

DISTRIBUTION DU CUIVRE DANS LES ALLUVIONS ET LES ROCHES
DE LA VALLÉE DE LA LOMME (DE RECOGNE A GRUPONT) :
APPLICATION DE LA THÉORIE GÉOCHIMIQUE
DU BASSIN VERSANT (*)

par Henri MARTIN (**)

avec la collaboration de P. LECOMTE et F. SONDAG (**)

(6 figures dans le texte et 2 tableaux)

ABSTRACT

Stream sediment sampling and interpretation of regional geochemical survey data require consideration of the mechanisms of bedrock weathering, ionic trace element dispersion in chemical and colloidal solutions, and metal trace element fixation by ionic adsorption in soil and stream sediment.

Geochemical stream sediment theory takes account of thermodynamic laws which rule these mechanisms and demonstrates that the concentrations of trace elements are lognormally distributed. Application of this theory in the area of the Lomme valley in the Ardennes (Belgium), using stream sediment sampling near the point where each tributary enters the main stream, confirms that the copper trace element distribution is lognormal.

The copper lognormal distribution in stream sediment shows that :

1. Copper content in stream sediment is a good « tracer » for copper-rich bedrock.
2. Correlation between copper content in the stream sediments and that in outcropping Cambrian and Lower Devonian formations clearly shows the influence of regional bedrock geology on stream sediment geochemistry.
3. Measurements of « background » concentrations for transition metals in the stream sediments provide a simple method for controlling metallic pollution in the river water.

INTRODUCTION

Une prospection géochimique a été effectuée en Ardennes, au mois de septembre 1970, dans les alluvions et les roches de la vallée de la Lomme suivant une coupe qui rencontre à peu près transversalement les différentes assises du Cambrien et du Dévonien Inférieur, de Recogne à Grupont. La distance parcourue le long du Serpont et de la Lomme a été d'environ 30 km. Étant donné que la prospection a porté sur les affluents et les bassins versants de la rive gauche de la Lomme, un secteur d'environ 200 km² a ainsi été exploré par des méthodes géochimiques.

En plus de la mise au point de techniques d'analyse des éléments en traces et de méthodes statistiques de traitement des résultats, l'objet initial était de vérifier l'application de la théorie géochimique du bassin versant. Cette théorie a été ébauchée par HAWKES & WEBB (1962) lesquels, suivant la logique des « stream sediment », ont mis en évidence qu'un échantillon d'alluvion est représentatif de la composition chi-

(*) Communication présentée le 13 juillet 1971. Manuscrit déposé le 13 août 1971.

(**) Université de Louvain, Institut de Géologie, 6, St-Michelstraat, 3000 Louvain, Belgique.

mique des alluvions, des sols et des roches qui se trouvent en amont du site où il a été prélevé. Il faut distinguer la prospection géochimique de la prospection alluvionnaire (P. ROUTHIER, 1963). En effet cette dernière étudie principalement les minéraux utiles des alluvions tandis que la prospection géochimique s'intéresse aux éléments en traces qui migrent verticalement et latéralement, dans les horizons pédologiques et le long des versants, sous forme ionique dans les solutions.

La théorie géochimique du bassin versant a servi de base d'une part pour définir la stratégie du mode d'échantillonnage des alluvions et d'autre part dans l'interprétation des résultats pour la recherche de structures minéralisées, de corrélations avec la géologie régionale et de moyens de contrôle pour la pollution métallique des eaux de rivières.

THÉORIE GÉOCHIMIQUE DU BASSIN VERSANT

Les éléments en traces sont mis en solution par l'*altération chimique* des roches du bassin versant. Ils diffusent alors sous forme ionique dans les solutions chimiques et colloïdales, de manière « oblique » suivant TARDY (1969), PAQUET (1970), le long d'un versant (figure 1), passent par les alluvions avant d'être entraînés dans les eaux de rivière. Lors de ce cheminement, la majeure partie des éléments en traces est à nouveau immobilisée dans les sols et les alluvions lors de l'*adsorption ionique* principalement par les argiles mais aussi éventuellement par la matière organique et les colloïdes de fer ou de manganèse.

Plus la roche est riche en éléments en traces, plus il y en aura qui seront mis en solution par l'altération chimique, plus il y aura de ces éléments en traces libérés qui diffuseront vers les alluvions et plus il y en aura qui seront piégés dans ces mêmes alluvions. On voit immédiatement ce qu'un tel modèle peut avoir d'intéressant pour l'étude de la géochimie des roches sous-jacentes et aussi pour la prospection minière si la roche altérée du bassin versant est fortement minéralisée. Dans ce dernier cas, l'alluvion est l'indicateur de toute minéralisation comme par exemple des filons, gîtes stratiformes dans le bassin versant. Si la surface du bassin versant n'est pas trop grande, un seul échantillon d'alluvion pris avant le *confluent* peut constituer le reflet de la géochimie de ce bassin versant. Ce qui est le cas de l'échantillon d'alluvion P 13 pour l'exemple du bassin versant de la Fagne des Tailus présenté à la figure 1.

On peut voir dans ce modèle géochimique du bassin versant, la manifestation de l'*effet proportionnel* pour lequel la concentration des éléments en traces de l'alluvion prélevée avant le confluent est proportionnelle à la teneur moyenne en ces éléments en traces dans les roches du bassin versant. MATHERON (1962) a fait la démonstration mathématique que l'effet proportionnel conduit nécessairement à la *distribution lognormale* des résultats géochimiques. La loi de distribution lognormale a trouvé sa confirmation dans les résultats. AHRENS (1954) a été le premier à signaler que les éléments en traces se distribuent lognormalement dans les roches. Des milliers de prospections géochimiques ont montré qu'il en était de même pour les alluvions et les sols. Il est impossible de citer la littérature pléthorique écrite à ce sujet depuis une dizaine d'années. On peut se référer à la revue bibliographique qu'en a faite BOYLE et GARRETT en 1970.

Par le biais de la loi d'action de masse, on peut également faire la démonstration thermodynamique que les teneurs en éléments en traces des alluvions d'une région suivent la distribution lognormale. Préalablement, il est nécessaire de préciser les mécanismes qui entrent en jeu dans le modèle géochimique du bassin versant afin de savoir si on peut leur appliquer la loi d'action de masse.

