analytique et des équipements en place.

III - TRAITEMENT DES DONNEES ET LOCALISATION DES ANOMALIES

Cette étape comprend la compilation des résultats d'analyse chimique, l'interprétation des données et la localisation des secteurs potentiels. Les méthodes de traitement des données peuvent être monovariabiles ou multivariabiles.

TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES DE PROSPECTION GEOCHIMIQUE

La prospection géochimique a commencé au début du 20ème siècle, et depuis, les méthodes de traitement ont considérablement évolué - du traitement et interprétation élémentaire simple des résultats d'analyses chimiques des échantillons tel que l'établissement des cartes des isoteneurs, on est passé au traitement statistiques et géostatistiques mono et multivariable pour déterminer les valeurs anormales et localiser les anomalies.

Il existe plusieurs méthodes monivariés de traitement pour le calcul et la détermination des valeurs anormales monovariables. Parmi celles-ci, il y a la méthode statistique classique datant du début des années 60 qui a été améliorée par certains géochimistes. Ces méthodes permettent de déterminer le fond géochimique noté souvent T_f et les teneurs anormales monovariables notées T_a .

COURS 5

I - METHODE STATISTIQUE CLASSIQUE (Sideronko, 1965)

La détermination du fond géochimique local (champs normal) - T_f - pour chacun des éléments chimiques analysés et des teneurs minimales anormales T_a dépendra de la loi de distribution des teneurs dans les échantillons géochimiques prélevés. Les lois de distribution le plus souvent rencontrées sont les lois de distribution normale et lognormale.

- Si la loi de distribution des teneurs dans les échantillons est lognormale, la moyenne géométrique est prise comme fond géochimique.

- Si la loi est normale, la valeur du fond géochimique est prise égale à la moyenne arithmétique T_m .

$$T_f = T_m$$

Le fond géochimique en chaque élément analysé, est calculé pour les différents faciès lithochimiques.

Dans la pratique, un des moyens les plus rapides pour déterminer le type de distribution c'est de tracer la "droite de Henry" sur papier de probabilité : à l'échelle régulière normale dans le cas où c'est une loi de distribution normale qui est suspectée ou sur papier à échelle logarithmique pour une distribution lognormale.

Pour la détermination du fond géochimique et de la teneur minimale anormale, on établit le tableau statistique habituel; puis on trace le graphe de probabilité et on essaye de faire passer une droite par le maximum de points. Un certain nombre de points peut se trouver écarté de cette droite. On utilise alors le test de Kolmogorov-Smirnov en calculant λ (critère de Kolmogorov) pour chacun des points écartés de la droite (fig);

$$\lambda = \frac{100\Delta Y}{\sqrt{N}}$$

où λ - critère de Kolmogorov-Smirnov

Δy - Ecart entre l'ordonnée estimée à partir de la "droite de Henry" et celle mesurée pour une même teneur - même abscisse

N - effectif total des échantillons prélevés.

Si $\lambda < 1.35$ alors le type de distribution est confirmé sinon l'hypothèse initiale est rejetée.

S'il existe beaucoup de points qui sont trop dispersés sur le graphe, il serait alors meilleur de calculer Δy_{\max} pour chaque Y avec $\lambda=1.35$ et de faire passer la droite à l'intérieur des intervalles limites.

Dans le cas où le test de Kolmogorov-Smirnov confirme une distribution normale des teneurs, alors la teneur dont l'effectif est 50% (intersection de la droite de Henry avec la droite horizontale d'ordonnée 50%) correspond à la teneur moyenne - T_m - Cette valeur est prise comme fond géochimique - T_f .

Les teneurs dont les ordonnées sont 84%, 98% et 99.8% correspondent à : T_m+S , T_m+2S et T_m+3S où S est l'écart type expérimentale.

