

Modélisation numérique de la minéralisation polymétallifère du gisement de Tighza (Maroc central) par l'outil SIG et la géostatistique

Amina KASSOU ^{1*}, Mohamed AISSA¹ et Ali ESSAHLAOUI ²

¹ *Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Laboratoire d'Etudes des Ressources Minérales et Energétiques, B.P. 11201 Zitoune, Meknès, Maroc*

² *Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Equipe « Sciences de l'eau et ingénierie de l'environnement », Maroc*

* Correspondance, courriel : kassou.amina@gmail.com

Résumé

Le gisement de Tighza est le 1er site producteur de concentré de plomb et le 2nd fournisseur d'argent au Maroc. Sa durée de vie s'étale sur 15 ans .en effet, la Compagnie minière de Touissit (CMT) a réalisé, en 2008, un chiffre d'affaires de 291,4 MMDH contre 247,3 en 2007, soit une progression de plus 17%. Cette augmentation est due, entre autres, à l'évolution positive des tonnages vendus (plomb +14,3%, zinc +48,9%). Pour les opérateurs miniers, la viabilité du site est capitale. Les recherches menées actuellement visent à prolonger la durée d'exploitation du gisement de Tighza. Ces recherches pose, au sein de la Compagnie Minière de Touissit (CMT), un problème d'organisation et de stockage de l'information produite par ses différents services notamment celui de la géologie. Face à cette situation, et compte tenu du volume de données produit, qui ne cesse de s'accroître d'une part, et leur éventuelle perte d'autre part, la CMT a décidé d'instaurer un système d'information, à travers une base de données numérisée, lui permettant le stockage, le traitement et l'exploitation rationnelle de l'information disponible en vue d'aider les responsables miniers à prendre les décisions qui conviennent. Dans ce sens, nous avons utilisé l'environnement ArcGIS pour mettre en place une base de données spatiales par la numérisation, le géo-référencement et l'élaboration d'un certain nombre de couches d'informations à partir de cartes topographique, géologique, géochimique et les données de sondages carottés. Ainsi un Modèle Numérique de Terrain (MNT) du secteur de Tighza a été élaboré en se basant sur les courbes de niveau et des points côtés digitalisés à partir de la carte topographique.

Ce travail est complété par un traitement statistique et géostatistique. Ainsi une analyse multidimensionnelle utilisant l'analyse en composante principale (ACP) a permis de déterminer les principaux axes factoriels. Le traitement géostatistique des données géochimiques a consisté d'abord à une modélisation des variogrammes des différents éléments chimiques, l'élaboration des cartes variographiques et enfin l'établissement des cartes de répartition spatiale par krigeage pour chaque élément. Les cartes thématiques obtenues pouvant conduire à l'élaboration d'un modèle géochimique renseignant sur la répartition des métaux de ce district.

Mots clés : *SIG, cartographie, géologie minière, statistique, géostatistique, Tighza, Maroc Central.*

Abstract**Numerical modelling of the polymetallic mineralization in the Tighza mining deposit (central Morocco) by the GIS tool and geostatistical**

The Tighza deposit is the first producer site of the lead concentration and the 2nd supplier of the silver in Morocco. His lifetime spans over 15 years. Indeed, the Touissit Mining Company (TMC) conducted in 2008 a turnover of 291.4 milliards dirhams against 247.3 in 2007, with an increase of over 17%. This increase is due, among other things, to the positive evolution of the sold tonnages (+14.3% lead, +48.9% zinc). For the mining operators, the viability of the site is capital. The current research aimed to extend the exploitation life of the Tighza deposit. This research raises, within the Touissit Mining Company (TMC), a problem of information organization and storage which generated by its various departments, including that of geology. Faced with this situation, and taking into account the volume of product data, which continues to grow on one hand and their possible loss on the other hand, the Touissit Mining Company decided to establish a geographic information system by means of a computerized database which allows the storage, processing, interpretation and access to information on the geological context, geochemical distribution, geophysical anomalies distribution and metal concentrations, in order to guide the exploration and exploitation work and to assist the mining managers to make suitable decisions. In this sense, we used ArcGIS software to develop a spatial database by scanning, georeferencing and development of a number of information layers from the topographic, geological and geochemical maps, also the Cores drilling data. Thus, a Digital Terrain Model (DTM) of Tighza sector was developed by basing on digitized contours and spot heights from the topographic map.

This work is complemented by a statistical and geostatistical treatment. So, a multivariate analysis, by using principal component analysis (PCA) has identified the principal factorial axes. The geostatistical treatment of geochemical data has firstly consisted to a variograms modelling of different chemical elements. Then, it has consisted to the production of variographic maps. Finally, it has been to an establishment of the spatial distribution maps by kriging for each element. The obtained thematic maps could lead to the development of a geochemical model, which is informing about the distribution of metals in this district.

Keywords : *GIS, cartography, mining geology, statistics, geostatistics, Tighza, central Morocco.*

1. Introduction

Les systèmes d'information géographique (SIG) ont, ces dernières années, connu une expansion rapide, et couvrent de nombreux domaines incluant celui de la cartographie géologique et la géologie minière où les SIG sont d'utilisation courante aussi bien lors des phases de prospection que d'exploitation. L'utilité de cette nouvelle approche se résume dans la spatialisation de l'information et la mise à jour de l'information relative au contexte géologique, la répartition géochimique, la distribution des anomalies géophysiques et des concentrations métalliques, dans le but de développer la production minière en orientant les travaux d'exploration et d'exploitation.

Au Centre minier de Tighza, la Compagnie Minière de Touissit (CMT) est confrontée à un problème d'organisation et de stockage de l'information produite par ses différents services notamment celui de la géologie au niveau de ses 3 sites d'exploitation (Signal, Ighrem Aousser et Sidi Ahmed). Face à cette situation, et vue le volume de données produit, qui ne cesse de s'accroître d'une part et leur perte éventuelle, d'autre part, la CMT a décidé d'instaurer un système d'information géographique à travers une base de données numérisée qui lui permet le stockage, le traitement, l'interprétation et l'accès à

l'information relative au contexte géologique, la répartition géochimique, la distribution des anomalies géophysiques et des concentrations métalliques, en vue d'orienter les travaux d'exploration et d'exploitation et d'aider les responsables miniers à prendre des décisions convenables.

Ce travail est complété par un traitement statistique (analyse multidimensionnelle) et géostatistique des données géochimiques et la réalisation de cartes thématiques pouvant conduire à l'élaboration d'un modèle géochimique renseignant sur la répartition des minéralisations polymétallifères de ce district.

2. Présentation générale du district minier de Tighza

2-1. Situation géographique

Le district minier de Tighza, est localisé dans la partie nord orientale du Maroc Central, près de la bordure Ouest du Causse moyen-atlasique, à une trentaine de kilomètres au nord-ouest de la ville de Khénifra et à 7 km de la ville de M'ritt. Il est accessible par la route principale 24 joignant Azrou à Khénifra, ainsi que par la route secondaire 209 qui relie M'ritt à Meknès (*Figure 1a*).