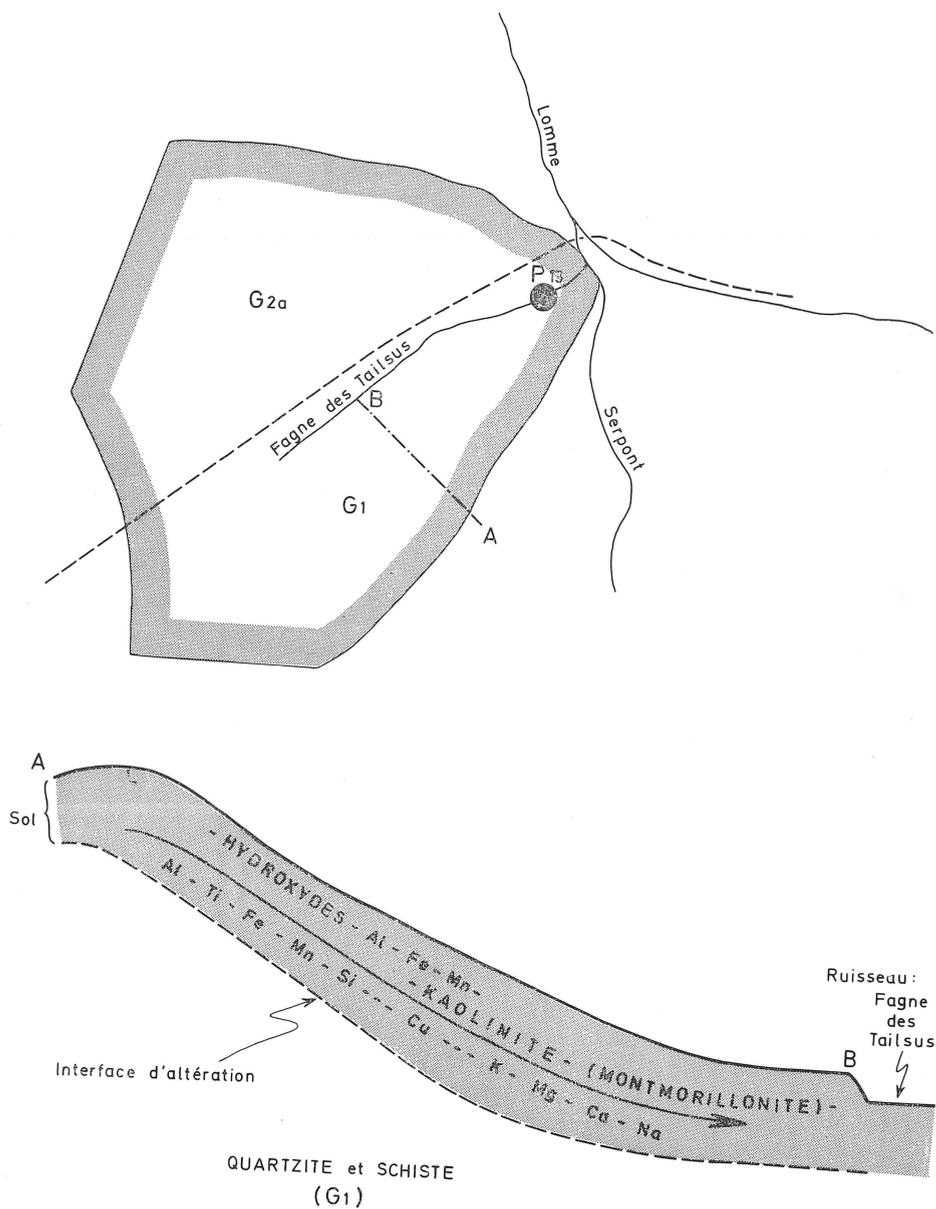


Fig. 1. — Exemple schématique d'un bassin versant avec au-dessus son site d'échantillonnage de l'alluvion (P 13) près du confluent, ses limites géographiques ainsi que la limite stratigraphique en trait interrompu qui sépare les assises G1 et G2A. En-dessous, la coupe d'un versant montre la distribution probable des hydroxydes et des argiles le long de la pente ainsi que, de gauche à droite, la séquence de mobilité croissante des éléments cationiques.

La géochimie de l'altération étudiée par DELVIGNE (1967), TARDY (1969) et PAQUET (1970), a permis de définir la distribution des hydroxydes et des argiles néoformées le long des pentes. Un schéma théorique de cette distribution est donné à la figure 1 avec successivement du haut en bas de la pente la gibbsite, la kaolinite et la montmorillonite. La présence de ces derniers minéraux dépendra des conditions de lessivage des pentes, de climat, etc... ainsi DELVIGNE a identifié de la gibbsite au-dessus et de la kaolinite en bas d'un profil de Côte d'Ivoire. Si cela n'est pas le propos ici de discuter de la distribution des hydroxydes et des argiles dans les paysages, il fallait cependant le signaler car cela conduit à des déductions importantes pour la géochimie des altérations et la mobilité des éléments chimiques le long des versants. En effet la succession du haut en bas d'une pente, de gibbsite et de kaolinite, montrée à la figure 1 implique une mobilité croissante pour les éléments Al, Si et Ca, pour ne prendre que ces éléments en exemple. DELVIGNE et MARTIN (1970) ont pu confirmer cette séquence de mobilité à l'échelle de la lame mince, en analysant à la microsonde électronique à R-X, l'altération de plagioclase en kaolinite par l'intermédiaire d'une phase amorphe. Les analyses ponctuelles, les profils par balayage électronique comme les images de distribution du rayonnement X montrent que lors de la transformation du feldspath en gel, l'aluminium ne bouge pas, le silicium s'en va à concurrence d'environ 25 %. Le fer est un peu plus mobile que le silicium tandis que le calcium et le sodium sont dès le premier stade de l'altération complètement lessivés. Ceci confirme la séquence de mobilité des éléments chimiques trouvée par TARDY (1969) et symbolisée à la figure 1. Comme la mobilité du cuivre est intermédiaire entre celles du silicium et du calcium, l'ion cuivre libéré par l'altération chimique sera exporté et diffusera le long des versants et dans les alluvions si toutefois les conditions de pH et de potentiel d'oxydoréduction (Eh) le permettent.

Pour TARDY (1969), ce mécanisme de la mise en solution des éléments par l'altération chimique obéit à la loi d'action de masse. Il en est de même pour le second mécanisme important impliqué dans ce modèle géochimique du bassin versant, c'est-à-dire l'adsorption ionique des éléments en traces par les argiles ou autres complexes adsorbants dans les alluvions (MARTIN & LAUDELOUT, 1963). Or, MATHERON (1962) a démontré l'identité mathématique de la loi lognormale et de la loi d'action de masse. La théorie géochimique du bassin versant doit donc trouver sa confirmation dans la lognormalité de la distribution des éléments en traces comme par exemple le cuivre dans les alluvions.

LEVÉ GÉOCHIMIQUE

La théorie géochimique du bassin versant a servi de base pour définir la stratégie du mode d'échantillonnage des alluvions. Au lieu de prélever les échantillons de manière aléatoire ou suivant une trame quelconque, nous avons choisi d'échantillonner les alluvions des affluents de la Lomme juste avant le confluent ainsi que le montrent les ronds noirs dans la figure 1 (P 13) et dans la figure 2. « Juste avant le confluent » signifie, que l'échantillon ne contient aucun élément des alluvions de la Lomme. Nous avons pris aussi une dizaine d'échantillons d'alluvions de la Lomme. Les échantillons ont été prélevés en double par site et des mesures de pH et des tests à la dithizone (ANTHONY, 1966) ont été effectués aussitôt après le prélèvement de l'échantillon. Sur la rive gauche de la Lomme nous avons ainsi considéré 15 bassins versants dont les limites sont montrées à la figure 2. Le prélèvement d'une cinquantaine (2×25) d'échantillons d'alluvions pour une aire de prospection de 200 km² environ constitue une économie appréciable, si on considère que d'habitude, la maille optimale pour la prospection est de 1 km \times 1 km, ce qui devrait correspondre à la prise de 400 échantillons.

