

## TRAITEMENT INFORMATISE DES DONNEES GEOLOGIQUES : EXEMPLE D'UNE PROSPECTION PEDOGEOCHIMIQUE DANS LA FENETRE DE THEUX<sup>1</sup>

par

I. HALLEUX<sup>2</sup> & M. UYTENDAELE<sup>2</sup>

(11 figures)

**RESUME.-** Un traitement particulier basé sur la décomposition par séries de Fourier a permis d'analyser avec fruit les résultats d'une campagne de prospection pédo-géochimique réalisée dans la région de Theux. Le tracé des cartes d'isoteneurs de Pb, Zn, Ag, Cu ne permettait de distinguer que les hautes teneurs localisées aux alentours des anciennes exploitations plombo-zincifères de la région, c'est-à-dire des éléments de pollution pour la prospection entreprise.

La méthode utilisée consiste à effectuer un lissage du spectre bidimensionnel de Fourier par filtrage dans une fenêtre sur la fonction d'autocorrélation. Une étude de la répartition directionnelle de l'énergie est effectuée sur le spectre lissé. Celle-ci déterminée, des filtrages directionnels dans les directions présentant des extréma locaux ont révélé les structures connues du terrain : localisation exacte des anciennes exploitations filoniennes, prolongation du tracé des failles.

De nouvelles structures minéralisées mises en évidence par le traitement ont fait l'objet de vérifications sur le terrain : un court lever géophysique et les échantillons de roche récoltés confirment l'hypothèse d'une minéralisation possible.

**ABSTRACT.-** A particular method based on the Discrete Fourier Transform is presented for the analysis of chemical data of soil samples obtained from a geochemical prospecting in the Theux area. The contour maps of Pb, Zn, Cu and Ag values did not permit to distinguish any trend in the distribution : a strong pollution due to old mining of lead and zinc masks the original structures.

The present investigation include filtering problems and automatic windowing techniques involved in the smoothing of the bidimensional power spectrum. Of special interest is the analysis of directional distribution of the energy of the smoothed spectrum. Filtering of most important directions reveals well known geological structures (exact localisation of veins, extension of faults, . . .) as well as new ones.

An electromagnetic survey has confirmed the new mineralised structure found by the process. Sampling of rocks on the field agree with the hypothesis of a mineralisation.

### INTRODUCTION

Il est sans doute inutile de présenter la Fenêtre de Theux, région qui, depuis l'hypothèse de Fourmarier (1901) a suscité l'intérêt des générations de géologues [Geukens, F. (1959)], Graulich, J.M. (1964), Klein, C. (1977a), (1977b). Des exploitations de sulfures de plomb et de zinc s'y installèrent jadis. A l'heure où se rétablissent les bilans des richesses nationales, on peut se demander si la région pourrait encore correspondre à une zone minière potentielle.

L'Union Minière a entrepris une campagne de prospection géochimique, au Nord de la faille du Rocheux (fig. 1). Des échantillons de sol ont été prélevés à 50 cm de profondeur, sur une surface de 10 km<sup>2</sup> environ et selon une maille de 100 m ; les teneurs en Pb, Zn, Cu, Ag ont été analysées.

<sup>1</sup> Manuscrit reçu le 15 avril 1983.

<sup>2</sup> Ingénieur civil géologue, boursier IRSIA, Université de Liège, Laboratoires de Géologie Appliquée, 45 avenue des Tilleuls, B 4000 Liège, Belgique.

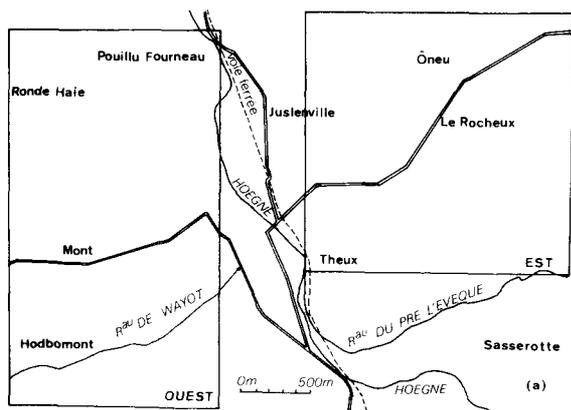
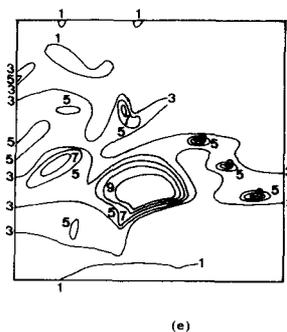
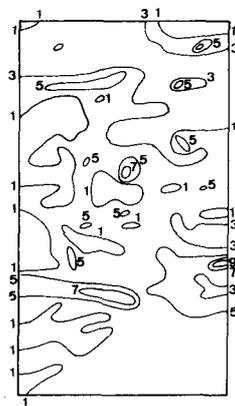
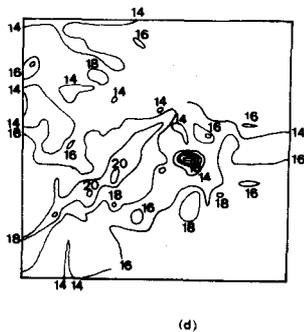
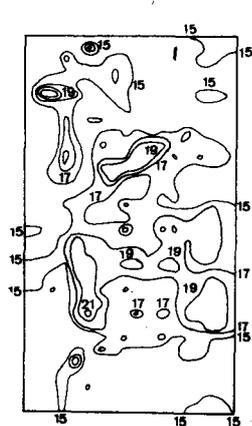
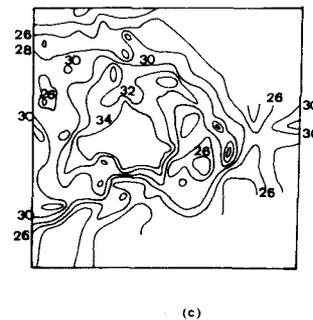
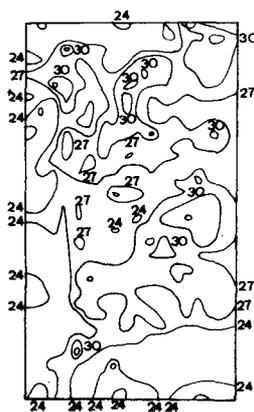
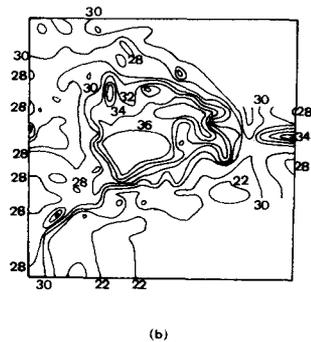
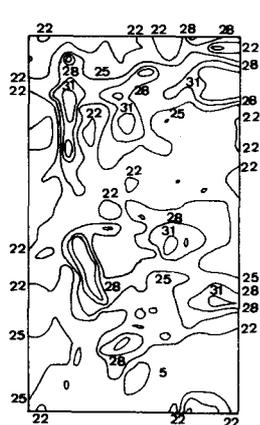


Figure 2  
 a) Localisation de la région échantillonnée, cartes d'isoteneur des données (en ppm) :  
 b) Pb, c) Zn, d) Cu, e) Ag.  
 (Les données du Pb, du Zn et du Cu sont présentées en valeurs log multipliées par 10).



de la distance), c'est-à-dire une série de Fourier.