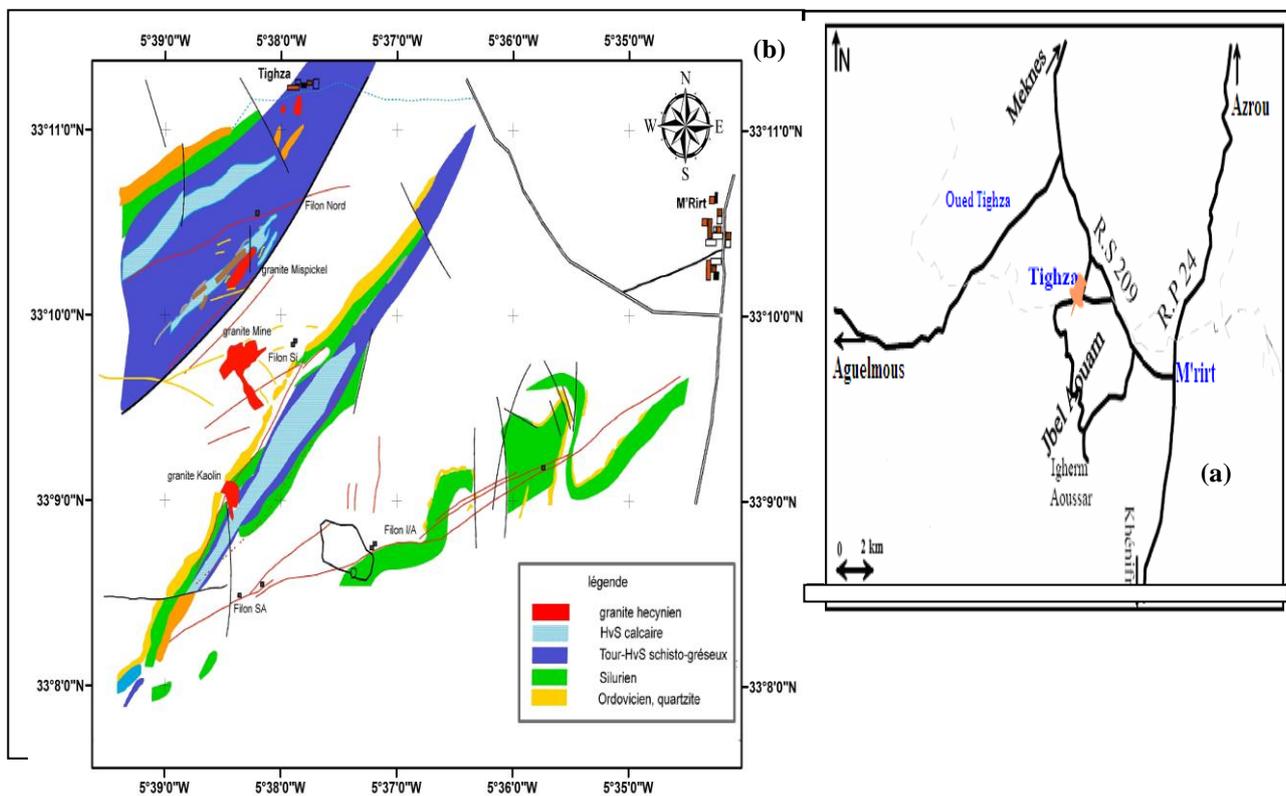


Figure 1 : Localisation géographique (a) et contexte géologique du district minier de Tighza (b)

2-2. Cadre géologique

Sur le plan géologique, le district minier de Tighza, qui fait partie de l'anticlinorium de Kasbat-Tadla-Azrou, illustre bien la géologie hercynienne de la plus grande unité de la méséta occidentale marocaine. Il est constitué par des terrains sédimentaires paléozoïques d'âge ordovicien à carbonifère (*Fig. 1b*). Ces terrains sont affectés par un faible métamorphisme régional (anchi à épizonal) et qui ont été déformés par les différentes phases de l'orogénèse hercynienne ayant structuré toute la région du Maroc Central en un ensemble d'anticlinoriums et de synclinoriums et à des zones de cisaillements décrochants à jeux répétés

ayant permis la mise en place d'une minéralisation polymétallique d'importance économique [1-8]. Les minéralisations filoniennes, encaissées dans ces formations paléozoïques, sont à Pb, Zn, Ag, W et Au et sont actuellement en cours d'exploitation par la Compagnie Minière de Touissit (CMT). Celle-ci fournit 52% de la production nationale en concentré Pb, 26% d'Ag et 3.2% du concentré Zn avec une production annuelle de 350 000 tttv, 30 000 t Pb métal et 4 000t Zn métal. Les réserves estimées sont à plus de 5 000 000 tttv [9].

2-2-1. Aperçu lithostratigraphique

Les terrains du district de Tighza s'échelonnent de l'Ordovicien supérieur jusqu'au Viséen supérieur inclus. Cette série est plus au moins complète selon les endroits. Les terrains d'âge Ordovicien et Viséen supérieur affleurent en abondance dans ce secteur tandis que les affleurements Siluriens sont très limités (*Fig. 1b*).

a- L'ordovicien : Les terrains de l'Ordovicien constituent les massifs de l'Aouam, d'Anajdam et d'Iguer oujana qui représentent le matériel allochtone de la nappe de Mrirt. Les dépôts attribués à l'Ordovicien supérieur allochtone ou autochtone sont à caractère essentiellement détritique, montrant à la base une série schisteuse micacée de couleur sombre avec des alternances de grès et pélites et au sommet des barres de quartzites associées à des microconglomérats [10].

L'Ordovicien de la région de Mrirt est à dominance argileuse ou argilo-gréseuse à caractère rythmique; sa partie sommitale montre le faciès caractéristique de l'Ordovicien supérieur de grés-pélites microconglomératiques, surmonté par des barres quartzitiques.

b- Le silurien : Le Silurien évoque une succession lithologique à dépôt essentiellement détritique fin. Il repose directement sur les quartzites sommitaux de l'ordovicien supérieur allochtone. Il est représenté par des pélites gréseuses à teinte gris-bleutée se débitant en plaquette surmontées des pélites argileuses à graptolites et des pélites noires à rouge violacées. Ces faciès sont connus respectivement dans la région de J. Aouam sous le nom de schistes Mokattam et schistes cloisonnés.

c- Le dévonien : Les dépôts du Dévonien inférieur sont constitués d'argilites indiquant une sédimentation calme de plate forme externe, qui va s'enrichir en nodules et calcaire. Cette sédimentation carbonatée va subir une perturbation, puisqu'au Dévonien supérieur, la sédimentation se poursuit par des dépôts d'argilites silteuses à intercalations de calcaires fins porteurs de nombreux indices syn-sédimentaires qui indiquent une instabilité du substratum [6].

d- Le carbonifère : Les séries grés-conglomératiques et grauwackeuses du Tournaisien reposent en discordance sur les terrains antérieurs et sont surmontées par des dépôts marins de plateforme, constitués essentiellement de calcaires bioclastiques, calcaires gréseux et marnes d'âge viséen moyen. Une épaisse série du Viséen supérieur, détritique à caractère de flysch fait suite à ces dépôts de plate-forme et achève ainsi le cycle sédimentaire régional.

2-2-2. Aperçu tectonique

La structuration des formations paléozoïques de tout le Maroc central en unités synclinales et anticlinales à orientation NE-SW est produite par la phase majeure de l'orogénèse hercynienne dite phase namuro-westphalienne.

Le district de Tighza est situé dans une zone de décrochement et de nappes au centre du bassin viséen Azrou-Khenifra [3]. Les différentes études structurales ont permis de mettre en évidence le caractère polyphasé de l'orogénèse hercynienne et de distinguer les trois grands épisodes de déformation [8] :

- *Une phase de plissement intense post Dévonien*, cette première phase de plissement correspond à une déformation intense avec plissement souple des séries paléozoïques. En général, les phases

tectoniques antérieures au Viséen supérieur sont le plus souvent, très difficiles à apprécier car les phases postérieures, qui s'y superposent, ont tendance à gommer leurs effets.

- *Une phase de plissement postérieure au Viséen supérieur, c'est la phase la plus importante, elle est responsable de l'architecture actuelle et le découpage en unités monoclinales du district.*
- *Une phase cassante (anté-Viséen supérieur) en plusieurs épisodes a abouti par la succession de régimes tectoniques compressifs et distensifs, à la création d'une zone de cisaillement E-W et d'un réseau dense de fractures NE-SW et E-W profondément enracinées, à travers lesquelles les circulations hydrothermales ont pu être canalisées et contrôlent ainsi la mise en place des minéralisations polymétalliques.*

2-3. Magmatisme et métamorphisme

2-3-1- Magmatisme

La mise en place de corps magmatiques de natures très variées dans tout le Maroc central est liée à la tectonique varisque. Dans le district minier de Tighza, le magmatisme acide post-orogénique est représenté par :

- Des filons de microgranodiorites et de microgranites alignés cartographiquement suivant la direction NE-SW et rarement E-W. A l'affleurement, ils présentent une différence de couleur allant du gris clair au rose clair, cette différence est liée à la nature des minéraux qui les composent [6].
- Des stocks granitiques qui sont au nombre de quatre, alignés selon un axe NS, avec du nord au sud : les pitons de Tighza, les granites du mispickel, de la mine et du kaolin, les pitons de Tighza, très petits, n'ont pas été représentés). Ces pointements granitiques développent dans l'encaissant une auréole de métamorphisme de contact à l'origine d'une importante minéralisation polymétallique.

2-3-2. Métamorphisme

Dans la région de Tighza, on distingue des roches métamorphiques relevant du métamorphisme régional et des roches issues du métamorphisme de contact [8].

a- Métamorphisme régional

Il est développé durant un laps de temps assez bref qui correspond à la structuration post-Viséenne, il s'accompagne d'une paragenèse (illite-chlorite) qui caractérise un métamorphisme épizonal [6].

b- Métamorphisme de contact et hydrothermal

Ce métamorphisme se développe dans les séries s'étageant de l'Ordovicien supérieur au Viséen supérieur, il affecte trois types de faciès : les calcaires, les schistes et les grès.