Bien que la géologie régionale de la région prospectée soit assez bien connue (ASSELBERGHS, 1946) une reconnaissance géologique a été faite entre Libramont et GRUPONT le long de la ligne de chemin de fer Arlon-Bruxelles. Son but principal était de reconnaître la stratigraphie d'ASSELBERGHS. Elle a cependant permis aussi de

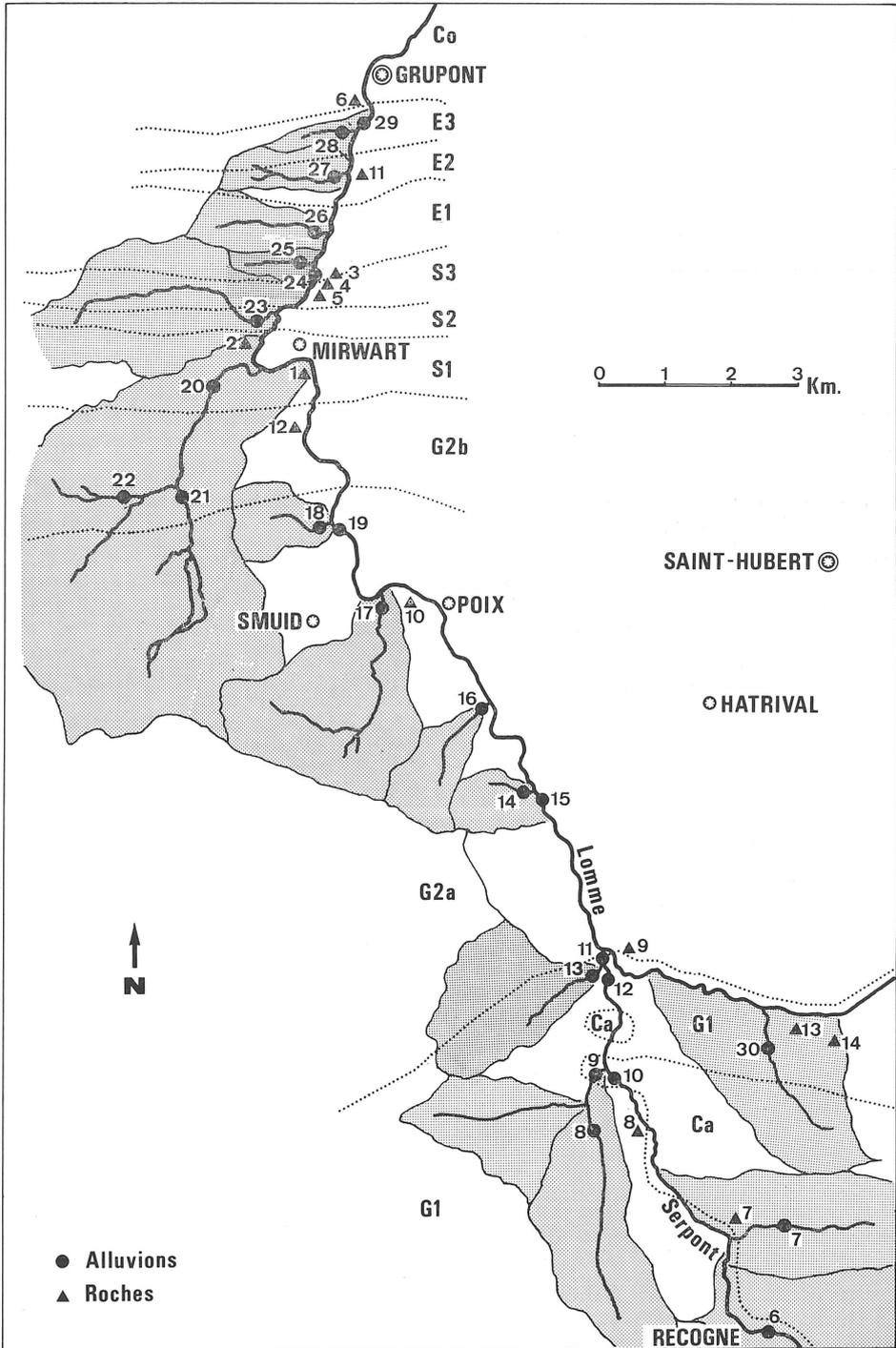


Fig. 2. — Carte de la vallée de la Lomme de Recogne à Grupont, avec sur la rive gauche, les ruisseaux affluents et les limites de leur bassin versant, les sites d'échantillonnage des alluvions et des roches. Les limites stratigraphiques (suivant Asselberghs) en pointillé séparent les différentes assises (Ca, G1, etc...).

retrouver une minéralisation en chalcopyrite à la limite de l'Emsien et du Siegenien. De plus, nous avons pu observer que les bancs de quartzites et de schistes dont sont constitués pour l'essentiel le Cambrien et le Dévonien Inférieur de l'Ardenne sont toujours intimement mêlés. Ces deux faits d'observation vont nous être très utiles pour l'interprétation des résultats géochimiques et ils nous montrent aussi qu'il est nécessaire d'intégrer toute prospection géochimique dans un contexte géologique minutieusement étudié. Des esquilles de roches fraîches des bancs schisteux ont été prélevées dans les affleurements rencontrés et regroupées en un seul échantillon pour chaque assise géologique. Nous avons donc dix échantillons de roches, chacun étant représentatif de chaque assise géologique : Ca (Cambrien), G1, G2a, G2b (Gedinnien), S1, S2, S3 (Siegenien) et E1, E2, E3 (Emsien).

TECHNIQUES D'ANALYSES

Les échantillons d'alluvions ont été tamisés et la fraction qui passe à travers un tamis de 80 « mesh » a été retenue pour l'analyse. Cette fraction ainsi que la poudre de broyage des roches ont été quartées et ensuite analysées (*) pour le cuivre. Ces analyses ont été faites au moyen de la spectrométrie d'émission U. V. et quelques contrôles ont été réalisés par la spectrophotométrie d'absorption atomique (*), (**). Après avoir porté en graphique les points d'analyse pour l'étalonnage, la droite de régression ainsi que les résultats qui en dérivent pour tous les échantillons ont été calculés au moyen du petit ordinateur de table Hewlett-Packard, modèle 9100 B. Il en a été de même pour les calculs des différentes corrélations entre les résultats des alluvions et des roches. Chaque échantillon a ses teneurs en éléments en traces ainsi que d'autres paramètres, comme par exemple les coordonnées géographiques consignées dans une carte « perforée ». Les coordonnées géographiques pour chaque échantillon d'alluvion ont été établies en se basant sur les cartes au 1/10000^e de l'Institut Géographique Militaire. Ainsi par exemple, l'échantillon d'alluvions n° 13 du ruisseau de la Fagne des Tailus (figures 1 et 2) est représenté par un numéro de 9 chiffres : 644 074 572. Les trois premiers chiffres indiquent la carte utilisée 64/4, les trois chiffres suivants l'abscisse et les trois derniers l'ordonnée. L'origine (644 000 000) est choisie au coin inférieur gauche de la carte 64/4 et chaque coordonnée ($x = 074$ et $y = 572$) a comme unité le mm. Ce système a l'avantage de pouvoir définir l'endroit d'échantillonnage à 10 mètres près. De plus il permet l'emploi de l'ordinateur pour établir les cartes de distribution des éléments en traces et aussi éventuellement des cartes résiduelles. Pour certaines roches minéralisées, les minéraux vecteurs du cuivre ont été recherchés au microscope optique par la technique de la lumière réfléchie. Cette recherche de minéraux contenant du cuivre a été faite également à la microsonde électronique à R-X, type AMX, A.R.L. (Applied Research Laboratory). Le cuivre a été recherché aussi dans certains minéraux comme la pyrite par exemple, sachant que la limite de détection de la microsonde électronique à R-X est égale à environ 500 ppm pour le cuivre.

RÉSULTATS

Les résultats de l'analyse du cuivre dans les alluvions et les roches de la vallée de la Lomme sont montrés aux tableaux I et II ainsi qu'à la figure 3.