- Pour une distribution normale :

Les teneurs anormales, en fonction du nombre de points de prélèvement adjacents - n - sont calculées à l'aide des formules suivantes :

$T_a = T_f + 3 \sigma_{\text{moy}}$, comme $\sigma_{\text{moy}} = \sigma/\sqrt{N}$ où σ est l'écart type de la population

alors : $T_a = T_f + 3.(\sigma/\sqrt{n})$

ainsi pour au moins :

1 point : $T_{a1} \geq T_f + 3.(\sigma/\sqrt{1})$

2 points : $T_{a2} \geq T_f + 3.(\sigma/\sqrt{2})$

3 points : $T_{a3} \geq T_f + 3.(\sigma/\sqrt{3})$

.....
.....

pour au moins 9 points : $T_{a9} \geq T_f + 3.(\sigma/\sqrt{9}) = T_f + \sigma$

- Pour une distribution lognormale :

La moyenne géométrique G correspond au fond géochimique T_f :

$$T_f = G = \sqrt[n]{x_1^{n1} . x_2^{n2} \dots x_k^{nk} .}$$

Avec x_i – centre de la classe statistique i, et n_i effectif de cette classe i ;

N –effectif total

Pour déterminer les valeurs anormales, on utilise la formule

$$T_{a_n} = T_f . \varepsilon^{3/\sqrt{n}} \sqrt{x_1^{n1}} .$$

avec :

$\varepsilon = \text{ant. lg}(S)$ - S étant l'écart type expérimentale – $\lg(\varepsilon)=S$

n - le nombre de points de prélèvement adjacents

Les valeurs des T_{an} sont cartographiées. Ainsi les secteurs à concentrations anormales sont localisés. Ces anomalies sont interprétées essentiellement à l'aide des données géologiques.

En l'absence de moyen de calcul performant, cette méthode peut être utilisée.

II - NOTION DE DEBUT DE TENEURS ANOMALES - DTA - ET DEBUT DE TENEURS SIGNIFICATIFS - DTS - (LEPELTIER, 1969)

Dans le cas où le test de Kolmogorov-Smirnov serait négatif - $\lambda > 1.35$ - et par conséquent les intervalles Δy_{\max} ne permettent pas d'établir la droite d'estimation (droite de Henry) alors on peut conclure à une hétérogénéité de données ou à un mélange de populations statistiques (histogramme multimodale). Ceci peut être dû à la présence de plusieurs faciès lithologiques dont le faciès "minéralisation" qui est recherché. Il est donc possible de décomposer l'ensemble des points reportés sur le graphe de probabilité en un certain nombre de sous-ensembles pouvant être estimés chacun par un segment de droite. Ainsi on obtient un certain nombre de segments qui forment une ligne brisée (Fig 3).

Tableau 2 – Traitement statistique de données géochimiques

Teneurs (Ti)	Effectif (ni)	Fréq. relatives fi (%)	Fréq. Cumulées (Fi) %
<1	100	6.03	6.03
3	200	12.05	18.08
5	350	21.08	39.16
8	400	24.10	63.26
15	300	18.07	81.33
20	100	6.02	87.35
30	80	4.82	92.17
50	40	2.41	94.58
70	20	1.20	95.78
100	30	1.81	97.59
>100	40	2.41	99.9999

Le résultat graphique (Fig. 3) est interprété de la façon suivante :

- 1 - Le segment de droite A correspond à une portion de la "droite de Henry" de la sous-population statistique A qui est une population d'échantillons géochimiques à faible teneurs;
- 2 - le segment de droite B, lui, correspond à une portion de la "droite de Henry" de la population B - population d'échantillons géochimiques de teneurs plus élevées et qui forment les anomalies par rapport à la première population;
- 3 - le segment (A+B) représente un mélange d'échantillons géochimiques des populations A et B.

Ainsi la teneur - abscisse du point A', point d'intersection des segments A et (A+B) - est la valeur de Début des Teneurs anormales DTA et l'abscisse du point B' - point d'intersection des segments (A+B) et B - est le Début des Teneurs Significatives DTS.