3. Pour passer du domaine spatial au domaine fréquentiel de Fourier, par transformation de Fourier discrète (TFD), il suffit de calculer les paramètres caractéristiques de chacune des ondes élémentaires (phase et amplitude), en choisissant des périodes adéquates. On admettra que **les ondes envisagées sont toutes des harmoniques du nombre fondamental, ayant pour période la période du signal donné.**

Soit $x$	la longueur de l'échantillonnage selon $ox$
$P_x$	le pas d'échantillonnage selon $ox$
$y, P_y$	définis de la même façon suivant $oy$
$I_1 + 1$	le nombre d'échantillons représentant une période $Y$ du champ ; $I_1 = y/P_y$
$J_1 + 1$	le nombre d'échantillons représentant une période $X$ du champ ; $J_1 = x/P_x$
$u = m/X$	la fréquence de l'onde $m$ suivant $ox$
$v = n/Y$	la fréquence de l'onde $n$ suivant $oy$
$(x, y)$	les coordonnées du point d'échantillonnage $I, J$ (origine $I = 0, J = 0$ au coin supérieur gauche du tableau)
$G(I, J)$	la valeur du signal échantillonné

La TDF à deux dimensions  $g(u, v)$  du champ prospecté  $G(I, J)$  s'écrit :

$$g(u, v) = \frac{1}{I_1 J_1} \sum_{I=1}^{I_1} \sum_{J=1}^{J_1} G(I, J) \exp(-2\pi i (ux + vy)) \quad (1)$$

Inversément, à partir de  $g(u, v)$ , on pourra calculer  $G(I, J)$  :

$$G(I, J) = \sum_{-u_c}^{+u_c} \sum_{-v_c}^{+v_c} g(u, v) \exp(+2\pi i (ux + vy)) \quad (2)$$

où  $u_c = 1/2 P_x$  et  $v_c = 1/2 P_y$

La similitude des formules (1) et (2) permettra le calcul de la TFD et de la TFDI (transformation de Fourier discrète inverse) par le même programme d'ordinateur.

En notation abrégée,  $g(u, v)$ , matrice de nombres complexes, peut s'écrire :  $g(u, v) = R(u, v) + iI(u, v)$ . Le spectre d'énergie est égal à  $E(u, v) = R^2(u, v) + I^2(u, v)$ .

La transformation par séries de Fourier à deux dimensions, et son spectre d'énergie jouissent d'une propriété sur laquelle se base l'analyse spectrale qui va être entreprise : ils respectent les directions spatiales du champ échantillonné.

### 1.3.- REALISATION PRATIQUE DU TRAITEMENT

#### 1.3.1.- Préparation du tableau des données

Le calcul pratique de la TF à deux dimensions s'applique à des matrices. Il s'agit donc, au départ, de créer un tableau rectangulaire à partir des données de la prospection. Cette étape sera réalisée en tenant compte des informations disponibles : répartition de l'échantillonnage, (ir)régularité du pas, . . . Les vides laissés par les données manquantes ont été comblés, ici, par interpolation visuelle sur base des cartes d'isoteneurs. Le champ prospecté a été divisé en deux zones : une matrice "Ouest", reprenant les données des échantillons prélevés à l'Ouest de la Hoëgne, et une matrice "Est" constituée des données géochimiques provenant de la région située à l'Est de la rivière (fig. 2a). Ce fractionnement présente l'avantage de permettre une étude séparée des deux zones : celle de l'Est, où la géologie est relativement bien connue grâce aux travaux miniers qui y ont été entrepris, et celle de l'Ouest, où on connaît moins bien la géologie du sous-sol.

Pour pouvoir appliquer la TF au champ des données, il faut enfin que celui-ci réponde aux hypothèses qui ont été exprimées au par. 1.2. En particulier, le signal est supposé se répéter périodiquement de  $-\infty$  à  $+\infty$ , sans discontinuité. Cette hypothèse impose l'égalité des valeurs du signal aux bordures du champ. Il faut donc amener le tableau des données à avoir des bordures égales en ajoutant quelques lignes et quelques colonnes. Ce procédé risque d'introduire dans le spectre d'énergie des fréquences inexistantes. Nous verrons au par. suivant comment limiter ce phénomène.

#### 1.3.2.- Analyse spectrale

La figure 3 représente l'organigramme de l'étude automatique du spectre d'énergie. Examinons-en les étapes.

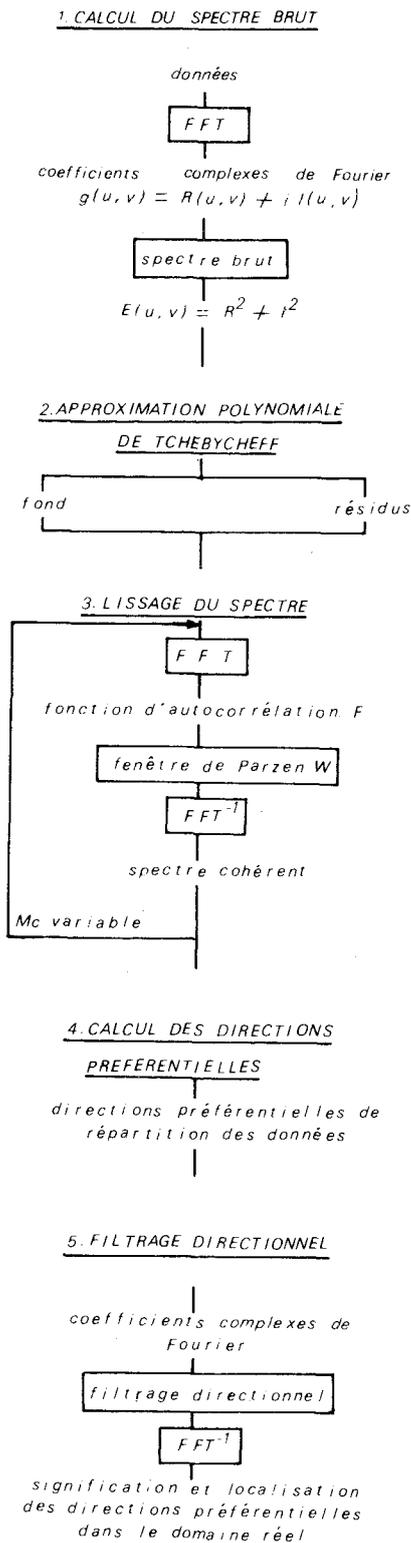


Figure 3

Organigramme du traitement automatique des données.