(*) Nous avons mis au point et effectué les analyses quantitatives du cuivre à l'Institut de Recherches Chimiques à Tervuren. Nous remercions Monsieur P. HERMAN et ses collaborateurs pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée.

(**) Laboratoire de Traitement des Minerais (Professeur J. DE CUYPER, Institut de Métallurgie, Université de Louvain) par Monsieur VANDENBERG.

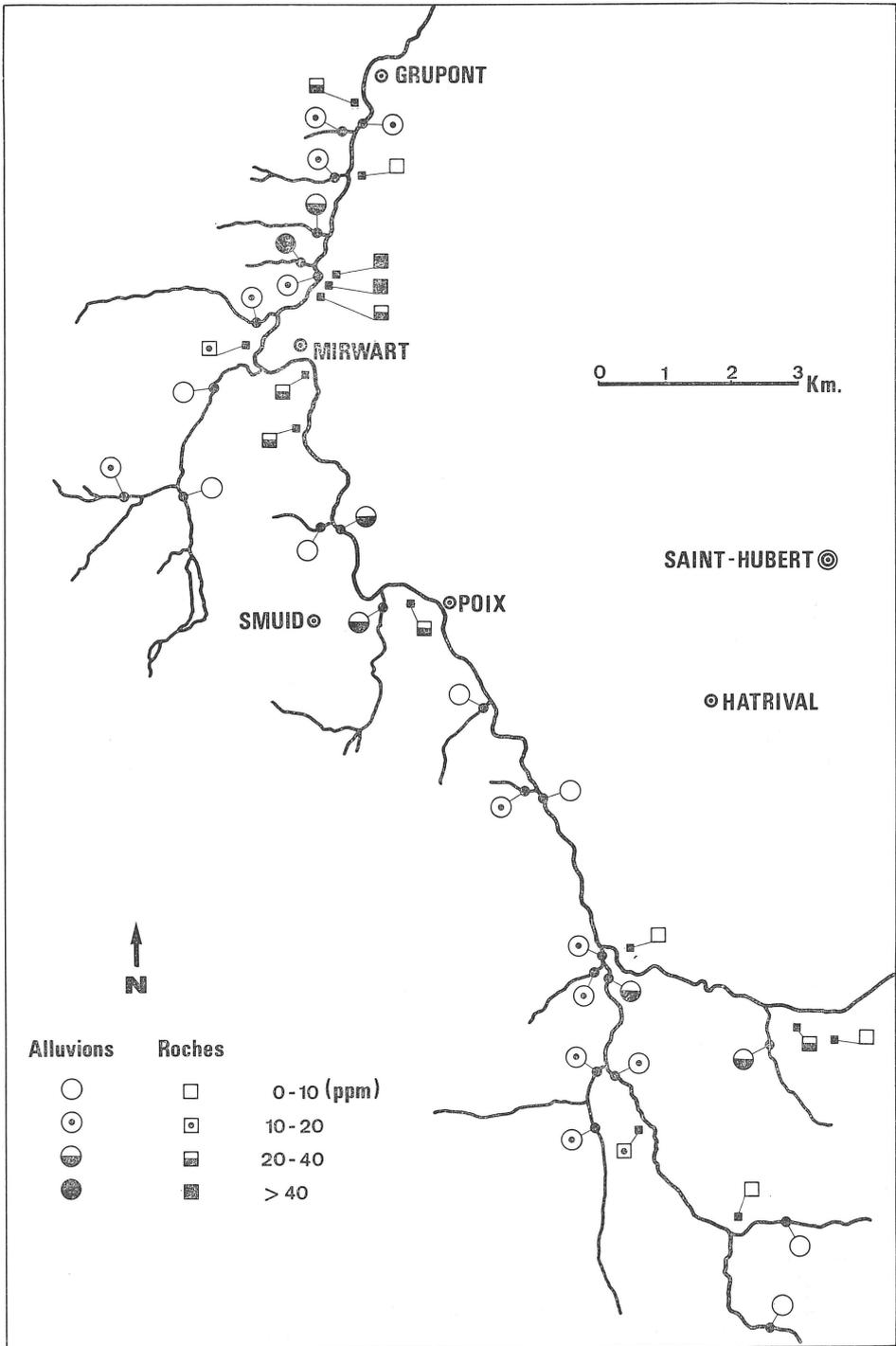


Fig. 3. — Carte de distribution des teneurs en cuivre dans les alluvions et les roches dans la vallée de la Lomme.

TABLEAU I.

Teneurs en cuivre des roches

Ech. n°	Assise	Moyenne Cu (ppm)
8,13	Ca	28
7	G1	2
9,10	G2a	15
12	G2b	20
1	S1	30
2	S2	15
3	S3	33
5	E1	45
11	E2	2
6	E3	26

Les résultats analytiques pour le cuivre sont reproductibles à 20 % près des valeurs mesurées, reprises aux tableaux I et II.

Les pH mesurés sur les alluvions varient de 5 à 6. Les tests à la dithizone pratiqués sur le terrain n'ont pas montré la couleur caractéristique du cuivre complexé par la dithizone, au contraire du zinc pour lequel une réaction positive a été mise en évidence, principalement pour les alluvions de la Lomme.

L'étude au microscope en lumière réfléchie ainsi que l'analyse à la microsonde électronique à R-X ont mis en évidence la chalcopyrite dans les roches de l'Emsien inférieur. Aucune concentration en cuivre n'a été décelée au moyen de la microsonde électronique à R-X, dans les autres minéraux de la roche, ce qui signifie que les minéraux analysés ne contiennent pas de cuivre à des concentrations supérieures à 500 ppm.

DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

A. Lognormalité et inventaire géochimique

Comme le montrent les figures 4 et 5, la distribution des teneurs en cuivre dans les alluvions de la vallée de la Lomme est lognormale. Les considérations théoriques sur la géochimie des bassins versants trouvent donc leur confirmation dans cette lognormalité des résultats.

Pour exprimer l'inventaire géochimique ou encore les caractéristiques de la population des teneurs en cuivre des alluvions de la Lomme, on a opéré graphiquement à partir de la figure 5, qui représente la courbe cumulée de fréquences des teneurs en cuivre des alluvions. Une population normale est caractérisée par sa médiane, son mode ou encore sa moyenne arithmétique (b) affectée d'une dispersion égale, par exemple, à plus ou moins deux fois sa déviation standard (S). Ceci signifie qu'environ 95 % de la population a des valeurs comprises entre $b - 2S$ et $b + 2S$. Suivant la figure 5, on détermine graphiquement sur l'abscisse les valeurs b , $b - 2S$ et $b + 2S$ qui correspondent respectivement en ordonnée à 50 %, 2,5 % et 97,5 % comme fréquences cumulées. Puisqu'il s'agit d'une distribution lognormale, l'abscisse et les valeurs caractéristique, c'est à-dire b et $b \pm 2S$ sont exprimées en logarithme