L'activité magmatique et hydrothermale au sein du district s'accompagne par le développement d'une auréole de métamorphisme centrée sur les stocks granitiques, cette auréole occupe une surface de 3 Km sur 2 Km. En effet l'auréole est constituée par la superposition de deux phénomènes distincts [6] & [8]:

- Un métamorphisme de contact, essentiellement thermique et topochimique.
- Un métamorphisme hydrothermal, résultant de circulations des fluides hydrothermaux.

2-4. Minéralisations

Le district de Tighza est un district polymétallique comprenant une minéralisation très variée. En effet, en plus de Pb-Zn-Ag, le district englobe aussi des minéralisations à tungstène, molybdène, arsénopyrite, or, et des minéralisations à antimoine et barytine. Ces minéralisations polymétalliques sont le résultat du

fonctionnement d'un système hydrothermal polyphasé. Les concentrations de tungstène (WO₃) et or (Au), constituent le stade précoce et les minéralisations Plomb, Zinc, Argent, Antimoine le stade le plus tardif. La minéralisation au sein du district minier de Tighza se présente généralement sous forme filonienne.

2-4-1. Minéralisation à tungstène

Elles sont localisées dans l'auréole de métamorphisme de contact engendré par l'intrusion des stocks granitiques, deux groupes de minéralisations se développent :

- Une minéralisation de type skarns, dont la formation est due à l'infiltration des solutions hydrothermales, apportant la minéralisation de tungstène dans les roches schisto-gréseuse et calcaires d'âge Silurien-Dévonien et une diffusion lors d'un transfert métasomatique local [8].
- Une minéralisation filonienne, dont la mise en place a eu lieu postérieurement à la minéralisation de type skarn, dans un système de fractures ouvert correspondant à une direction de compression moyenne NW-SE. Les conditions de température et de pression du dépôt de cette minéralisation à tungstène ont été déterminées par [1] à 580 °C et 18 Kbar pour les skarns et de 400 à 450 °C et 1 Kbar pour les filons.

2-4-2. Minéralisation à antimoine et barytine

Les gîtes d'antimoine et barytine sont indépendants spatialement des gîtes plombo-zincifères et des gîtes aurifères, ils appartiennent à la province métallogénique à stibine du Maroc central [11]. Il s'agit toujours de minéralisation filonienne mise en place soit dans les fractures des microgranites (Tighza), soit dans des failles n'affectant que des formations sédimentaires paléozoïques (gîtes à l'Est de l'Aouam).

2-4-3. Minéralisation aurifère

La minéralisation en or dans le district minier de Tighza n'est pas une découverte récente, elle a été déjà mentionnée par [11]. Parmi les structures porteuses de cette minéralisation, on peut citer [8] :

- *Structures filoniennes :*
 - filon W1, et surtout W1 nord, WO3, W4 et W5,
 - structure au Nord de W1,
 - structure à l'est du granite du mispickel,
 - structure au SW du granite du mispickel,
 - structure NW-SE au toit du Signal (filon à arsénopyrite NW du Signal),
 - structure W2 et structure de Tighza,
- *Skarns à pyrrhotite et arsénopyrite*, principalement ceux au contact du granite du mispickel mais aussi aux environs du granite du kaolin,
- *Disséminations à pyrrhotite-arsénopyrite* dans les terrains viséens, découvertes dans des sondages recoupant des structures du nord (filons nord) et au sud du secteur près du granite du kaolin.

2-4-4. Minéralisation plombo-zincifère

Il s'agit d'une minéralisation représentée essentiellement par de grands filons, encaissés dans des schistes et quartzites Siluro-Ordoviciens, des calcaires et des schistes gréseux du Dévonien, recoupant localement les corps granitiques.

La minéralisation plombo-zincifère occupe un système de fracture comprenant du Nord au Sud, une succession de filons simples ou composés, presque toujours parallèles. L'ensemble est limité par un système Nord, comprenant les filons Nord et les filons parallèles, et un système Sud, composé par les filons

de Sidi Ahmed, Ighrem Aousser et Iguer Oujnna, orientés ENE-WSW. Entre les filons de ces 2 systèmes se développe un réseau de fractures en extension NE-SW à EW (système Signal). Les filons ont généralement une structure complexe, ils sont accompagnés de branches parallèles, plus au moins continues, ces branches peuvent s'accorder aux filons ou bien s'individualiser [8].

3. Apport des SIG à la modélisation numérique des corps minéralisés

3-1. Méthodologie: Acquisition et traitement des données

La modélisation numérique des données relatives à la topographie, à la géologie et à la géochimie ainsi que les données de sondages disponibles au district polymétallifère de Tighza a été réalisée à travers la mise en place d'une base de données sous un SIG.

3-1-1. Démarche du travail

La démarche suivie consiste en la transcription des différents types de cartes disponibles (élaborées en représentation planimétrique sur ce support papier), en format numérique. Elle comporte les étapes suivantes :

1. la collecte des données et de toutes les informations concernant le site minier de Tighza, (données topographiques, géologiques, géochimiques etc.) ;
2. la numérisation des différents types de cartes recueillies, et le traitement des cartes scannées par un logiciel de traitement d'images;
3. le géoréférencement des cartes au moyen du logiciel ArcGIS ;
4. la digitalisation des cartes disponibles et élaboration des différentes couches d'information;
5. l'intégration des données alphanumériques;
6. l'élaboration d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

3-1-2. Procédure de préparation et traitement des données

3-1-2-1. Numérisation et traitement de l'image

Cette étape permet de numériser l'information géographique se trouvant sur supports papiers (cartes) en images numériques (mode raster). La finesse de cette étape est liée surtout à la résolution du scanner utilisé (A_0). Le traitement de l'image scannée a été fait par le logiciel «Photoshop » pour améliorer la qualité de la visualisation de l'image.

3-1-2-2. Géoréférencement

Le géoréférencement est une étape importante dans la réalisation et la gestion des bases de données. Le processus de géoréférencement dans « ArcGIS » consiste à faire correspondre chaque pixel de cette image à un couple de coordonnées géographiques (en mètres par exemple). Plus on a de points de contrôle, meilleur sera l'ajustement et la correction des distorsions du géoréférencement. Ce processus permet d'afficher l'image dans un contexte spatial. Les avantages sont une juxtaposition avec les autres couches de données occupant le même espace géographique, et la mesure sur le PC de coordonnées, distances et surfaces réelles.

3-1-2-3. Digitalisation des cartes disponibles et élaboration des différentes couches d'information

Il s'agit de vectoriser toutes les informations présentes sur les images des cartes scannées à savoir les cartes topographique, géologique, géochimique ainsi que les sondages carottés. Ces données graphiques sont organisées ensuite en couches d'information (*Fig.2 et 3*). Ces couches d'informations comportent entre autres : la limite du district, les courbes de niveau, les points côtés, le réseau hydrographique, les routes, les pistes, les localités, la muraille, formations géologiques, les chevauchements, les failles, les filons

minéralisés, l'auréole métamorphique, profils géochimiques (4178 échantillons géochimiques ont été digitalisés, dont 2105 analysés), sondages carottés (329 sondages carottés digitalisés dont seulement 36 analysés (avec 377 échantillons analysés)).