**a) Approximation polynomiale au sens des moindres carrés au moyen des polynômes de Tchebycheff**

Le but de cette approximation est double : elle permettra d'abord de minimiser l'influence de l'ajout des données sur les fréquences du spectre d'énergie (cfr. par. 1.3.1.). Elle permettra ensuite de distinguer la contribution du fond géochimique de l'anomalie proprement dite. Cette distinction, dans l'étude entreprise ici, ne s'avère pas nécessaire : le prélèvement des échantillons de sol s'est fait dans le même horizon pédologique et, de plus, la lithologie sous-jacente est uniforme dans la région prospectée (substratum carbonaté). Le fond géochimique peut donc être considéré comme constant sur toute l'étendue échantillonnée.

Les polynômes de Tchebycheff ont été choisis pour leurs propriétés d'orthogonalité - facilitant la mise en oeuvre du programme d'approximation - , de symétrie - identiques à celles du spectre d'énergie - , et pour le comportement de l'approximation face au phénomène de Runge - bonne approximation près des extrémités de l'intervalle- . Le choix du degré d'approximation, pour que celle-ci soit acceptable, est une question de compromis entre tenir compte des erreurs systématiques et tenir compte des erreurs de mesure. Dahlquist, G., (1974), indique qu'il convient de choisir  $n < m/2$  où  $n$  est le degré de l'approximation et  $m$  le nombre de points donnés.

**b) Lissage du spectre d'énergie**

On conçoit que l'étude quantitative des variations de l'énergie en fonction de la fréquence demande que l'on élimine au préalable, dans la mesure du possible, les bruits aléatoires (en général associés aux hautes fréquences). La TFD et la TFDI peuvent être utilisées pour effectuer cette opération que l'on appellera "lissage du spectre".

La TFD du spectre d'énergie est une série de valeurs réelles :

$$F(\xi, \zeta) = \frac{1}{I_1 J_1 M_1 N_1} \sum \sum E(u, v) \exp(-2i\pi(u\xi + v\zeta))$$

Cette fonction s'appelle classiquement la "fonction d'autocorrélation" issue du champ des données.

On réalisera le lissage voulu en appliquant à cette fonction d'autocorrélation un coefficient de pondération, en particulier égal à

1 pour  $\xi = \zeta = 0$

0 pour  $\xi > \xi_m$  et  $\zeta > \zeta_m$

Cette opération constitue l'application d'une "fenêtre W". Les fenêtres fréquemment utilisées sont définies par des fonctions satisfaisant aux conditions :

$$W(0, 0) = 1$$

$$W(\xi, \zeta) = W(-\xi, -\zeta)$$

$$W(\xi, \zeta) = 0 \text{ pour } (\xi, \zeta) > (\xi_m, \zeta_m)$$

Elles sont donc compatibles avec la TF puisqu'elles en respectent les propriétés de symétrie et de périodicité. La fenêtre de Parzen a été choisie : le résultat de son produit de convolution par le spectre d'énergie est stable (ce qui n'est pas le cas de la fenêtre rectangulaire et de celle de Bartlett). Elle a été préférée à celle de Tukey parce que, pour des performances égales, la fenêtre de Tukey exige un point de coupure plus petit, ce qui constitue une perte d'informations.

A partir de quelle fréquence doit-on considérer que les informations sont devenues aléatoires ? En d'autres termes, à partir de quels  $\xi_m$  et  $\zeta_m$  appliquer un facteur multiplicatif nul ?

Jenkins & Watts (1968) suggèrent de choisir trois valeurs du point de coupure que nous noterons  $M_c$  :

- une grande valeur, pour se donner une idée de la forme du spectre ;
- une petite valeur, pour localiser les informations principales ;
- une valeur intermédiaire, de compromis, que l'expérience définit comme étant  $1/20 < M_c/N < 1/3$  (N est le nombre de données).

Le "spectre cohérent", c'est-à-dire lissé, s'obtiendra par TFDI de la fonction d'autocorrélation multipliée par la fenêtre.

### c) Calcul des directions dominantes

Pour estimer le comportement global du spectre d'énergie vis-à-vis de la fréquence, en tenant compte des éventuels effets directionnels, on représente le spectre cohérent en fonction de la fréquence  $f = (u^2 + v^2)^{1/2}$ , en se limitant aux fréquences de composantes (u, v) telles que

$$\alpha_1 < \arctg(v/u) < \alpha_2 .$$

Dans la bande de fréquences limitées par  $f_1$  et  $f_2$ , on estime la valeur de la direction  $\alpha$  en calculant la moyenne des valeurs du spectre cohérent, valeurs telles que

$$\alpha + d\alpha < \arctg v/u < \alpha - d\alpha$$

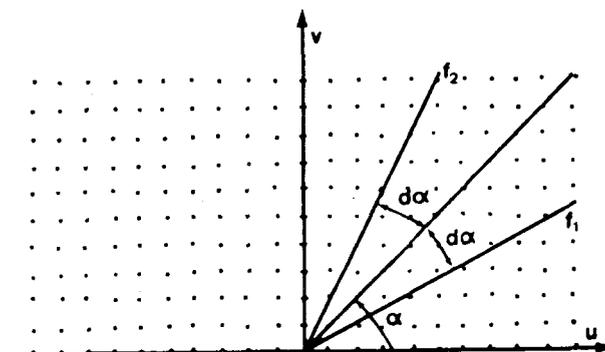


Figure 4

Estimation des directions dominantes du spectre d'énergie

avec  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$  ;  $d\alpha$ , angle de régularisation.

Pour chaque gamme de fréquence étudiée, la valeur maximale de  $\alpha$  sera considérée comme indicatrice de la direction dominante (fig. 4).