TABLEAU II

Teneur en cuivre des alluvions

Ech n°	Coordonnées	Localisation (Ruisseaux et Lomme)	Étages recouverts par le bassin versant	Cu ppm
29	597 485 812	Lomme	—	20
28	475 813	Pompape	E3	19
27	454 744	Tier du Grand Han	1/4 E3 + 3/4 E2	17
26	454 692	Grand Han	E1	33
25	430 634	Bois du Dessous	E1	70
24	430 625	Lomme	—	15
23	326 542	Revaus	3/16 S1 + 1/4 S2 + 1/4 S3 + 5/16 E1	11
22	207 287	Bois de Tellin	2/3 G2a + 1/3 G2b	11
21	276 434	Marsau	2/3 G2a + 1/3 G2b	9
20	223 287	Marsau	4/7 G2a + 2/7 G2b + 1/7 S1	4
19	460 230	Lomme	—	26
18	418 229	Grande Taille	4/5 G2a + 1/5 G2b	5
17	438 113	Pont Lozet	G2b	29
16	643 954 687	Dosse	G2b	6
15	774 826	Lomme	—	10
14	774 826	Grossi	G2b	14
13	644 074 572	Fagne des Tailsus	1/2 G2a + 1/2 G1	16
12	078 570	Serpont	—	39
11	077 592	Lomme	—	20
30	318 458	Anomalies	Ca	21
10	080 413	Serpont	—	17
9	065 414	Noire Eau	1/20 Ca + 19/20 G	10
8	048 352	Noire Eau	G1	10
7	304 184	Bernihe	Ca	7
6	292 030	Gouttes	G2a	7

de la teneur en cuivre des alluvions. Pour avoir ces valeurs caractéristiques directement sous forme de concentration en cuivre il faut prendre l'antilogarithme de b , $b - 2S$ et $b + 2S$. Pour b on obtient une valeur de 12 ppm en cuivre qui correspond au bruit de fond ou encore à la moyenne géométrique des teneurs en cuivre des alluvions de la vallée de la Lomme. Étant donné que les résultats géochimiques se distribuent lognormalement il est donc plus significatif de prendre comme bruit de fond la moyenne géométrique au lieu de la moyenne arithmétique. Elle est moins influencée par l'addition de nouveaux résultats ou par de hautes valeurs (LEPELTIER, 1969). Pour évaluer la dispersion en concentration (ppm) de cuivre, on doit aussi calculer l'antilogarithme des valeurs $b - 2S$ et $b + 2S$, pour lesquelles on obtient respectivement 3,4 et 44 ppm de cuivre. En résumé, on peut donc exprimer l'inventaire géochimique du cuivre dans les alluvions de la Lomme par la succession des 3 nombres suivants :

$$(IG) \frac{70}{\bar{Cu}} : 3,4 - 12 - 44 \text{ ppm}$$

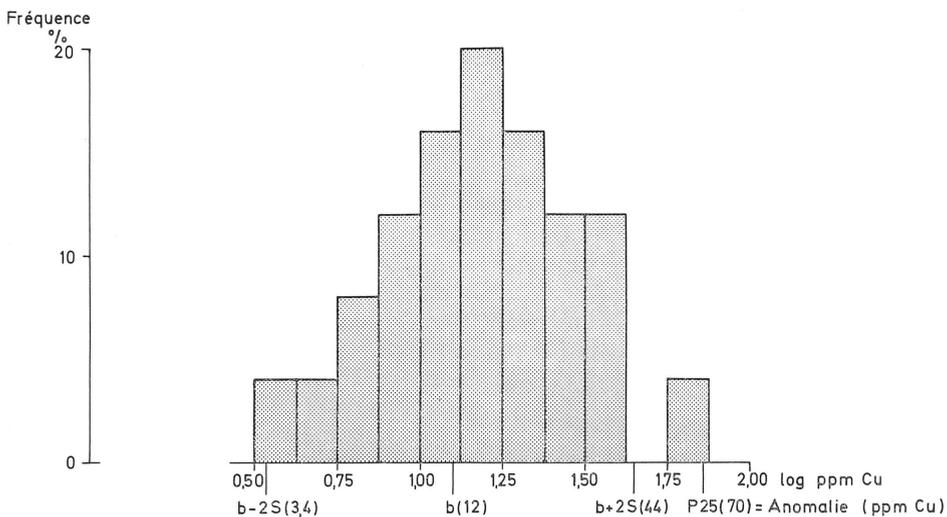
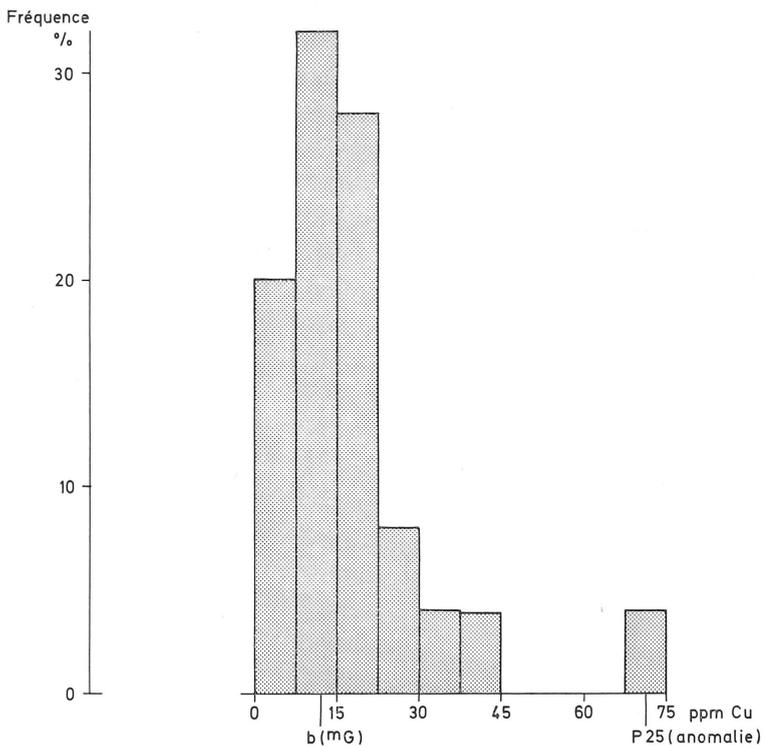


Fig. 4. — Histogrammes avec au-dessus, en abscisse, les valeurs arithmétiques des teneurs en cuivre dans les alluvions et en-dessous leurs valeurs logarithmiques.