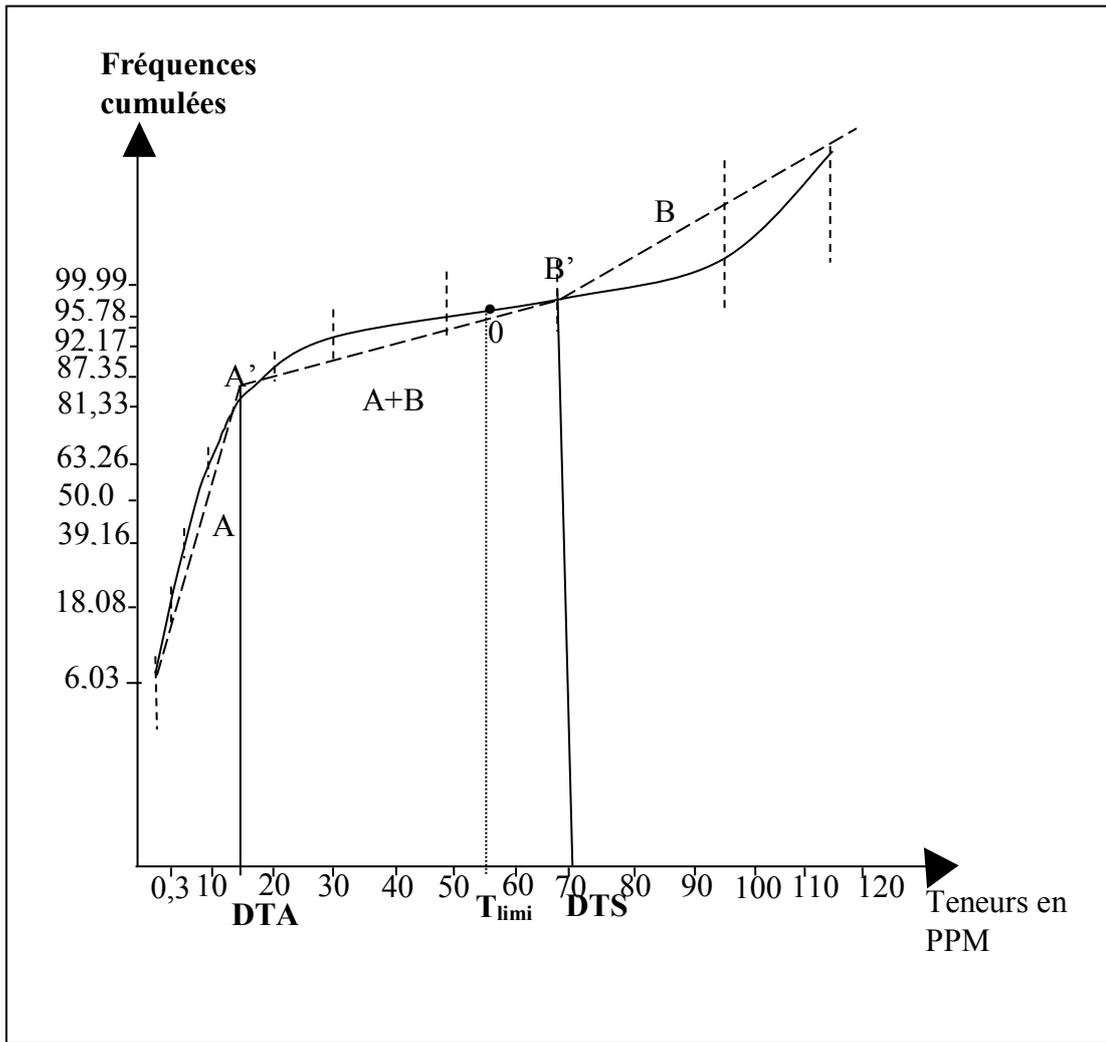


Fig. 3 – graphe de probabilité correspondant aux données Tableau 2.

III – DISCRIMINATION ET ESTIMATION DES PARAMETRES DE SOUS-POPULATIONS COMPOSANTES PAR LA METHODE DU « PASSAGE PAR ZERO » (MEZGHACHE, 1989)

La méthode du « passage par zero » est basée sur l'approche proposée par Sinclair (1974).

III. 1- Approche proposée par Sinclair (1974)

Cette dernière propose d'estimer les paramètres des sous-populations composantes, qu'elles soient celles représentant le faciès lithochimique (fond géochimique) ou le faciès "minéralisation" que l'on recherche.