### 1.3.3.- Filtrage directionnel

Etant désormais en possession des informations relatives aux directions préférentielles de répartition des données géochimiques, il faut pouvoir étudier leur signification sur le terrain. Où est localisée l'anomalie, sur la surface de quelques  $\text{km}^2$  prospectée ? Quelle est son extension ?

Pour répondre à ces questions, on effectuera un filtrage en direction en éliminant des coefficients complexes de Fourier les directions de moindre importance et en recherchant leur TFDI.

## 2.- DIRECTIONS PREFERENTIELLES DE REPARTITION DES ELEMENTS

Avant d'étudier en détail la signification réelle des directions préférentielles de répartition des différents éléments chimiques, il est intéressant de se pencher sur l'allure générale de leur représentation graphique.

Sur la figure 5, remarquons tout d'abord que des directions préférentielles différenciées et bien marquées apparaissent à l'Est de la Hoëgne, malgré la pollution minière qu'a subi cette région.

En comparant entre eux les diagrammes des différents éléments, on voit que :

- les mêmes directions apparaissent pour chaque élément;

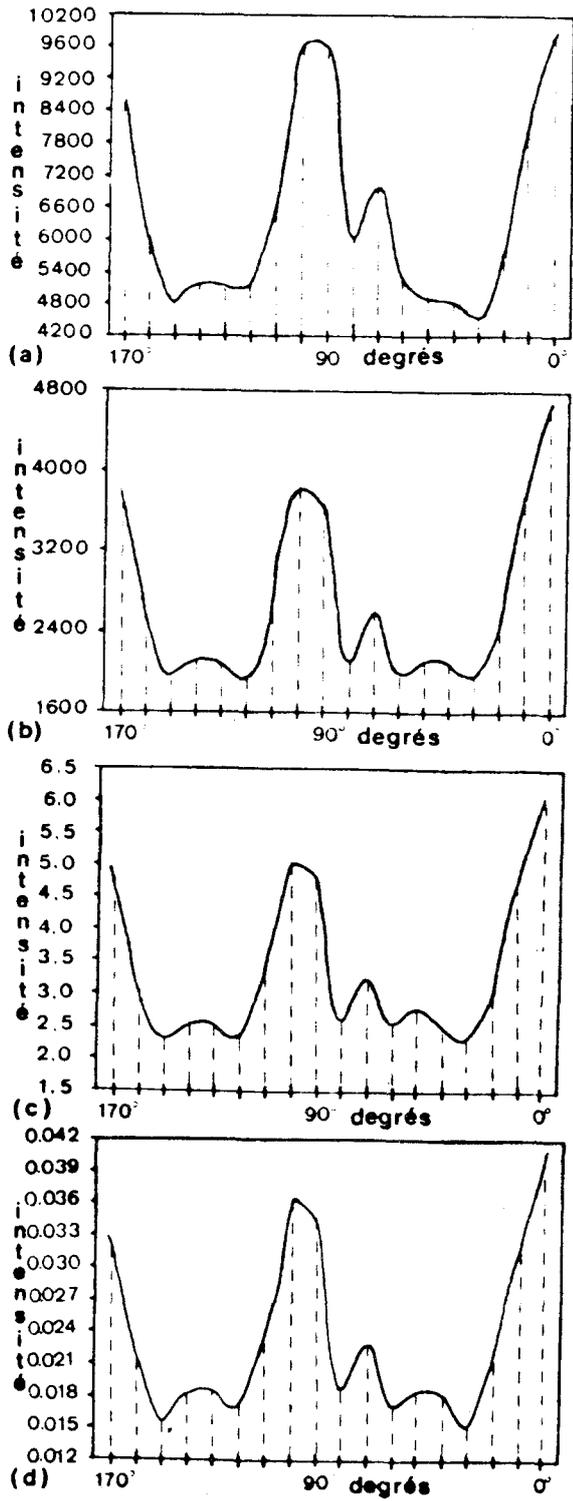


Figure 5

Directions préférentielles de répartition des éléments à l'Est de la Hoëgne : a) le plomb, b) le zinc, c) le cuivre, d) l'argent.

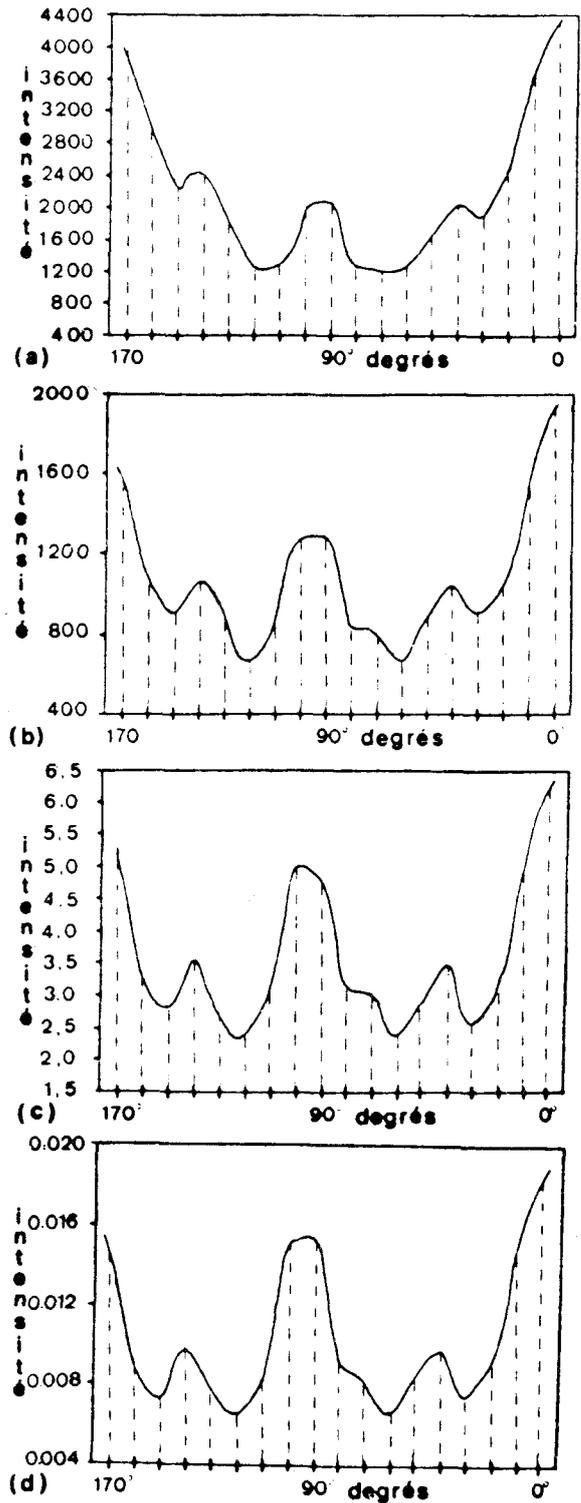


Figure 6

Directions préférentielles de répartition des éléments à l'Ouest de la Hoëgne : a) le plomb, b) le zinc, c) le cuivre, d) l'argent.