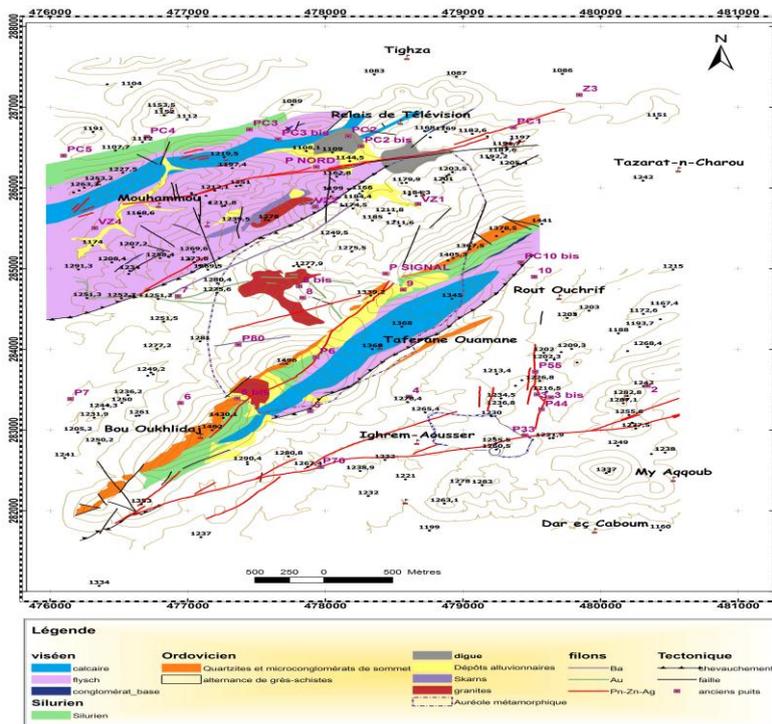


Figure 2 : Carte géologique et métallogénique de Tighza

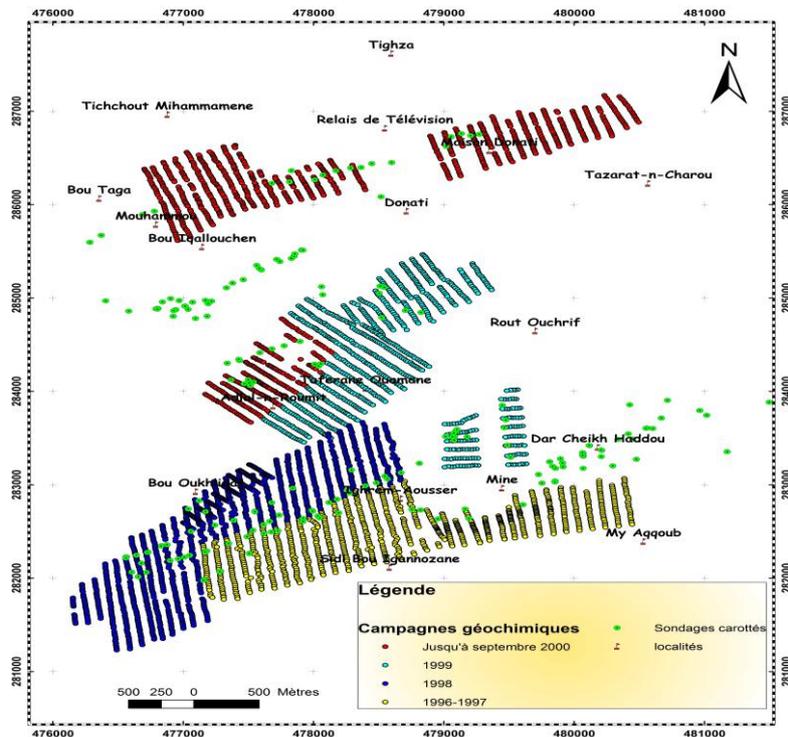


Figure 3 : Carte des profils géochimiques et sondages carottés

3-1-2-4. Intégration des données alphanumériques

Cette étape a permis l'élaboration d'une base de données consistant en la description de chaque objet graphique figurant sur chaque couche d'information. Les données alphanumériques sont stockées sous forme de tables dans des fichiers.

3-1-2-5. Élaboration d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Dans le secteur d'étude, le MNT a été réalisé par la numérisation des courbes de niveau et des points cotés, à partir de la carte topographique du secteur d'étude au 1/5000. L'équidistance des courbes de niveau numérisées est de l'ordre de 5 m, et l'altitude est comprise entre 1060 et 1490 m (Fig.4). Ce MNT permettra, entre autres, la génération automatique de profils, l'élaboration de carte des pentes, l'élaboration de carte d'exposition et la génération de réseaux d'écoulement. Le MNT élaboré avec une résolution excellente constitue, sans aucun doute, un document d'une grande utilité.

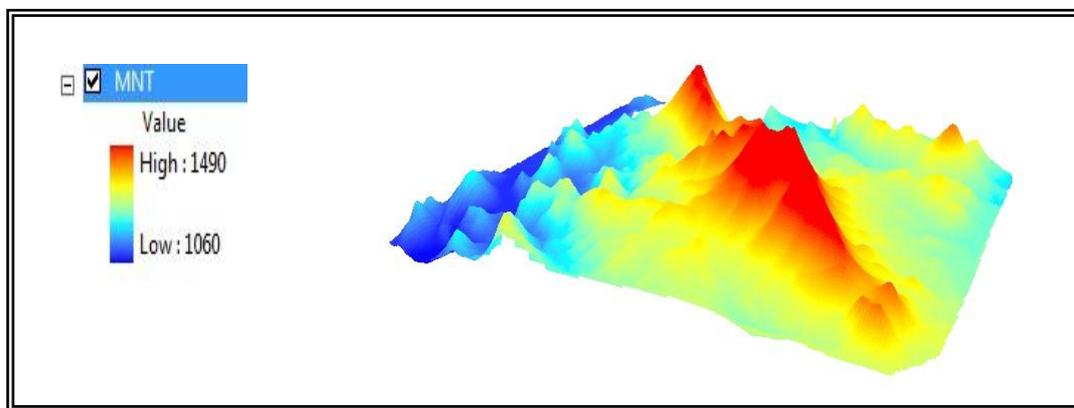


Figure 4 : *Modèle Numérique du Terrain (MNT) de Tighza*

4. Analyse statistique des profils géochimiques

L'analyse statistique des données vise essentiellement à décrire les liens entre les variables et les observations de notre matrice de données. Cette matrice est constituée de p variables et N individus. Ainsi, notre série statistique est constituée de 33 variables quantitatives mesurées de 2105 individus échantillonnés dans différents sites (Fig.5). Les variables quantitatives prises en compte dans ce traitement sont les teneurs en métaux lourds (Li, Be, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Y, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Pb, Bi, Ge et Se) et les teneurs en éléments majeurs (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, MnO, TiO₂ et P₂O₅).

L'objectif principal de cette étude est de dépouiller ces données géochimiques par l'approche statistique et géostatistique dont le but est d'une part, donner une vision globale sur les comportements géochimiques et d'autre part, reconnaître la dispersion des minéralisations polymétallifères constituant le district minier de Tighza.

Les profils ont été faits et organisés de sorte à s'aligner selon une direction N-S. Au total 2105 échantillons auront été réalisés suivant 45 lignes, avec les mêmes variables. Les échantillons sont distribués selon un maillage plus ou moins régulier d'environ 10 m.

On propose, d'abord une analyse statistique multivariée (Analyse en composante principale (ACP) et Classification hiérarchique ascendante (CHA)), dans le but de dégager des similarités entre les profils géochimiques relativement aux variables étudiés. L'ensemble des traitements statistiques a été effectué à

l'aide du logiciel MINITAB V.16 et l'application XLSTAT pour la représentation de l'ACP et aussi de CAH. Cette application permet de représenter directement les résultats sous forme de graphiques.

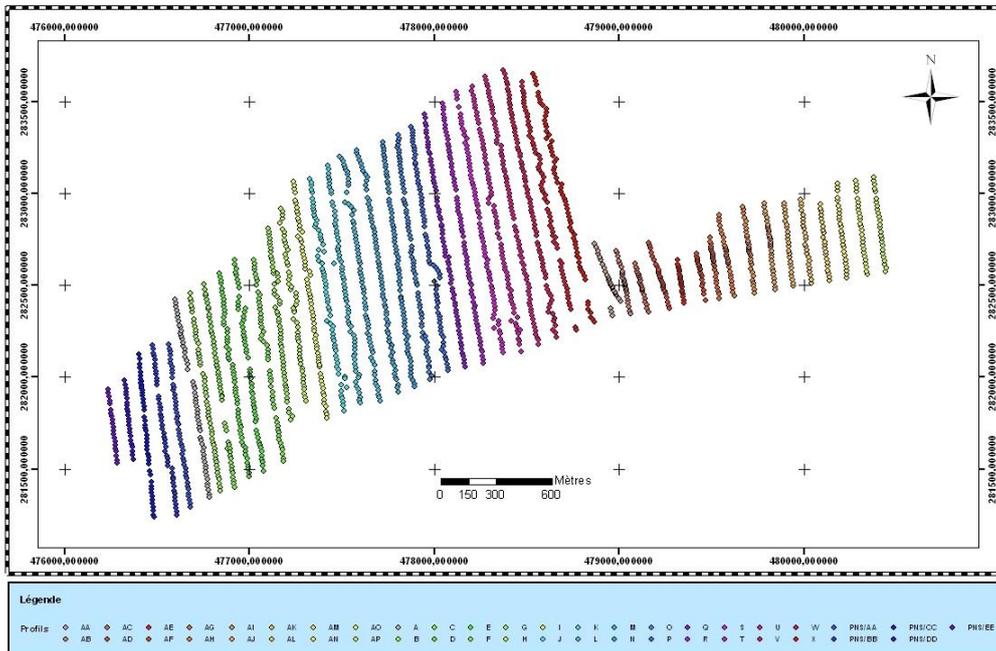


Figure 5 : Carte de situation des profils géochimiques

4-1 Analyse statistique en composantes principales (ACP)