Sur la figure 3, les trois segments de droites peuvent être assimilés à des portions d'une ligne courbe comportant un point d'inflexion O sur le segment (A+B). En commettant une légère erreur, on peut considérer la teneur - abscisse de ce point - comme la limite entre les populations et tel que :

$$F_m(x) = P_a \cdot F_a(x) + P_b \cdot F_b(x) \quad (1)$$

$$\text{et } F_m(X_{\max}) = 1$$

où $F_m(x)$ - la fonction de repartition - F.R. - (fréquences cumulées) de l'ensemble des teneurs
 $F_a(x)$, $F_b(x)$ - les F.R. des sous-populations P1 et P2 (A et B).

P_a , P_b - les poids (proportions) des sous-populations.

Au point O, on a : $P_a = F_m(O)$ et $F_a(O)=1$

Les probabilités (fréquences cumulées) des valeurs de la population A sont recalculées par la formule :

$$F_a(x_i) = F_m(x_i)/P_a$$

Les probabilités des teneurs de la population B sont recalculées par :

$$P_b = 1 - F_m(a)$$

et

$$F_b(X_i) = \frac{F_m(X_i) - F_m(O)}{P_b}$$

où $F_m(O)$ est la F.R. au point d'inflexion et qui est égale à P_a

Connaissant les poids P_n des différentes sous-populations, leurs probabilités et les points d'inflexions limitant ces distributions composantes, on procède au calcul des fréquences cumulées de la population "mélange" en utilisant la formule (1).

On retrace la courbe à partir des résultats obtenus. Dans le cas où les limites entre sous populations composantes étaient bien choisies alors les deux courbes (celle tracée à partir des analyses et celle obtenue après calcul) se superposeraient sinon on reprendra d'autres valeurs pour les points d'inflexion (proches des premières) et l'on refait les calculs.

Une fois que les limites entre sous populations aient été déterminées, on peut tracer les droites de Henry caractérisant chacune des sous-populations composantes. Leurs moyennes respectives correspondent aux teneurs dont les probabilités sont égales à 50% (sur le papier de probabilité) et leurs écart-types respectifs aux teneurs qui correspondent aux probabilités 84% moins les teneurs moyennes des sous-populations.

Cette méthode est applicable même dans le cas où la population "mélange" est composée de plus de deux sous-populations.

III. 2 – Méthode du « passage par zero » proposée par Mezghache (1989)

Un algorithme non graphique pour la discrimination automatique des sous populations composantes d'une série de données géochimiques basée sur l'approche proposée par Sinclair (1974) a été proposé par Mezghache (1989).

Les étapes de cette méthode sont :

- 1 – tri des teneurs des échantillons géochimiques par ordre croissant,
- 2 – détermination et calcul des fréquences cumulées des teneurs,
- 3 – A l'aide de la table de Gauss, détermination de l'inverse des probabilités de Gauss pour chaque fréquence cumulée (fonction de répartition). L'inverse de probabilités de Gauss peut être estimé à l'aide du polynôme d'approximation d'Abramovitz (Mezghache, 1989).

4 – tracé le graphe de Normalité- Droite de Henry- Il s'agit du graphe biplot –Inverse de probabilité de Gauss/Teneur ; On obtient alors la courbe de fonction de répartition.

5 – Décomposition de la Fonction de Répartition des données en sous populations composantes suivant chacune une loi normale : Il s'agit de rechercher les points d'inflexion sur la courbe de la fonction de répartition– points limites entre les segments représentant de chaque sous population composante. Pour cela, la méthode de convolution issue des techniques du traitement d'image est utilisée : A l'aide du dispositif -1, +2,-1, on calcule des dérivées secondes des inverses des probabilités de Gauss.

$$F_m'' = 2F_m - F_{m-1} - F_{m+1}$$

Le point d'inflexion- point limite entre deux sous populations correspondra au point m quand $F_m'' = 0$ lors de sa décroissance (dans son passage du positif au négatif=passage par zero).

Les poids des sous populations composantes sont obtenus par soustraction des probabilités aux points d'inflexion :

$P_a = \text{Prob}(\text{pinf}_1)$

$P_b = \text{Prob}(\text{pinf}_2) - \text{Prob}(\text{pinf}_1)$;

$P_n = 1 - \text{Prob}(\text{pinf}_{n-1})$

Avec pinf_i – Teneur du point d'inflexion i limitant les sous populations 1 et 2.

$\text{Prob}(\text{pinf}_i)$ - Probabilité de pinf_i

6 – Calcul des probabilités et paramètres des sous populations composantes.