- l'importance relative des directions est identique dans chaque diagramme.

La figure 6 permet de faire les mêmes observations sur le champ Ouest à l'exclusion de la direction  $60^{\circ} - 80^{\circ}$  qui s'avère moins importante que les autres.

Si maintenant on compare les figures 5 et 6, on remarque que les terrains sur lesquels les échantillons ont été prélevés présentent les mêmes directions préférentielles de répartition des éléments, qu'ils se trouvent à l'Est ou à l'Ouest de la Hoëgne. Ces directions ont de plus la même importance relative. Cela permet de déduire la parenté des deux champs échantillonnés : les terrains sont du même type. Cette conclusion est confirmée par la géologie locale. De plus, on peut dire que les régions échantillonnées sont **COMPARABLES**. Cette remarque a une grande incidence sur la suite de l'étude : un phénomène observé à l'Est, région bien connue géologiquement, permettra de donner davantage de crédit à un autre observé à l'Ouest.

### 3.- RESULTATS DU FILTRAGE DIRECTIONNEL

Avant d'entamer l'interprétation des résultats, remarquons que :

1. on ne peut pas attendre une localisation **EXACTE** d'une anomalie, étant donné la dispersion chimique des éléments dans les sols, ainsi que la mobilité des sols par rapport au substratum.
2. toutes les directions préférentielles de répartition n'ont pas une signification réelle intéressante pour le prospecteur. Le phénomène qui a engendré l'anomalie peut ne pas être organisé, et n'apporter aucune information précise sur la situation d'une anomalie particulière. L'interprétation de ces anomalies serait fastidieuse et n'amènerait pas nécessairement de conclusions intéressantes pour le prospecteur. (Voir à ce sujet, Halleux, I., 1982).

La carte géologique servant de support aux résultats a été dressée par J. Coipel (1977) pour les terrains carbonifères (fig. 7).

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt du traitement réside dans la mise en évidence de phénomènes géologiques supposés (confirmer une direction de fracture hypothétique, par exemple), et dans la recherche de structures géologiques inconnues (qui pourraient être minéralisées) et vérifiables à l'occasion d'un indispensable retour sur le terrain.

Les diagrammes représentant les anomalies réelles en Pb, Zn, Ag sont semblables. Cette observation

ne surprend nullement : on sait, en effet, que le Pb, le Zn et l'Ag sont souvent associés, minéralogiquement, dans les gisements plombo-zincifères. L'étude d'un seul de ces éléments pourra ainsi être étendue aux deux autres. Les anomalies ont plus ou moins la même extension et la même localisation (fig. 8a, 8b, 8c) ; elles sont parfois décalées dans l'espace à cause de la mobilité différente des éléments :

- le zinc est un élément assez mobile dans les sols et ne constitue pas un très bon marqueur pour la prospection géochimique.
- le plomb est généralement immobile et est ainsi un bon indicateur de gisement.
- la mobilité du cuivre est faible dans un sol à PH neutre à basique (ce qui est le cas dans la région échantillonnée).
- la teneur en argent dans les sols est très faible, et les méthodes de quantification de teneurs sont peu précises. Quoique de faible mobilité, cet élément ne sera donc pas un excellent marqueur.

(Granier, C. 1973 ; Vinogradov, A.P., 1959).

Nous donnerons ainsi la préférence au Cu et au Pb pour l'étude des anomalies et de leur signification.

### 4.- RESULTATS DU TRAITEMENT - ANALYSE DE QUELQUES ANOMALIES SIGNIFICATIVES

#### 4.1.- ETUDE DES ANOMALIES DANS LA DIRECTION $160^{\circ} - 190^{\circ}$ A L'EST DE LA HOËGNE

Notons d'emblée que le traitement permet de mettre en évidence des directions préférentielles, malgré l'énorme pollution minière ; le filtrage directionnel permet de retrouver les événements géologiques sous-jacents.

Selon Granier (1973) et Vinogradov (1959), la teneur moyenne en Cu et en Pb d'un sol brun tel que rencontré à Theux est de 20 ppm.

sols porteur de	moyenne (ppm)	extrêmes (ppm)
Cu	20	2 - 100
Pb	20	15 - 100
Zn	70	10 - 200

Les anomalies en plomb des sols dans la région de Theux dépassent 1.200 ppm à l'Ouest de la Hoëgne et 2.800 à l'Est. La teneur en cuivre des anomalies est

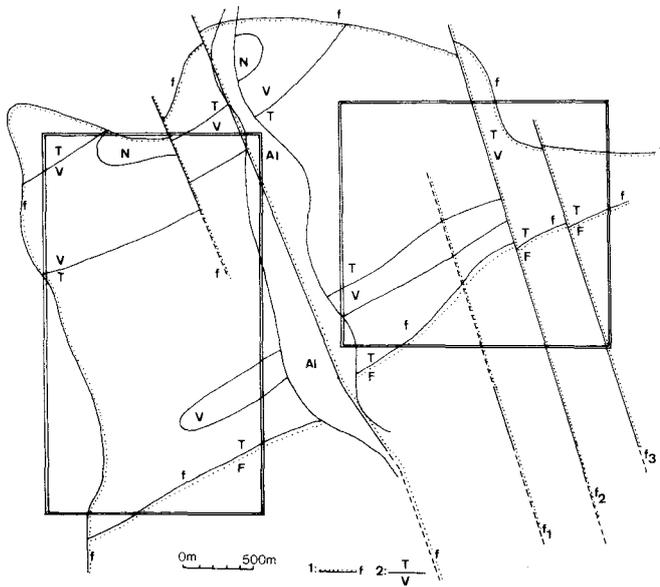
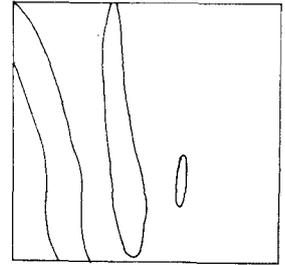
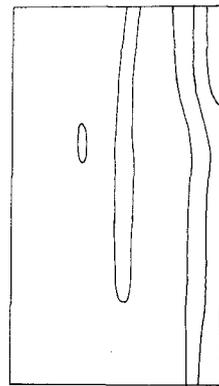


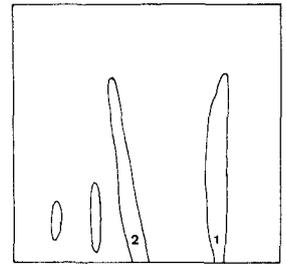
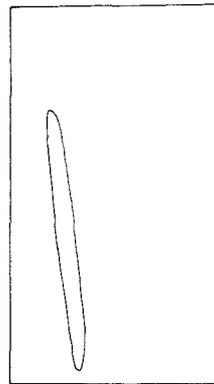
Figure 7

Carte géologique de la région étudiée  
(d'après J. Coipel, 1977) :

- 1. failles ; 2. contacts lithologiques ; N. Namurien ;
- T. Tournaisien ; V. Viséen ; F. Famennien ;
- f<sub>2</sub>. faille de Rocheux-Oneux.