Dans une première étape on travaille en prenant en compte la totalité des profils géochimiques sans tirage et avec une pondération uniforme. L'étude a été faite sur des données centrées réduites. La première analyse après le calcul de la distance des profils au centre de gravité G du nuage de points, a montré l'existence des individus (au total 41 échantillons, et qui ne représente que 1.9% de l'ensemble des profils) qui présentent une distance très importante à l'origine. Donc ils contribuent beaucoup à la variance totale. Par conséquent ces individus sont dits atypiques et du fait de leur forte contribution ils sont éliminés avant d'entamer l'analyse en composantes principales (Fig.6).

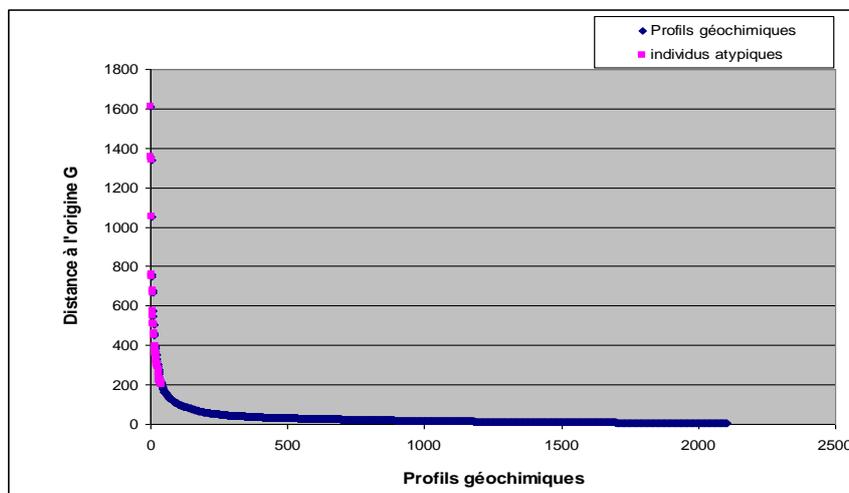


Figure 6 : Distance à l'origine G des profils géochimiques

Donc, la matrice des données à traiter est un tableau de 2064 individus et 33 variables. On a procédé à une technique multi-variée d'analyse en composantes principales (ACP). Elle consiste en une hiérarchisation de l'information contenue dans un tableau de données, et ceci par le calcul des axes d'allongement maximum d'un nuage de points selon plusieurs axes. Cette méthode, permet de mettre en évidence les interrelations entre les variables et les éventuelles ressemblances entre individus ou groupes d'individus présentant les mêmes caractéristiques sur un axe donné.

Le principe du traitement des données géochimiques en ACP est de regrouper les éléments chimiques qui présentent des caractéristiques chimiques similaires, en créant pour chaque regroupement une variable synthétique : la « composante principale ». Cette technique synthétise les relations inter-élémentaires en extrayant les vecteurs propres de la matrice des corrélations. Elle élabore des combinaisons linéaires des variables originales, produisant des facteurs exprimant ces relations inter-élémentaires. Un ensemble de nouvelles variables non-corrélées, pour lesquelles nous possédons les valeurs numériques à chaque point d'échantillonnage est produit. Les modèles d'ACP sont calculés à l'aide du programme de traitement statistique de données MINITAB V.16 et la fonction XL STAT.

L'interprétation des facteurs d'ACP constitue une base importante de notre étude, sur laquelle viennent s'appuyer nos travaux de caractérisation des médiums d'échantillonnage. Ainsi les échantillons des campagnes géochimiques s'ordonnent le long d'un axe factoriel de telle sorte que ceux qui se ressemblent le plus vis-à-vis de la composante principale sont regroupés sur cet axe. Chaque composante principale recèle une part de l'information totale décrite par sa « valeur propre ». En interprétant conjointement plusieurs axes factoriels, on cumule l'information exprimée sur chaque composante principale.

La répartition de la variance totale en fonction des facteurs, note une première composante principale dominante expliquant près de 23.87% de la variance totale. Donc, pour obtenir une meilleure représentation des données, on prend les premières composantes principales. Avec les dix premiers axes factoriels (F1, F2, ..., F10), nous avons près de 67.38% de l'inertie (ou de la dispersion) de tout le nuage de points (Figure 7).

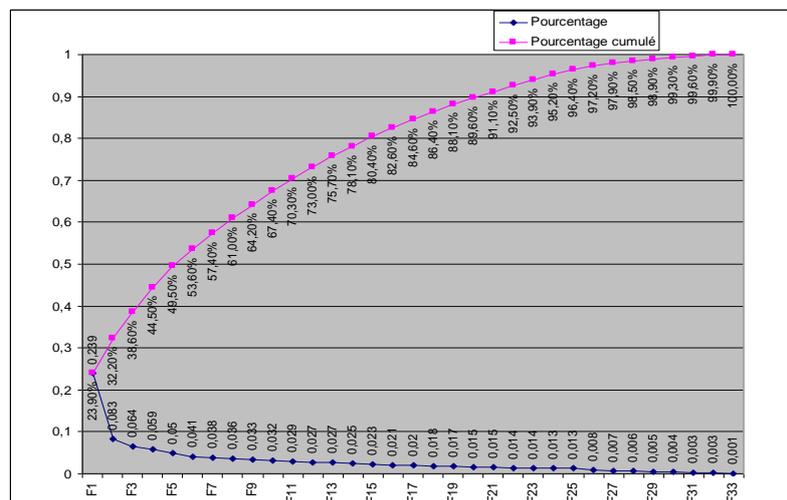


Figure 7 : Représentation graphique des pourcentages et pourcentages cumulés de la variance absorbée par ses valeurs propres

Les cercles des corrélations (Fig.8) permettent de distinguer 2 pôles; un pôle négatif et un autre positif se manifestant par les anomalies des concentrations métalliques suivantes (nous présenterons ici uniquement les résultats des cinq axes principaux) :

- L'axe factoriel 1 (23.87% de la variance) est déterminé positivement par Cr, Ba, Y, K₂O, V, Nb, B, TiO₂, Be et Al₂O₃ ; et négativement par SiO₂
- L'axe factoriel 2 (8.34% de la variance) est déterminé positivement par Sb, Nb et K₂O ; et négativement par G, MnO, Fe₂O₃, Mo, Bi, Li, MgO, Co, CaO et P₂O₅
- L'axe factoriel 3 (6.38% de la variance) est déterminé positivement par Cd, Sb, Fe₂O₃, MnO, Pb, As, Zn et Cu et négativement par Sr, CaO, V et Mo.
- L'axe factoriel 4 (5.88% de la variance) est déterminé positivement par Zn; et négativement par Cu, As, Sn, W, Cd, CaO, Mo et Sr.
- L'axe factoriel 5 (5% de la variance) est déterminé positivement par Sn, MgO, Sr et CaO; et négativement par Mo, Ge, Bi et V.