Les probabilités (fréquences cumulées) des valeurs de la population 1 sont recalculées par la formule :

$$F_1(x_i) = F_m(x_i)/P_a$$

$F_m(x_i)$ – Fonction de répartition de l'ensemble des données du mélange (données initiales) ;

Les probabilités des teneurs de la population 2 sont recalculées par :

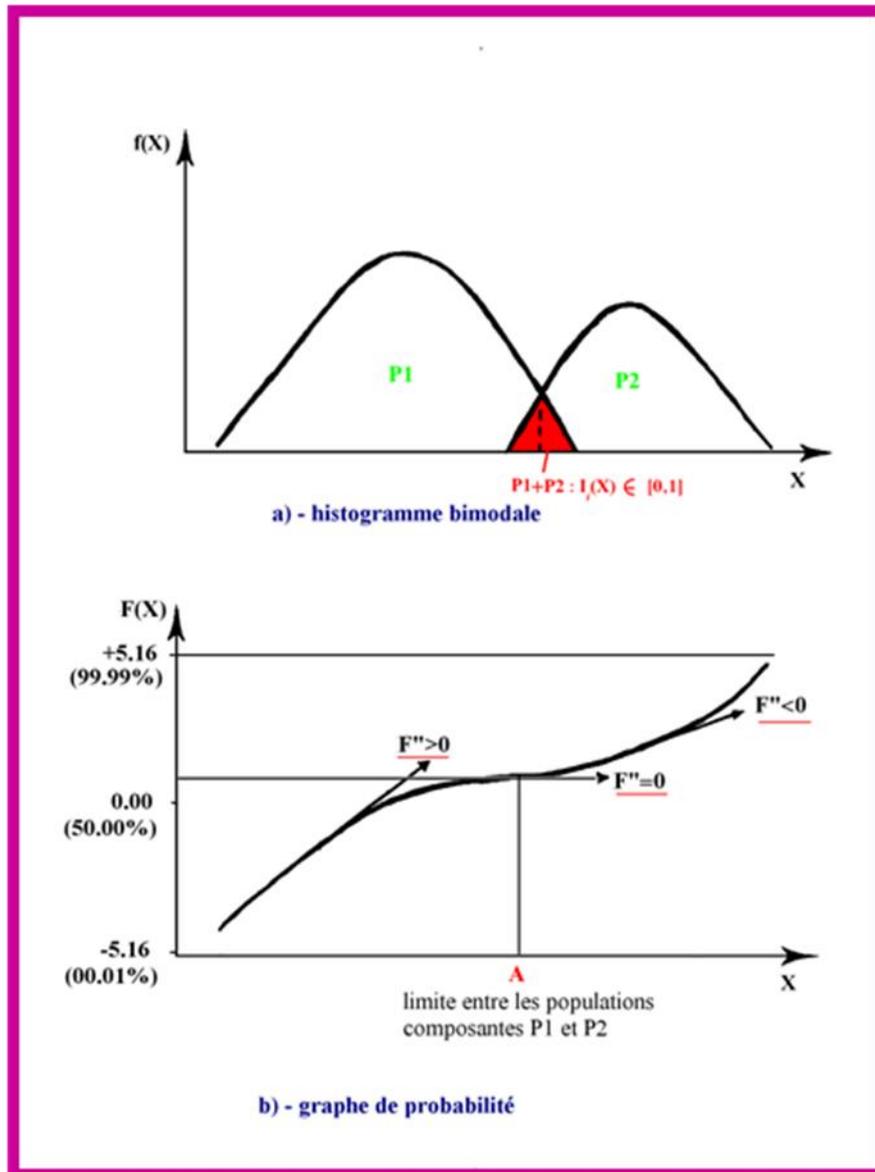
$$P_b = 1 - F_m(a)$$

et

$$F_2(X_i) = \frac{F_m(X_i) - F_m(O)}{P_b}$$

où $F_m(O)$ est la F.R. au point d'inflexion O et qui est égale à P_a

7 – Calcul des paramètres statistiques pour chacune des sous populations composantes.



classification monovariante par la méthode du « passage par zero »

Fig. 1 - Plan de situation des points de mesures (sondages,) – En rouge= nœud de maille ; en noir= point de mesures

1. 2. - La régularisation de la maille et la commande « GRID » ou « REGULAR » ou « autre appellation.)