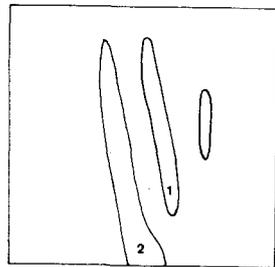
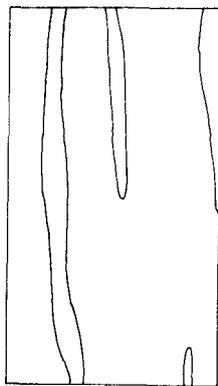
(c)



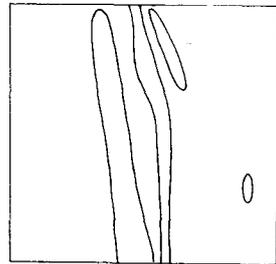
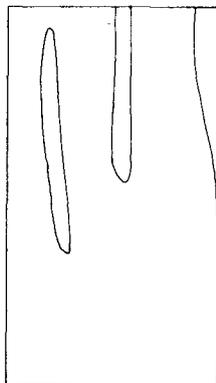
(d)

Figure 8

Anomalies correspondant à la direction 160° – 190° :  
a) le plomb (supérieure à 2800 ppm à l'Est et à 1200 ppm à l'Ouest) ; b) le zinc ; c) l'argent ; d) le cuivre (supérieur à 98 ppm)



(a)



(b)

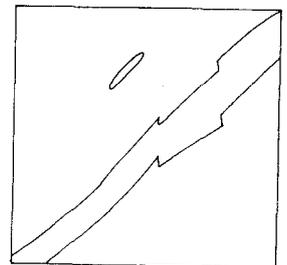
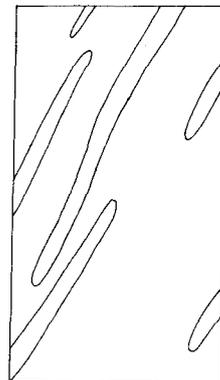


Figure 9

Anomalie en plomb dans la direction 30° – 60°,  
supérieure à 1600 ppm à l'Est et à 750 ppm à l'Ouest.

supérieure à 85 ppm de part et d'autre de la rivière (fig. 8a et 8d).

### 1) Le Plomb

L'anomalie (1) que présente la figure 8a s'aligne suivant une direction de faille bien connue dans la région. Le gisement de Rocheux-Oneux est réputé comme étant un gîte typiquement filonien associé à une faille de direction NNW-SSE (f2, fig. 7) ayant une pente de 80° environ. On trouvera dans J. Coipel (1977) une description précise et détaillée de ce gisement.

En consultant la carte géologique, la deuxième anomalie (2), parallèle à la première, semble ne correspondre à aucun accident connu. On pourrait cependant y voir le prolongement de la faille mise en évidence par l'un d'entre nous à l'occasion d'un lever géologique (f1, fig. 7). Cette hypothèse n'a fait l'objet d'aucune vérification sur le terrain, et la topographie locale ne la contredit pas.

### 2) Le Cuivre

Sur la figure 8d, on retrouve une même zone anomalique (2) semblable à celle rencontrée dans le cas du Pb (2), fig. 8a). On peut se demander, ici, si l'anomalie correspond à la faille de Rocheux-Oneux (f2, fig. 7) ou au tracé hypothétique de la fracture située plus à l'Ouest (f1, fig. 7).

L'anomalie (1), de direction N-S, est particulière à cet élément. Elle suit étroitement la direction de l'alignement des pylônes à haute tension. On peut penser que le ruissellement météorique est responsable d'un lessivage du cuivre des fils électriques et crée cette anomalie au sol.

#### 4.2.- ETUDE DE L'ANOMALIE EN Pb DANS LA DIRECTION 30° - 60°

L'anomalie présentée par la figure 9, à l'Est de la Hoëgne, se localise dans le Tournaisien, au Sud de la bande de calcaire Viséen traversant la fenêtre d'Ouest en Est.

On peut observer deux décrochements dans la direction de cette anomalie. Géographiquement, ils correspondent au passage de deux failles NNW-SSE (f2, f3, fig. 7) signalées par Fourmarier (1949). On ne voit donc pas de tracé de la troisième faille hypothétique dans la courbe enveloppe de cette anomalie (f1, fig. 7).

Posons-nous la question de savoir si l'anomalie est due à la nature des roches tournaisiennes, ou provo-

quée par le contact, volontiers minéralisé, du Viséen et du Tournaisien (la mine de Theux, ouverte de 1852 à 1925, a exploité du minerai sulfuré de plomb et de zinc le long de ce contact, plus au Nord). Ici, la question est sans réponse. Une étude géochimique des roches tournaisiennes devrait permettre de pencher en faveur de l'une ou l'autre hypothèse.

A l'Ouest de la Hoëgne, la répartition des anomalies est un exemple de résultat difficile à interpréter pour le prospecteur. Le phénomène qui a engendré les anomalies n'est pas suffisamment organisé (cfr. par. 3).

#### 4.3.- ETUDE DES ANOMALIES DANS LA DIRECTION 160° - 190° A L'OUEST DE LA HOËGNE

L'anomalie localisée à l'Ouest de la Hoëgne (fig. 8a et 8d) a particulièrement retenu notre attention : aucun phénomène géologiquement connu ne permettait de supposer son existence. Une étude complémentaire a été réalisée sur le terrain pour rechercher des indices soulignant le passage de la zone anomalique.