La *Figure 8* montre aussi que dans les plans principaux sur lesquels sont projetés les individus, les axes représentent les individus ayant une forte teneur en métaux semblables à ceux projetés sur les cercles de corrélation des variables cités auparavant. Le calcul de l'effet des individus sur les axes factoriels a été fait pour déterminer les individus ayant un effet soit négatif ou positif sur les axes. Cela est fait en calculant la racine de chaque valeur propre des axes factoriels et en sélectionnant tous les individus ayant une valeur absolue supérieur à la racine carrée de la valeur propre. Les individus qui définissent ces cinq axes principaux sont nombreux et variés, ce qui rend le graphique trop chargé et illisible. On cite, à titre d'exemple, quelques individus déterminant leur effet sur les axes principaux :

- L'axe factoriel 1 (23.87% de la variance) est déterminé positivement par les individus D/109, Q/133, PNS/CC2, P/121, X/126, L/119, V/107 et E/5; et négativement par les individus AK1, AL3, AI101, PNS/DD103, AI100, A08, A/25 et Q/21.
- L'axe factoriel 2 (8.34% de la variance) est déterminé positivement par les individus V/119, L/116, W/123, U/106, T/125, Q/123, S/120 et F/117; et négativement par les individus PNS/CC111, H/11, D/8, B/0, PNS/BB17, A017 et F/13.
- L'axe factoriel 3 (6.38% de la variance) est déterminé positivement par les individus P/137, G/102, AF11, N/103, AM6, J/14 et H/8; et négativement par les individus K/134, PNS/BB26, AN11, AJ15, L/135, AN10 et A025.
- L'axe factoriel 4 (5.88% de la variance) est déterminé positivement par les individus I/3, X/28, AL10, B/2, R/115, O/11, C/119, W/4 et P/29; et négativement par les individus L/136, K/109, H/121, R/138, M/136, X/108 et I/108.
- L'axe factoriel 5 (5% de la variance) est déterminé positivement par les individus B/110, R/24, AN19, AC7, A/119, S/4, PNS/AA14, AB18, AA7 et G/3; et négativement par les individus PNS/BB29, F/32, C/121, A026, PNS/EE11, PNS/CC30, E/5 et D/114.

Les résultats d'ACP donnent le degré d'association des éléments chimiques avec les facteurs. Ces résultats permettent de déterminer quelle part de variabilité d'un élément chimique donné est imputable aux variations des corps minéralisés et aux facteurs associés à des minéralisations particulières.

4-2. Méthode de la classification hiérarchique ascendante (CHA)

La CHA est une méthode automatique de classification complémentaire de l'ACP dans la mesure où elle permet de classer les individus ou les groupes d'individus déjà mis en évidence par l'ACP. La CHA procède par agrégation successive d'individus puis de groupes d'individus en fonction de leurs ressemblances par rapport à un ensemble de critères. Cette procédure implique alors le choix de deux critères permettant le regroupement des individus et des classes d'individus.

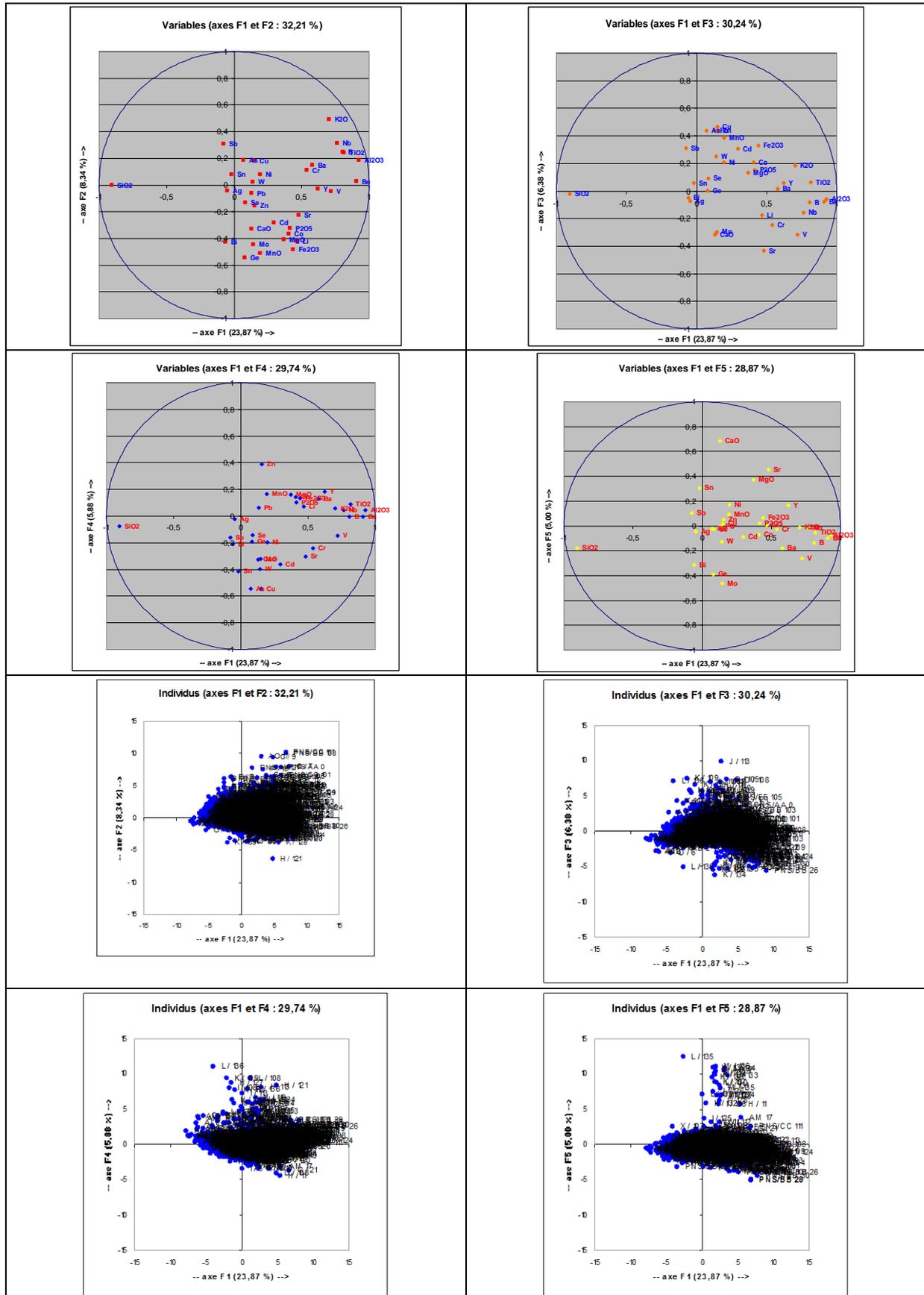


Figure 8 : Projection des variables et des individus selon les quatre premiers plans factoriels absorbant le maximum de variance totale

De nombreux critères de regroupement existent en rapport avec les objectifs de notre étude et le type de variables que nous utilisons. Le premier critère concerne le choix de la distance entre individus (*indice qui mesure combien deux individus sont différents*). Le second critère s'intéresse à la distance entre groupes d'individus.

Dans cette étude, nous avons réalisé une classification hiérarchique ascendante de l'ensemble des 2064 individus à l'aide du critère de Ward (*minimisation des variances intraclasse et maximisation des variances interclasses*). Cette classification propose une série de partitions représentées sous forme d'arbre appelé dendrogramme ou arbre de classification qui nous permet d'établir des groupes d'individus en fonction de leur ressemblance géochimique. Dix classes sont donc distinguées (Fig. 9):

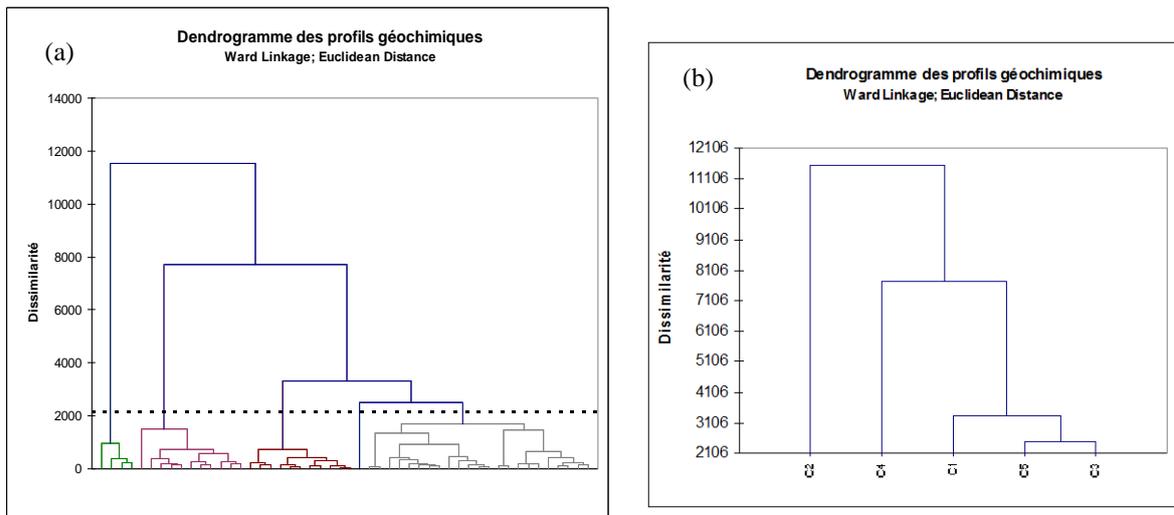


Figure 9 : Dendrogramme des profils géochimiques indiquant la distance euclidienne de coupure (a) et les cinq classes identifiées C1 à C5 (b)

5. Etude géostatistique des profils géochimiques

On se propose, dans ce paragraphe d'établir une cartographie des profils géochimiques pour chaque élément chimique par modélisation géostatistique (krigeage). Pour réaliser l'estimation, il suffit de calculer expérimentalement la structure spatiale et de la modéliser. C'est l'objectif de l'analyse variographique, qui constitue le cœur de l'analyse géostatistique. Cette étude a été faite à l'aide du logiciel SURFER 8 de Golden software. Elle se décompose en trois étapes :

- * Etablissement du variogramme expérimental et ajustement d'un modèle,
- * établissement des cartes variographiques,
- * krigage pour la cartographie.