La régularisation consiste à estimer les valeurs de la variable à cartographier (visualiser) à chaque nœud de maille - Cette maille peut être soit choisie arbitrairement soit imposée: il suffit de choisir un intervalle Δx sur l'axe des X et Δy sur l'axe des Y.

Les nombres d'intervalles en X et en Y sont de :

$$N_X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\Delta X}$$

et

$$N_Y = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{\Delta Y}$$

Chaque nœud de maille (en rond sur le plan) est rattaché géographiquement par les coordonnées x et y.

La régularisation consiste à estimer les valeurs de la variable spatiale $Z(x)$ en chaque nœud de maille désigné par X en utilisant les mesures (informations) existantes.

$$Z(x) = f(x_1, x_2, x_3, \dots)$$

1. 3. - Le tracé de la carte : Lignes d'isovaleurs et/ou bloc diagramme

Il existe plusieurs algorithmes pour le tracé lui-même. L'objet du cours n'étant pas « les algorithmes », aucun d'eux ne sera donc présenté ici.

2. - Les méthodes d'interpolation

L'interpolation c'est l'obtention (l'estimation) d'une information géographique (SIG) continue - une variable spatiale donnée - à partir de mesures ponctuelles de cette même variable (teneur, propriété physique,...).

Il existe plusieurs méthodes d'interpolation (plus d'une vingtaine et une douzaine dans "Surfer8") qui sont classées en deux (2) grandes catégories :

- les méthodes d'interpolation classiques;
- les méthodes d'interpolation (d'estimation) géostatistiques.

Parmi les méthodes classiques, il y a celles qui traitent uniquement les données de la variable étudiée: elles regroupent un grand nombre de techniques qui définissent souvent la valeur recherchée d'une variable en 1 point donné comme une combinaison linéaire pondérée de mesures disponibles.

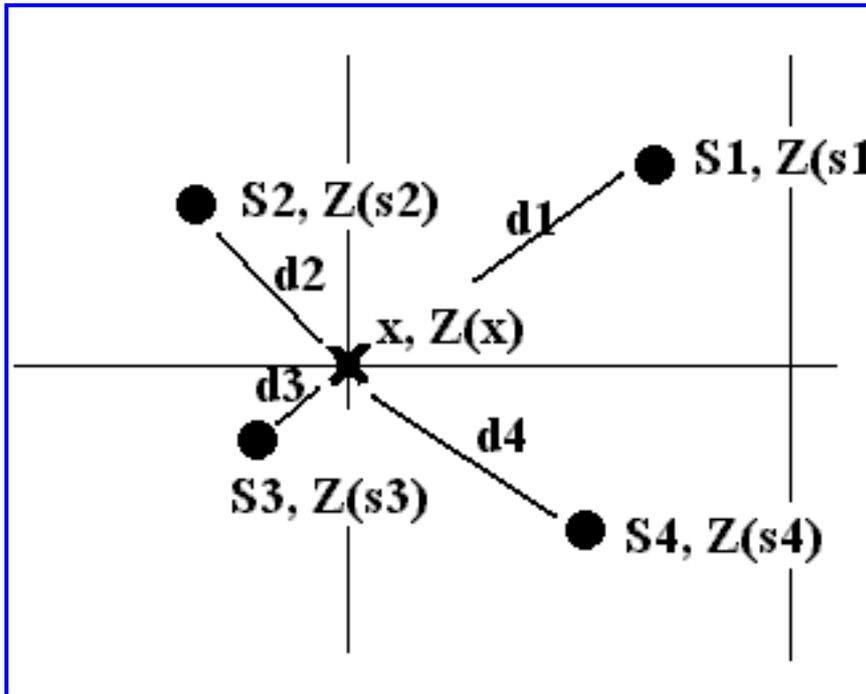


Fig. 2 - Position du point x par rapport aux données disponibles

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i)$$

Parmi les méthodes les plus usitées, il y a les méthodes barycentriques qui tiennent compte d'un nombre important de données de mesures et qui affectent un poids plus important aux données les plus proches au point cible.: méthodes d'interpolation par l'inverse des distances à la puissance n.