### 5.- ETUDE COMPLEMENTAIRE SUR LE TERRAIN

La figure 10 illustre les étapes et les résultats de cette étude.

a) Le pédologue du laboratoire de géochimie de Louvain-la-Neuve mentionne trois points anomaliques qui retiennent particulièrement l'attention : les points 0 sur la figure 10. Les échantillons prélevés à cet endroit possèdent des teneurs anormalement élevées en Pb. Le pédologue ne peut expliquer ces fortes teneurs - il semblerait qu'elles ne soient pas dues à des facteurs anthropiques - et il conclut en pensant qu'un examen supplémentaire de la région s'impose.

b) Lors d'une excursion sur le terrain, à Ronde-Haie (point 1), nous avons trouvé des traces de "grattage" : blocs de goethite, de calcite, de brèche dans une petite dépression circulaire. Ces anciens travaux ne présentent que peu d'ampleur ; ils ne sont pas repris sur la carte topographique et la littérature consultée n'en fait pas mention.

c) A 100 m au Sud de ce grattage, dans la prairie, se trouve un énorme bloc de brèche minéralisée en goethite, en partie silicifiée (point 2).

d) Au point 3, des recherches ont probablement été effectuées anciennement pour trouver du minerai, comme au point 1. Nous y avons vu des blocs de calcaire, mais pas de goethite.

e) La région de Ronde-Haie à Jévoumont est couverte de prairies. Aucun affleurement n'y apparaît. Afin d'essayer de mettre en évidence un phénomène géologique en rapport avec l'anomalie géochimique, s'il existe, nous avons réalisé au Sud de Mont deux profils VLF avec le Geonic EM16R (prospection électromagnétique). Le premier recoupait l'anomalie géochimique (point 4) telle qu'elle se présente d'après le traitement. Le résultat a été tout à fait négatif : aucun conducteur n'a été décelé par la méthode, les mesures effectuées étant proches de zéro, tant pour l'inclinaison que pour la compensation. Le second profil (point 5), réalisé plus à l'Est, montre une anomalie typique (fig. 11). La localisation de l'anomalie est juste à l'aplomb du passage par zéro de la valeur de l'inclinaison.

f) Lors de son étude en 1977, J. Coipel avait réalisé une série de profils du même type pour tenter de détecter la présence d'accidents géologiques transversaux. Parmi les données qu'il a recueillies, un alignement d'anomalies apparaît entre Ronde-Haie et Mont. Il s'allonge suivant une direction de  $340^{\circ}$  (point 8) et recoupe l'anomalie géochimique qui, elle, a une direction de  $350^{\circ}$ . En prolongeant cette ligne d'anomalie, nous remarquons qu'elle passe par le point anormal que nous avons décelé au Sud de Mont.

g) Des travaux de placement des égoûts, sur la route de Mont à Theux, ont par un temps mis à nu les roches carbonatées sur une profondeur de plus ou moins 2 m. Nous sommes allés examiner les excavations et les roches affleurant à l'endroit du passage de l'accident mis en évidence par VLF. Nous avons trouvé, au contact du calcaire et du limon de solifluxion, de part et d'autre de la route, des blocs de goethite massive et de calcaire bréchique (point 6). Ces blocs, certains porteurs de stries de glissement, se présentent sur une étendue très localisée (quelques mètres). Quand on s'écarte du point de passage de l'alignement VLF, on ne voit plus aucun bloc de goethite, mais du calcaire dolomitisé.

h) Peut-on considérer que l'anomalie résultant du traitement provient de cet accident, ou serait-elle plutôt en relation avec la faille de Theux ? Pour répondre à cette question, il convient de se pencher sur l'aspect pédologique de la région. Notre première démarche fut de consulter la carte pédologique. Elle mentionnait deux anciens grattages aux points 3 et 7. Le point 7 se situe dans le prolongement de notre alignement VLF. Nous sommes retournés sur le terrain, accompagnés du professeur P. Bourguignon. Près de Ronde-Haie, les sols porteurs de l'anomalie géochimique s'intègrent

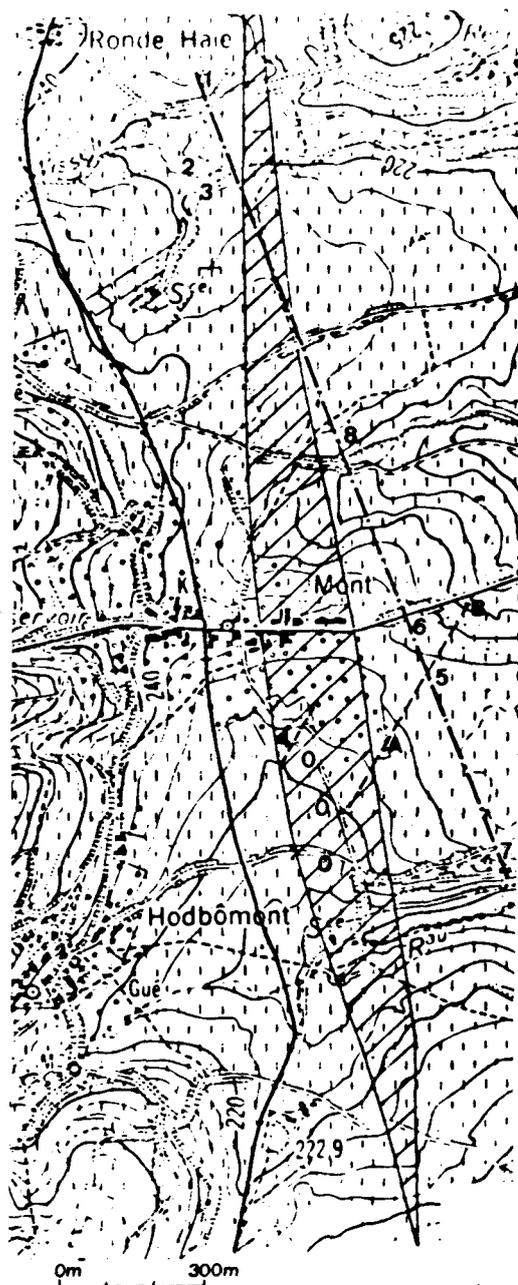


Figure 10

Etapes et résultats de l'analyse complémentaire réalisée sur le terrain.