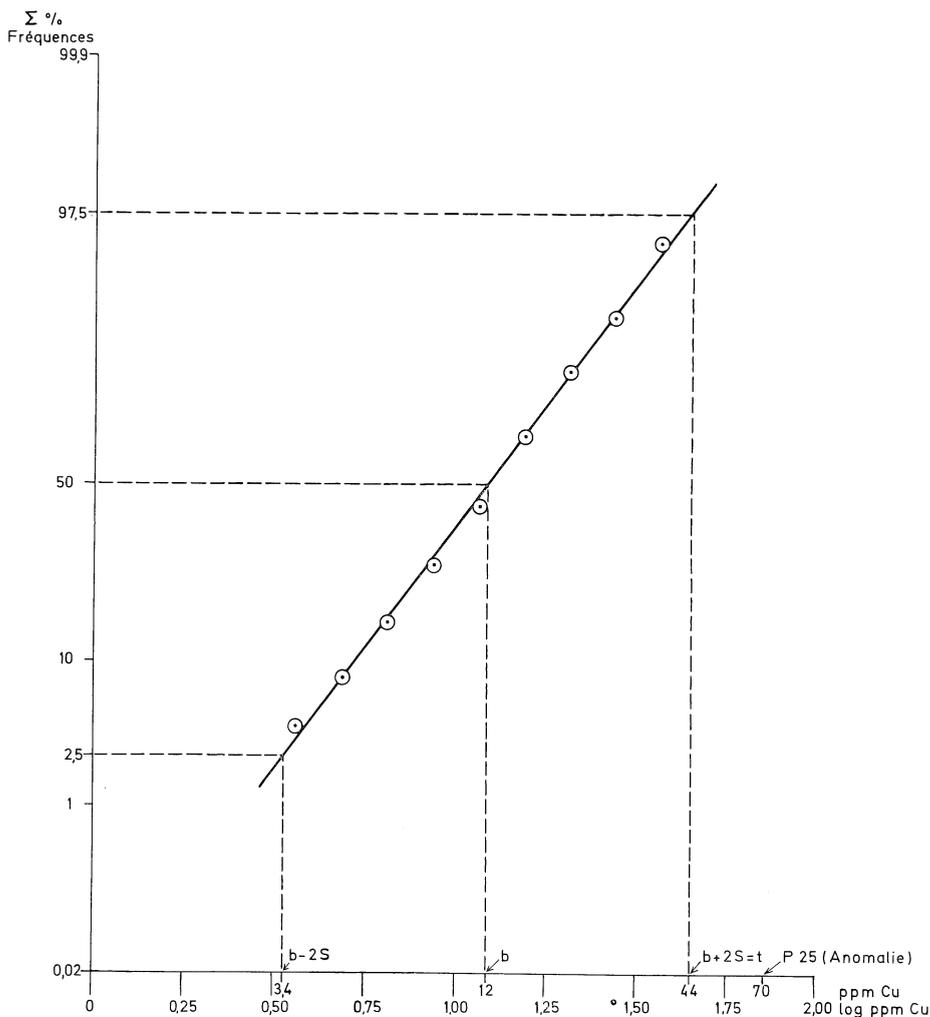


Fig. 5. — Distribution des fréquences cumulées pour la teneur en cuivre dans les alluvions.

Le nombre médian (12) représente le bruit de fond ou la moyenne géométrique des teneurs en cuivre des alluvions de la Lomme. Les deux autres nombres (3,4 et 44) représentent les valeurs extrêmes dans l'intervalle desquelles 95 % environ de la population des teneurs en cuivre est comprise.

B) Anomalie géochimique et structures minéralisées dans les roches

L'anomalie géochimique est définie conventionnellement par toute valeur supérieure au seuil (t ou « treshold »), t étant égal à l'antilogarithme de $b + 2S$. Ceci signifie qu'il y a seulement 2,5 % de chances pour que toute valeur supérieure à t soit trouvée dans la population géochimique distribuée lognormalement. Nous avons un exemple d'anomalie géochimique avec l'alluvion n° 25 dont la teneur en cuivre est

égale à 70 ppm. Cette alluvion est admise comme représentative du bassin versant où coule le ruisseau du Bois du Dessous. Comme nous l'avons vu dans la théorie géochimique du bassin versant, la source principale des ions cuivre dans l'alluvion prise près du confluent est l'altération chimique des roches comprises dans le bassin versant. Par conséquent le seuil de 44 ppm en cuivre est fonction principalement de la teneur régionale en cuivre des roches du Cambrien et du Dévonien Inférieur de la vallée de la Lomme depuis Recogne jusque Grupont. L'anomalie géochimique pour le cuivre de l'alluvion n° 25 doit donc trouver son explication par une source plus riche en cuivre située dans le bassin versant du Bois du Dessous. Comme toute contamination humaine en cuivre dans cette région est peu probable, l'explication de l'anomalie de l'alluvion n° 25 est une minéralisation des roches de l'Emsien inférieur ou du Siegenien Supérieur que recouvre, en tout ou en partie, le bassin versant du Bois du Dessous. La figure 3 montre que les roches de cette région ont une teneur en cuivre supérieure à la moyenne. Ces roches contiennent des grains de chalcoppyrite ainsi que l'ont montré les analyses au microscope en lumière réfléchie et à la microsonde électronique à R-X. De plus, lors du levé géologique nous avons retrouvé des minéralisations de chalcoppyrite dans la coupe située à la limite des assises Siegenienne et Emsienne. Il faut souligner ici l'intérêt ainsi mis en évidence pour la prospection minière que peut présenter une telle recherche basée sur la théorie géochimique du bassin versant. Il faut remarquer qu'une prospection plus détaillée dans ce bassin versant du Bois du Dessous permettra peut-être de délimiter l'étendue de cette minéralisation en cuivre et d'en préciser l'importance éventuelle.

C) *Corrélation stratigraphique*

ROSE, DAHLBERG & KEITH (1970) ont établi une équation de régression à variables multiples où la teneur en éléments en traces dans les alluvions est exprimée en fonction de ces variables multiples comme par exemple la lithologie, l'âge des roches, les teneurs en Fe, Mn des alluvions, leurs pH, Eh etc... De leurs résultats, il ressort que la lithologie et l'âge des roches sont les facteurs principaux. Comme la lithologie constituée essentiellement de quartzites et de schistes intimement mélangés est assez uniforme dans le Cambrien et le Dévonien Inférieur de la vallée de la Lomme, nous avons d'abord essayé de procéder graphiquement à une régression avec comme variable l'âge des roches. Nous avons exprimé le logarithme de la teneur en cuivre des alluvions pour chaque bassin versant en fonction du logarithme de la teneur moyenne en cuivre des roches de chaque bassin versant correspondant. Cette teneur moyenne en cuivre des roches a été calculée en se basant sur la théorie géochimique du bassin versant. Ainsi par exemple, pour le bassin versant de la Fagne des Tailus (figure 1, 2 et tableau II) on a calculé le pourcentage de surface occupée par chaque assise géologique dans ce bassin (0,5G1 + 0,5G2a). Ce pourcentage de surface est multiplié par la teneur en éléments en traces de la roche pour l'assise correspondante. Suivant le tableau I, on peut calculer la valeur d'abscisse de la figure 6 pour le point 13;

$$0,5 \times 2 + 0,5 \times 15 = 8,5 \text{ ppm Cu.}$$

Comme le montre la figure 6, nous obtenons une *corrélation lithostratigraphique* pour 14 des 18 bassins versants de la rive gauche de la Lomme. Le coefficient de corrélation (r) pour ces 14 points est égal à 0,75. Cela signifie qu'environ 50 % (DAHLBERG, 1969) de la variation de la teneur en cuivre dans les 14 alluvions s'explique par la variation pour chaque bassin versant correspondant de la concentration en cuivre dans les roches des différentes assises du Dévonien inférieur délimitées par ASSELBERGHS (1946). Nous avons employé également le coefficient de rang de SPEAR-

MANN ρ pour préciser la corrélation stratigraphique. Nous ne décrivons pas la théorie statistique sur laquelle se fondent le coefficient de corrélation (r) et le coefficient de SPEARMANN (ρ). Cette théorie a fait l'objet de nombreux ouvrages comme celui de DIXON et MASSEY (1957) ainsi que de nombreuses applications en géochimie comme dans TREULL, FAUCHERRE et MACQUAR (1970) par exemple. Pour plus de précision, nous rappellerons quand même les formules employées. Ainsi pour le coefficient de corrélation, nous avons utilisé

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}] [Y_i - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}]^2 \sum_{i=1}^n [Y_i - \bar{Y}]^2}}$$

où X_i et Y_i représentent respectivement les valeurs d'abscisse et d'ordonnée de la figure 6 pour les 14 points corrélés, \bar{X} et \bar{Y} leur moyenne arithmétique respective.