- Il y a aussi les méthodes de régression polynomiale

$$Z = f(x, y)$$

2. 1 - Les méthodes d'interpolation classiques

a. - Les méthodes barycentriques: méthodes d'interpolation par l'inverse des distances a la puissance n

Soit un point cible X (en 2D) de coordonnées x et y:

*. - Cas où X se trouve au centre d'un carré ou losange reconnu par 4 mesures aux sommets

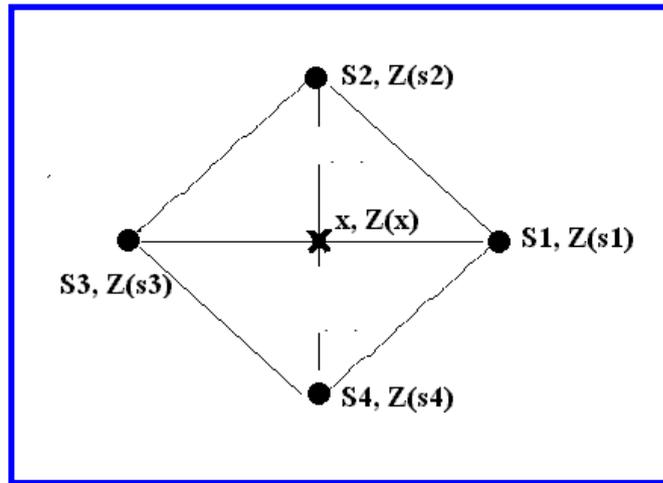


Fig. 3 - Estimation par moyenne arithmétique

L'estimation de $Z(X)$ à l'aide de moyenne arithmétique donnerait :

$$Z(x) = \sum_{i=1}^4 \frac{Z(S_i)}{4} = \frac{1}{4} Z(S_1) + \frac{1}{4} Z(S_2) + \frac{1}{4} Z(S_3) + \frac{1}{4} Z(S_4)$$

Dans ce cas: $\lambda_i = \frac{1}{n} = Cte = \frac{1}{4}$

*. - Cas où X se trouve dans un rectangle ou polygone (Fig. 2)

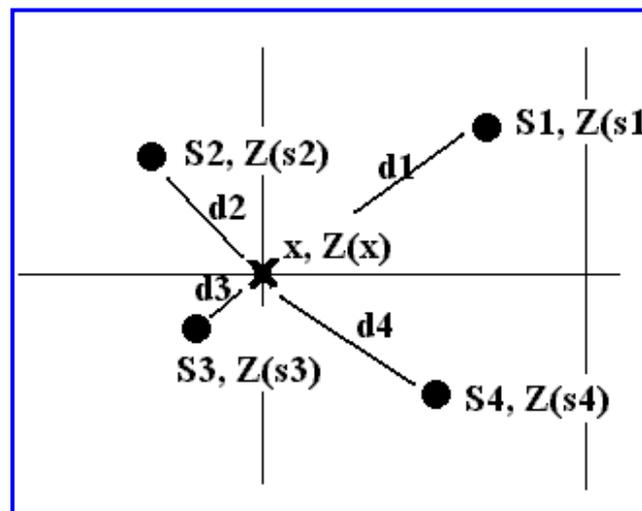


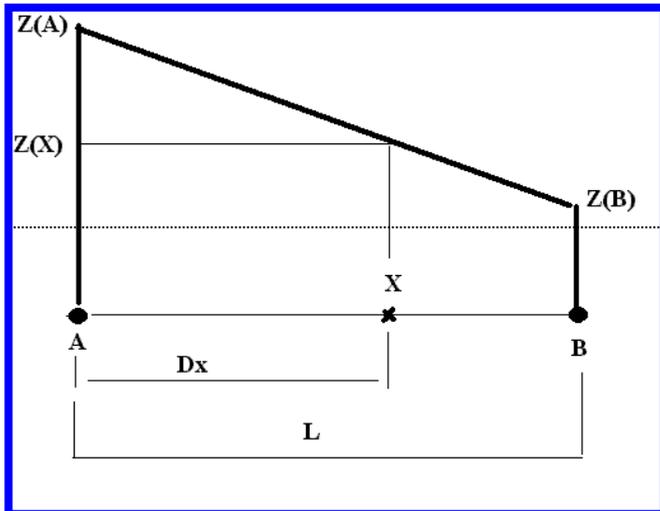
Fig. 2 – Interpolation par la méthode de l'inverse des distance: Position du point X où la valeur est à estimer par rapport aux données S_i