La recherche des anisotropies est ensuite affinée en calculant le variogramme expérimental dans plusieurs directions et en étudiant si une direction se différencie d'une autre. Dans cet article, nous nous contenterons de présenter, à titre d'exemple, uniquement trois cartes variographiques parmi les 33 qui ont été calculées (Fig.10). Ces cartes sont établies avec un pas h (pas = 50,5m) depuis la distance de 50,5m (un seul pas) et la distance 1566m (31 pas de 50,5m). Notons que l'échelle des couleurs correspond aux valeurs prises par le variogramme pour chaque direction et chaque pas de mesure. Sachant que l'échelle des couleurs n'est pas la même pour les différentes cartes, ainsi la comparaison de l'importance des anisotropies doit tenir compte des valeurs numériques indiquées pour chaque carte.

Une fois le modèle est bien ajusté, l'interpolation peut être effectuée en n'importe quels points. Le krigeage est souvent réalisé sur une grille régulière afin d'obtenir une cartographie de la variable d'étude.

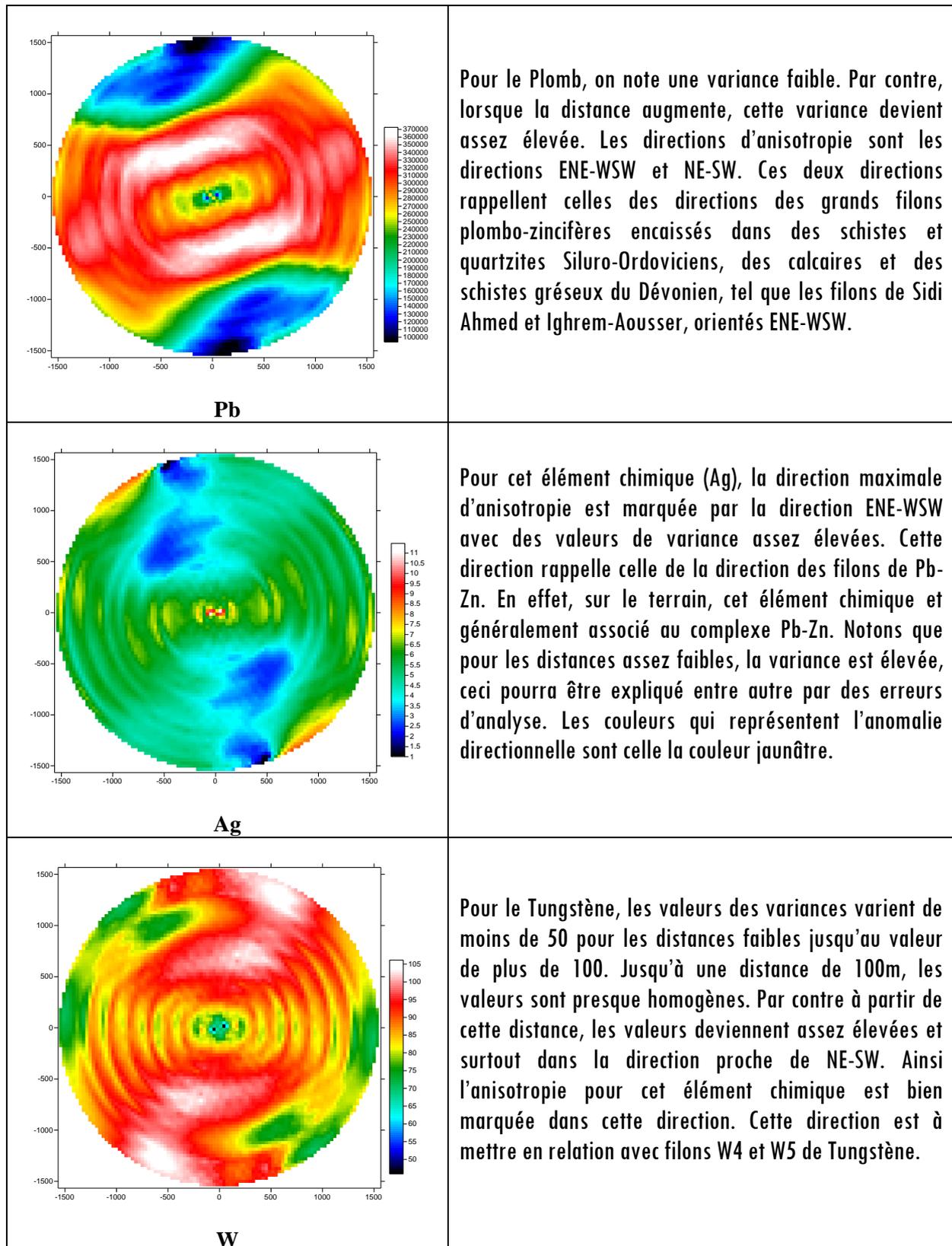
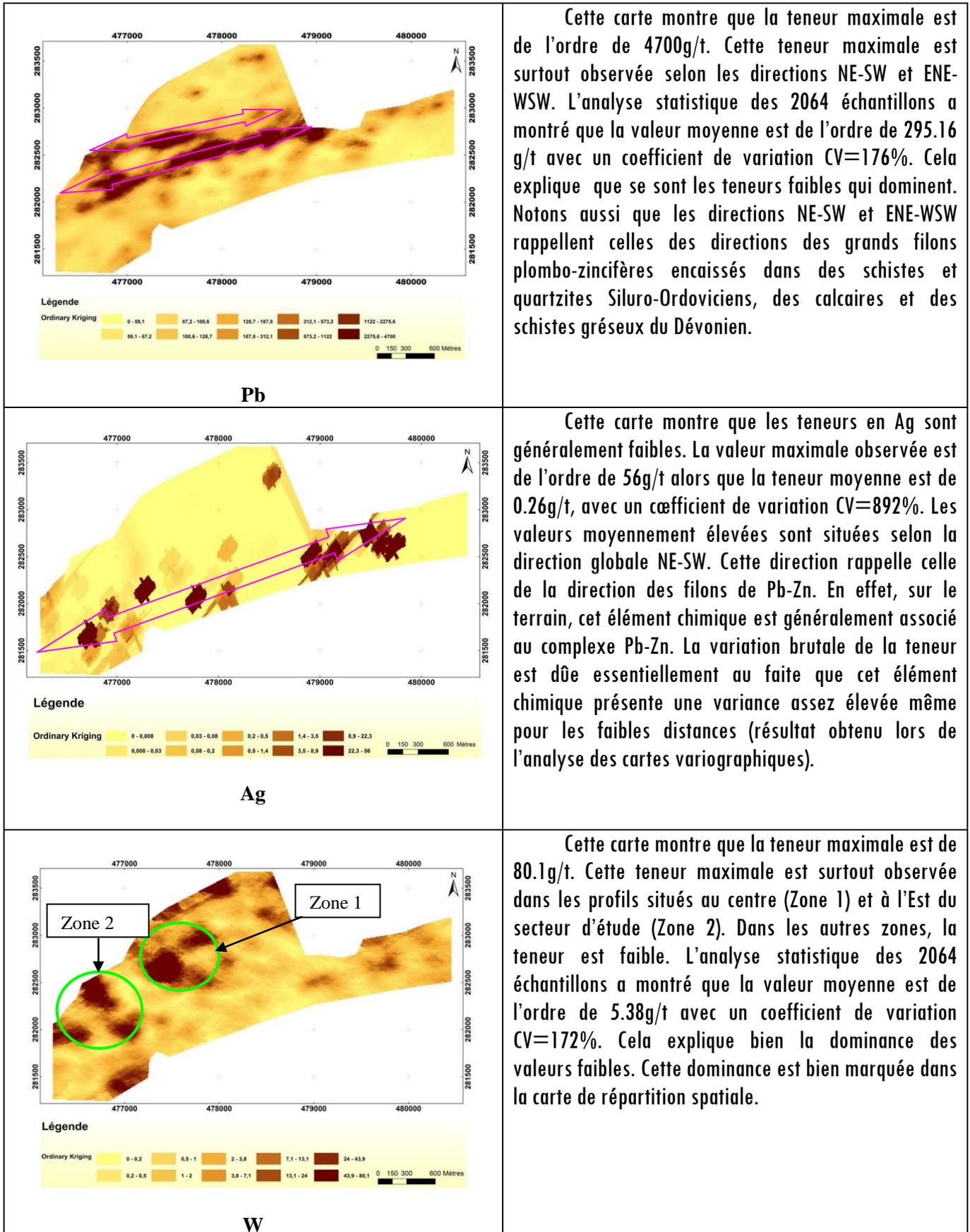