Pour le coefficient de rang de SPEARMANN, ρ est défini par :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}$$

où d représente la différence des rangs d'une même échantillon dans les deux classements et n le nombre des échantillons.

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{\tau^2}{\tau^2 + n - 2}}$$

τ est donné par les tables, il dépend de n et du seuil de probabilité choisi. Ainsi pour notre exemple, si $n = 18$, pour un seuil de 99 %, $\tau = 2,92$ et $\rho_0 = 0,588$.

Si $|\rho|$ est inférieur à une certaine valeur de ρ_0 , calculée au moyen du test τ de STUDENT, on doit rejeter l'hypothèse de corrélation entre les alluvions et l'âge des roches pour le cuivre. C'est ce que nous avons si nous calculons ρ avec les 18 points de la figure 6. Nous obtenons alors pour ρ une valeur égale à 0,549 qui est inférieure à la valeur 0,588 de ρ_0 (pour $n = 18$). La régression graphique présentée à la figure 6 à l'avantage de visualiser la corrélation et de séparer les points en deux lots. Les 14 points du lot entourés d'un trait interrompu ont une valeur de ρ égale à 0,688 laquelle est supérieure à la valeur de ρ_0 (0,658 pour $n = 14$). L'emploi du coefficient de rang de SPEARMANN comme celui du coefficient de corrélation permet donc de conclure à une corrélation stratigraphique positive pour la teneur en cuivre des alluvions représentatives de 14 bassins versants de la rive gauche de la Lomme.

Il reste à expliquer l'écart à la corrélation des quatre points 8, 9, 13 et 27 de la figure 6. La discussion doit évidemment porter sur les valeurs d'abscisse et d'ordonnée de ces 4 points dans la figure 6. Les valeurs d'abscisse de ces 4 points sont plus excéntriques par rapport à l'ensemble des points que les valeurs d'ordonnée. Cela s'explique si on consulte le tableau I, dans lequel il apparaît que les teneurs en cuivre du Gedinien Inférieur (G1) et de l'Emsien Moyen (E2) sont très basses par rapport aux valeurs des autres roches du Cambrien et du Dévonien Inférieur. Or les abscisses de ces 4 points sont fonction de ces teneurs en cuivre des assises G1 et E2. Par conséquent une explication serait que la teneur en cuivre des roches analysées pour les assises G1 et E2 ne serait pas représentative de la concentration moyenne des roches des bassins versants correspondants aux alluvions n° 8, 9, 13 et 27. On peut dès lors

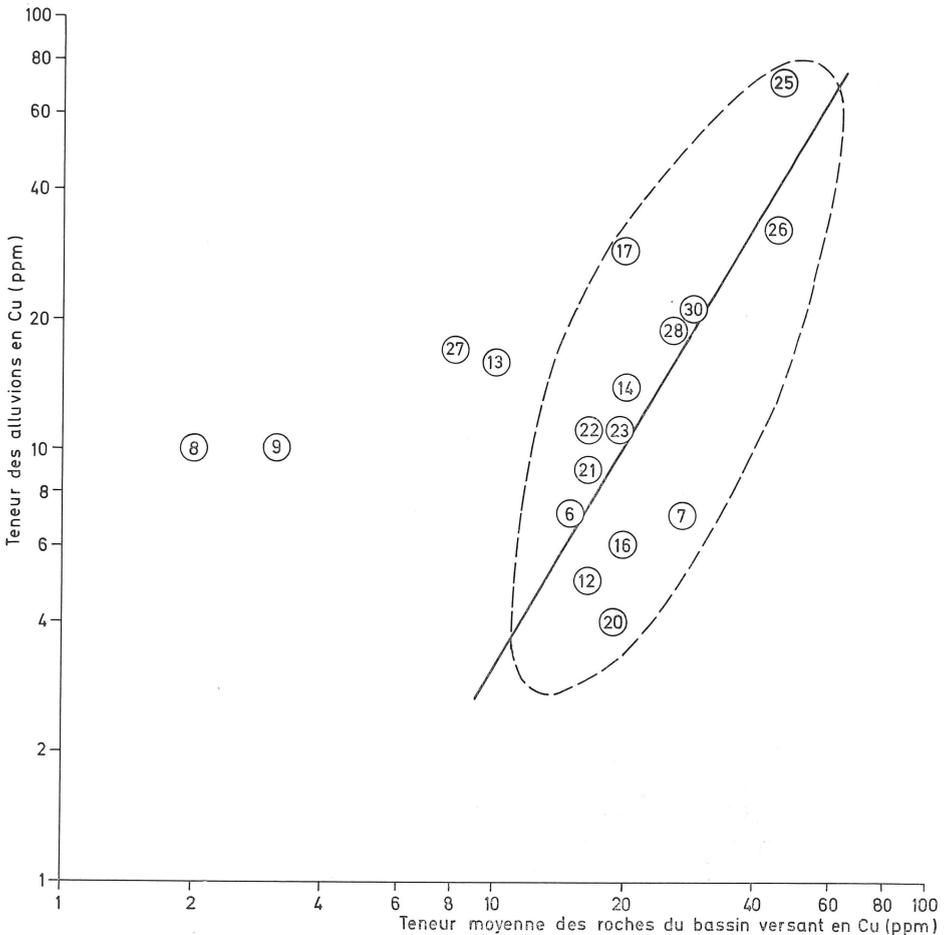


Fig. 6. — Corrélation géochimique des teneurs en cuivre entre les alluvions et la lithostratigraphie. Les numéros inscrits dans les cercles qui figurent les points de la corrélation se rapportent aux sites d'échantillonnage (voir figure 2 et tableau II).

émettre la série non exhaustive d'hypothèses suivantes : échantillonnage non représentatif pour l'analyse des roches des assises G1 et E2, erreur analytique pour le dosage du cuivre des roches échantillonnées, les roches de l'assise G1 que recouvrent les bassins versants n° 8, 8, 13 ainsi que celles de l'étage E2 qui correspond au bassin versant n° 27 pourraient avoir une plus petite proportion de quartzites par rapport aux schistes que les roches analysées. Il ne faut pas oublier non plus que les valeurs d'abscisse sont calculées pour chaque bassin versant à partir des pourcentages de surface des assises délimitées par ASSELBERGHS. Pour les valeurs d'ordonnée, pour autant que les valeurs d'abscisse soient confirmées, il faudrait pouvoir expliquer une trop haute teneur en cuivre des alluvions n° 8, 9, 13 et 27. Une explication serait que ces alluvions soient contaminées par des alluvions de la Lomme, plus riches en cuivre. Une autre hypothèse serait que ces alluvions relativement riches en cuivre seraient représentatives de minéralisations dans les roches des assises G1 et E2. Les effets en

seraient moins marqués sur ces alluvions que pour l'échantillon n° 25 soit parce que ces minéralisations sont peu importantes ou encore soit parce que les roches minéralisées sont situées à des endroits relativement profonds dans les bassins versants en cause. Remarquons que le site de prélèvement de l'alluvion n° 27 est très proche de la zone minéralisée en cuivre, mise en évidence par l'alluvion n° 25. D'autre part, des anomalies géochimiques en cuivre dans l'assise du Gedinnien Inférieur ont été mises en évidence dans une prospection géochimique détaillée de sols au nord du gisement de pyrrotine de la région du Serpont à Bras (St-Hubert) par MARTIN, SONDAĞ et LÉCOMTE (publication en préparation). Si ceci se confirme, c'est-à-dire que les écarts à la corrélation stratigraphique par les alluvions n° 8, 9, 13 et 27 représentent des indices de minéralisation en cuivre pour les roches des assises G1 et E2, la corrélation graphique présentée à la figure 6 peut servir de méthode pour mettre en évidence des anomalies géochimiques *locales* et peu marquées. La figure 5 avec la droite de fréquences cumulées pour la distribution lognormale de cuivre dans les alluvions reste la méthode graphique qui permet le plus facilement de mettre en évidence l'anomalie géochimique régionale définie conventionnellement par une valeur supérieure au seuil.