Peut-on garder $\lambda_i = \frac{1}{n} = Cte = \frac{1}{4}$? - Intuitivement non! : La donnée la plus proche est la plus influente - l'influence est inversement proportionnelle à la distance entre le point mesuré et le point cible X. **D'où la méthode de l'inverse des distances à la puissance n.**
 Si n=2 alors on aura :

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{d_i^n} Z(S_i) \right]}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^n}} = \frac{\left[\frac{1}{d_1^2} Z(S_1) \right] + \left[\frac{1}{d_2^2} Z(S_1) \right] + \left[\frac{1}{d_3^2} Z(S_1) \right] + \left[\frac{1}{d_4^2} Z(S_1) \right]}{\left[\frac{1}{d_1^2} \right] + \left[\frac{1}{d_2^2} \right] + \left[\frac{1}{d_3^2} \right] + \left[\frac{1}{d_4^2} \right]}$$

b. - La méthode de triangulation - la méthode d'interpolation linéaire

$$Dx = \frac{Za - Zx}{Za - Zb} \cdot L \Rightarrow Zx = Za - \frac{Dx \cdot (Za - Zb)}{L}$$



c. - La méthode des moindres carrés (courbe ou surface)

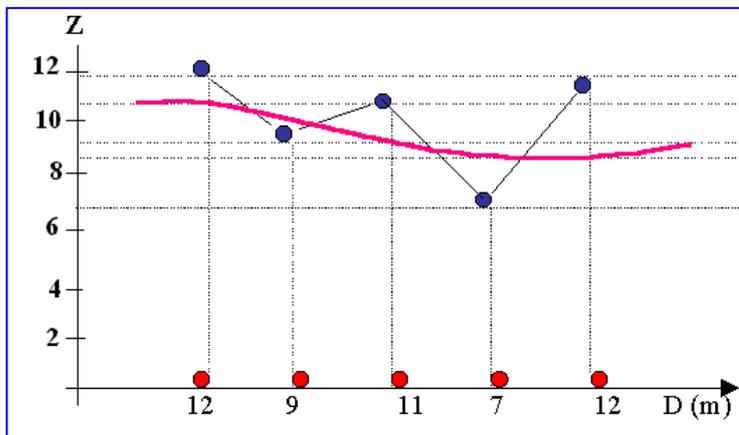


Fig. - Interpolation par la méthode des moindres carrés

Inconvénients majeurs des méthodes classiques :

1 - Ce ne sont pas des interpolateurs exactes : Si un point cible X a même coordonnées qu'un point mesuré, la valeur qui serait estimée pour le premier ne serait pas égale à celle mesuré au niveau du second.

2 - L'erreur (Variance d'estimation) n'est pas forcément minimale même si ces estimateurs sont sans biais (les erreurs sont en moyennes nulles).

2. 2. - Les méthodes d'interpolation (d'estimation) géostatistiques.

Ces méthodes tiennent compte de l'auto corrélation spatiale des variables spatiale - de la structure mathématique de cette variabilité.

En estimation par combinaison linéaire, il s'agirait donc d'estimer les pondérateurs λ_i en fonction de cette variabilité spatiale quantifiée par l'outil de base de la géostatistique qui est soit le semi-variogramme $\gamma(h)$, soit la fonction covariance $C(h)$ soit le corrélogramme $\rho(h)$.

$$Z(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad \text{avec } \lambda_i = \text{fonction...du..var iogramme..}\gamma(h)$$

Cette procédure est dite procédure de krigeage. Elle permet aussi de calculer la variance d'estimation - équivalent de l'erreur d'estimation - qui est minimale dans ce cas.

Le krigeage est une méthode de constructeur d'estimateur et un interpolateur exact. C'est donc la méthode la plus optimale et qui est la plus recommandée.

TP-TD - CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE A L'AIDE DE SURFER