1. observation faite sur le terrain ou renseignement bibliographique.
-  localisation de l'anomalie
  -  limite de la Fenêtre (contact discordant entre le Dévonien inférieur et le Carbonifère)
  -  profil VLF
  -  accident rencontré

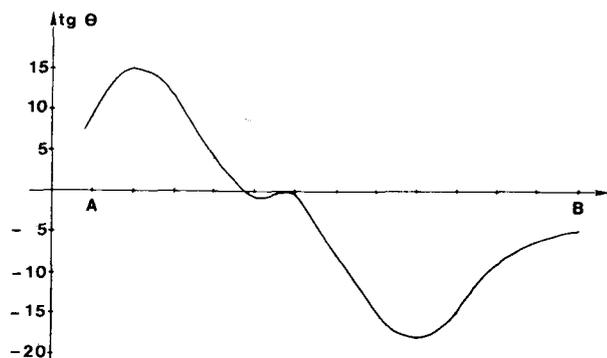


Figure 11

Profil VLF réalisé entre les points A et B de la figure 10.

dans des zones de solifluxion le long de la faille de Theux. A Mont, la zone anomalique se situe sur le versant Est d'une petite vallée séparant les terrains du Dévonien inférieur (à l'Ouest) des terrains carbonifères (à l'Est). La solifluxion n'a pu faire glisser les sols à haute teneur en Pb qu'à partir de ce replat calcaire. Il semble par ailleurs que la solifluxion puisse transporter les sols sur quelques dizaines, voire 100 à 200 mètres. La zone anomalique mise en évidence par le traitement est donc liée à l'alignement que nos observations sur le terrain ont défini. Si elle se présente plus redressée (plus Nord-Sud) que cet alignement, c'est à cause des mouvements de glissement des sols qui ont repoussé l'anomalie vers l'Est, au Nord, et vers l'Ouest, au Sud. Le seul endroit où l'anomalie géochimique concorde avec notre alignement se situe près de Ronde-Haie, à quelques centaines de mètres du chantoire.

## 6.- CONCLUSIONS

Grâce aux propriétés des transformations par séries de Fourier et à l'application des méthodes d'analyse spectrale, la campagne de prospection pédo-géochimique qu'avait entreprise l'Union Minière, qui a priori amenait des conclusions décevantes, a été valorisée et rentabilisée pour le chercheur.

L'étude complémentaire sur le terrain a permis de vérifier la répartition des différents éléments issue d'un traitement mathématique rigoureux : la zone située à l'Ouest de la Hoëgne présente la même structure de répartition géochimique des éléments que celle située à l'Est, connue comme étant minéralisée. A une structure allongée particulièrement anomalique, révélée par le

traitement, correspondent sur le terrain des indices de minéralisation.

Le traitement apparaît donc comme une étape importante devant servir à la décision d'une poursuite plus avant de la prospection - éventuellement à la localisation précise de l'emplacement d'un sondage.

D'une manière plus générale, on peut penser que ce traitement mathématique est applicable dans de nombreux cas de sources d'anomalies multiples et qu'il peut instruire utilement toute recherche basée sur une variable attachée géographiquement à un champ prospecté.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leurs vifs remerciements au Service Géologique de l'Union Minière qui a bien voulu mettre à leur disposition les précieuses données géochimiques de base.

Les cartes d'isoteneurs ont été réalisées grâce au programme d'ordinateur mis au point au laboratoire d'acoustique appliquée du professeur J. Dendal de l'Université de Liège. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON, T.W., 1971. The statistical analysis of time series. Wiley, New York.
- BARTHOLOME, P. & GERARD, E., 1976. Les gisements plombo-zincifères de la région d'Engis, province de Liège, Belgique. Ann. Mines de Belgique, 11<sup>e</sup> livr., 1976 : 901-917.
- Cartes des sols de la Belgique. Spa, n° 148 E. Louveigné, n° 148 W. Centre de cartographie des sols, 1959.
- CHATFIELD, 1975. The analysis of time series : theory and practice. Chapman and Hall, London.
- COIPEL, J., 1977. Etude du potentiel métallogénique de la région de Theux. Travail de fin d'études, ing. civil géologue, Université de Liège.
- DAHLQUIST, G. & BJÖRCK, A., 1974. Numerical methods. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- DAVID, M., 1977. Developments in geomathematics 2. Geostatistical ore reserve estimation. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- de MAGNEE, I., 1967. Contribution à l'étude génétique des gisements belges de plomb, zinc et barytine. Econ. Geol., n° 3, 1967 : 255-266.

- DIMANCHE, F., EK, C. & FRENAY, J., 1979. Minéralisation plombo-zincifère belge. *Minéralogie, Géologie, Minéralurgie*. Ann. Soc. géol. Belg., 102 : 417-429.
- FOURMARIER, P., 1901. Le bassin dévonien et carboniférien de Theux. Ann. Soc. géol. Belg., 28 : 27-53.
- FOURMARIER, P. & HARIGA, C., 1949. La zone faillée de Sasserotte-Le Rocheux dans la Fenêtre de Theux. Ann. Soc. géol. Belg., 72 : B185-191.
- GEUKENS, F., 1959. Het Pseudotektonisch Venster van Theux. Meded. Koninkl. Vlaamse Acad. voor Wetensch. Letteren en Schone Kunsten van België, Klasse der Wetenschappen, Jaargang XXI, n° 7.
- GRANIER, C., 1973. Introduction à la prospection géochimique des gîtes métallifères. Masson, 1973, Paris.
- GRAULICH, J.M., 1964. Excursion du 15 juin 1963. Visite des sondages du Service Géologique de Belgique. Ann. Soc. géol. Belg., 86 : B 589-598.
- HALLEUX, I., 1982. Examen d'une anomalie géophysique et pédochimique dans les calcaires carbonifères de la Fenêtre de Theux. Travail de fin d'études, ing. civil géologue, Université de Liège.
- JENKINS & WATTS, 1968. Spectral analysis and its applications. Holden Day, San Francisco.
- JOURNAL, A. & HUIJBREGTS, Ch., 1978. Mining geostatistics. Academic Press, London.
- KLEIN, C., 1977a. La limite méridionale de la Fenêtre de Theux (Ardenne belge). C.R. Acad. Sc. Paris, 284, sér. D : 425-428.
- KLEIN, C., 1977b. L'intérêt tectogénétique de la Fenêtre de Theux (Ardenne belge). C.R. Acad. Sc. Paris, 284, sér. D : 1155-1158.
- MATHERON, G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. Editions Masson, Paris.
- NAA, P. & UYTENDAELE, M., 1983. Le traitement des données en prospection minière et son application dans le domaine spectral. Ann. Mines de Belgique, 3-4, 1983 : 129-133.
- OPPENHEIMER, A.V. & SCHAFER, R.W., 1975. Digital signal processing. Prentice-Hall, New York.
- RADIX, J.C., 1970. Introduction au filtrage numérique. Eyrolles, Paris.
- UYTENDAELE, M. & NAA, P., 1983. La prospection VLF et le traitement des données. Ann. Mines de Belgique, 3-4, 1983 : 136-140.
- VINOGRADOV, A.P., 1959. The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soil. Consultants Bureau Inc., New York.