Figure 10 : Cartes variographiques pour Pb, Ag et W



Cette carte montre que la teneur maximale est de l'ordre de 4700g/t. Cette teneur maximale est surtout observée selon les directions NE-SW et ENE-WSW. L'analyse statistique des 2064 échantillons a montré que la valeur moyenne est de l'ordre de 295.16 g/t avec un coefficient de variation CV=176%. Cela explique que se sont les teneurs faibles qui dominent. Notons aussi que les directions NE-SW et ENE-WSW rappellent celles des directions des grands filons plombo-zincifères encaissés dans des schistes et quartzites Siluro-Ordoviciens, des calcaires et des schistes gréseux du Dévonien.

Cette carte montre que les teneurs en Ag sont généralement faibles. La valeur maximale observée est de l'ordre de 56g/t alors que la teneur moyenne est de 0.26g/t, avec un coefficient de variation CV=892%. Les valeurs moyennement élevées sont situées selon la direction globale NE-SW. Cette direction rappelle celle de la direction des filons de Pb-Zn. En effet, sur le terrain, cet élément chimique est généralement associé au complexe Pb-Zn. La variation brutale de la teneur est due essentiellement au fait que cet élément chimique présente une variance assez élevée même pour les faibles distances (résultat obtenu lors de l'analyse des cartes variographiques).

Cette carte montre que la teneur maximale est de 80.1g/t. Cette teneur maximale est surtout observée dans les profils situés au centre (Zone 1) et à l'Est du secteur d'étude (Zone 2). Dans les autres zones, la teneur est faible. L'analyse statistique des 2064 échantillons a montré que la valeur moyenne est de l'ordre de 5.38g/t avec un coefficient de variation CV=172%. Cela explique bien la dominance des valeurs faibles. Cette dominance est bien marquée dans la carte de répartition spatiale.

Figure 11 : Cartes de répartition spatiale par krigeage ordinaire pour Pb, Ag et W

La *Figure 11* illustre le résultat de l'estimation des concentrations de chaque élément chimique par krigeage. Cette carte laisse apparaître les grandes tendances des concentrations sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les études géostatistiques à partir des variogrammes calculés sur les variables ont permis de déterminer leurs distances de corrélation (portée). Elles montrent aussi une anisotropie dans la répartition de la minéralisation du gisement. L'anisotropie a pour principaux axes : NE-SW, ENE-WSW et E-W.

6. Conclusion

L'incommodité, la lourdeur et la lenteur d'accéder à l'information géographique transcrite sur supports papiers sont autant de raisons qui incitent les décideurs à modéliser, via un outil SIG, les informations et les données à référence spatiale dont ils disposent. La modélisation des fonds graphiques et la quantité massive de données spatiales qu'ils comportent permettent d'accéder quasiment à l'information géographique pour son utilisation et sa mise à jour et donc l'amélioration de l'efficacité et la rentabilité du processus considéré.

Le travail d'informatisation, réalisé sur les données des profils géochimique du district minier de Tighza, est complété par un traitement statistique et géostatistique des profils géochimiques et la réalisation de cartes thématiques servant à l'élaboration d'un modèle géochimique renseignant sur la répartition des concentrations polymétallifères de ce district. Les méthodes statistiques et géostatistiques constituent des moyens rapides fiables et quantitatifs pour l'étude et l'interprétation des tels profils géochimiques lorsqu'ils sont en nombre important. Elles apportent une valeur ajoutée indéniable pour la cartographie et l'analyse de l'évolution et la variation des teneurs minérales. Cette valeur ajoutée réside dans:

- * l'utilisation de la structure spatiale intrinsèque du phénomène pour son estimation,
- * l'intégration rigoureuse de variables auxiliaires liées au phénomène d'intérêt, en améliorant ainsi l'estimation,
- * la quantification de l'erreur associée à chaque estimation.

Ce travail statistique sera complété par un traitement statistique et géostatistique sur les données des filons minéralisés et celles des sondages carottés pour pouvoir tirer une synthèse globale sur la répartition des corps polymétallifères du district minier de Tighza.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Projet Protars III D15/31 et avec le soutien de la bourse de recherche accordée par le CNRST n° b11/006, et de la CMT. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, avec une mention particulière aux géologues et à la Direction CMT, qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude.

Références

- [1] - A. CHEILLETZ, «Contribution à la gîtologie du district polymétallique (W-Mo-Cu-Pb-Zn-Ag) du Jbel Aouam (Maroc Central)». Thèse *d'état*, I.N.P.L., C.R.P.G., E.N.S.G. Nancy. (1984) 250p.
- [2] - F. FAIK, «Le Paléozoïque de la région de Mrirt (Est du Maroc Central) : Évolution stratigraphique et structurales». Thèse *de 3^o cycle*. Fac. Sci. Univ. Paul Sabatier, Toulouse. (1988) 233p.
- [3] - M. BOUABDELLI, «Tectonique et sédimentation dans un bassin orogénique: le sillon Viséen d'Azrou-Khénifra (Est du massif hercynien Central du Maroc)». Thèse d'État, Fac. Sc, Univ Louis Pasteur, Strasbourg. (1989) 262p.

- [4] - A. N'TARMOUCHENT, «Le magmatisme hercynien de la région de M'rirt (Est du Massif Central Marocain). Cartographie, pétrographie géochimique et contexte géodynamique». Thèse de 3e cycle, Fac. Sci. Fès. (1991) 169p.
- [5] - S. BALOUKI, «Étude des minéralisations hydrothermales aurifères et des fluides associés dans la zone de cisaillement de Tighza. (Jbel Aouam, Maroc central)». Thèse de 3^e cycle, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech. (1995) 193p.
- [6] - M. BENNASSER, «Lithostratigraphie, tectonique Hercynienne, paléochamps de contraintes tardi-hercyniennes et relation fracturation-minéralisation de la région de l'Aouam (Maroc central oriental)». Thèse de 3^eème cycle, Univ. Mohamed V Fac. Sc. Rabat. (1996) 300p.
- [7] - A. BENSALAH, «Structure hercynienne de l'anticlinorium Khouribga-Oulmès entre Ez Zehiliga et Tiddas (Maroc central hercynien). Structure du socle ordovicien-dévonien ; formation et déformation de sa couverture carbonifère : le bassin de Sidi Kassem». Thèse de doctorat, Univ. Mohammed V, Agdal, Rabat. (2001) 248p.
- [8] - K. NERCI, Les minéralisations aurifères du district polymétallique de Tighza (Maroc Central): un exemple de mise en place périgranitique tardi-hercynienne. Thèse de 3^eème cycle, Univ. Orléans 2, France. (2007) 304p.
- [9] - A. WADJINNY, «Le plomb au Maroc : cas des districts de Touissit et de Jbel Aouam». *Chronique de la Recherche Minière*. (1998) 531-532, 9-28.
- [10] - M. RIBEYROLLES, «Étude tectonique et microtectonique d'un segment de la chaîne hercynienne dans la partie Sud Orientale du Maroc Central». Thèse 3^eème cycle, Fac. Sci. Montpellier, (1972) 63p.
- [11] - J. AGARD et al., «Étude géologique et métallogénique de la région minéralisée du Jbel Aouam». *Note et mém. N° 132*(1958) Serv. Géol. Maroc. 126p.