D) *Pollution métallique des eaux de rivière*

La théorie géochimique du bassin versant peut fournir un *modèle géochimique de l'échantillonnage des eaux pour le contrôle de la pollution métallique des eaux de rivière*. Il suffira d'échantillonner l'eau des rivières à la sortie de chaque petit bassin versant avant le confluent puisque cet endroit d'échantillonnage est un passage obligé pour des ions indicateurs (Zn, Pb, Cr, Hg, ...) de pollution éventuelle dans le bassin versant. Cette étude géochimique nous montre aussi qu'au lieu de prendre des échantillons d'eau de rivière aux confluent, il y a avantage à prélever, aux même endroits, les alluvions qui jouent le rôle d'accumulateurs d'ions et qui gardent la mémoire de toute pollution transitoire éventuelle de ces eaux de rivière. Ceci rejoint l'idée émise dans le livre de ROUTHIER (1963, II, p. 1124) : « les alluvions présentent toutefois sur les eaux quelques avantages pratiques : teneurs plus élevées, plus grande indépendance vis-à-vis des variations de pluviosité, vérifications possibles longtemps après le prélèvement, utilisation ultérieure des échantillons pour la recherche de divers éléments ».

Nous n'avons pas observé de contamination d'origine humaine pour le cuivre dans les alluvions de la rive gauche de la Lomme. La ligne de chemin de fer Bruxelles-Arlon qui longe la Lomme de Recogne à Grupont est peut-être à l'origine d'un apport de cuivre qui serait compris dans le bruit de fond régional dont on a montré que les roches y contribuaient à raison d'environ 50 %.

L'*inventaire géochimique* pour le cuivre des alluvions de la rive gauche de la Lomme, c'est-à-dire

$$(IG) \frac{70}{Cu} : 3,4 - 12 - 44 \text{ ppm}$$

peut constituer la référence d'une vallée probablement peu polluée en cuivre. Cet inventaire pourra permettre de mettre en évidence toute pollution future éventuelle en cuivre dans la vallée de la Lomme ou dans une autre vallée si la vallée de la Lomme est prise comme référence. Toute autre pollution des eaux par des métaux comme par exemple le plomb, le mercure, etc... pourra être détectée à l'avenir en se basant sur le contenu en ions métalliques des alluvions prélevées en 1970.

CONCLUSIONS

La théorie géochimique du bassin versant peut être appliquée aux résultats de la prospection géochimique des éléments en traces dans les alluvions. Cependant leur signification exacte ne pourra être dégagée d'une manière plus rigoureuse que lorsqu'on disposera de résultats plus nombreux pour le cuivre et pour d'autres éléments en traces. En particulier il s'avèrera nécessaire d'avoir une connaissance plus précise et plus détaillée sur la géochimie des roches du Gedinnien Inférieur et de l'Emsien Moyen afin de pouvoir interpréter les résultats des alluvions n° 8, 9, 13 et 27 présentés à la figure 6.

Toutefois la théorie géochimique du bassin versant a permis d'établir une logique de prospection géochimique c'est-à-dire la logique de l'alluvion prélevée près du confluent, cette alluvion étant représentative du bassin versant situé en amont pour les éléments métalliques qu'il contient. Cette logique de prospection semble être confirmée par les résultats du cuivre dans les alluvions des bassins versants de la rive gauche de la Lomme de Recogne à Grupont. En effet

a) La distribution des teneurs en cuivre des alluvions échantillonnées est *lognormale*.

b) L'anomalie géochimique mise en évidence dans l'alluvion représentative du bassin versant où coule le ruisseau du Bois du Dessous semble être l'indice d'une *minéralisation en cuivre* (chalcopyrite) des roches du Siegenien Supérieur et de l'Emsien Inférieur.

c) Il existe une corrélation positive entre les teneurs en cuivre de la plupart des alluvions et la *lithostratigraphie* du Dévonien Inférieur.

Un des résultats inattendus est qu'une telle recherche géochimique peut être utile au contrôle de la pollution métallique des eaux de rivière. En effet, l'inventaire géochimique établi permettra de mettre en évidence toute pollution future éventuelle en cuivre dans la vallée de la Lomme ou dans une autre vallée si la vallée de la Lomme est prise comme référence. De plus, sans vouloir généraliser hâtivement, il semble que la théorie géochimique du bassin versant puisse permettre d'établir un modèle géochimique de prélèvement d'échantillons d'eau ou d'alluvion près du confluent pour le contrôle de la pollution métallique des eaux dans chaque bassin versant d'une vallée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tout particulièrement le Professeur P. de BETHUNE pour l'aide précieuse qu'il a apporté à cette étude. La gratitude des auteurs s'adresse également aux Professeurs F. KAISIN, J. MOREAU et A. LEES pour leur appui. Leurs remerciements vont encore à Messieurs D. LADURON et J. SOYER pour l'intérêt qu'ils ont manifesté tout au long de cette étude ainsi que pour le soin et l'attention avec lesquels ils ont bien voulu lire et corriger le manuscrit de cette note.

BIBLIOGRAPHIE

- AHRENS, L. H., 1954. — Lognormal distribution of the elements. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 5, pp. 49-73; 6, pp. 121-131.
- ANTHONY, L. M., 1967. — The Discovery of the Keystone Gold Mine, Cleary Hill Area, Fairbank District Alaska. A geochemical prospecting case history. In : E. M. CAMERON (Editor), Proceedings, Symposium on Geochemical Prospecting, Ottawa, April 1966. *Can., Dept. Mines Tech. Surv., Geol. Surv. Can., Paper 66-54* : pp. 3-12.

- ASSELBERGHS, E., 1946. — L'Éodévonnien de l'Ardenne et des régions voisines. *Mém. de l'Institut Géol. de l'Univ. de Louvain*, t. 14, 423 pp.
- BOYLE, R. W. and GARRETT, R. G., 1970. — Geochemical prospecting — A review or its status and future. *Earth-Sci. Rev.*, 6, pp. 51-75.
- DAHLBERG, E. C., 1969. — Use of model for relating geochemical prospecting data to geologic attributes of a region, South Mountain, Pennsylvania. International Geochemical Symposium; Colo. School Mines Quart., 64 (1), pp. 195-216.
- DELVIGNE, J., 1967. — Bilans géochimiques de l'altération des roches basiques en Côte d'Ivoire ferrallitique. *Rev. Geogr. Phys. et Géol. Dyn.*, 9, pp. 311-320.
- DELVIGNE, J. et MARTIN, H., 1970. — Analyse à la microsonde électronique de l'altération d'un plagioclase en kaolinite par l'intermédiaire d'une phase amorphe. *Cah. Orstom*, série Géol., vol. II, n° 2, pp. 259-295.
- DIXON, W. J. and MASSEY, F. J., 1957. — Introduction to statistical analysis. Mc Graw-Hill Cy. New-York, Toronto, London, 488 pp.
- HAWKES, H. E. and WEBB, J. S., 1962. — Geochemistry in Mineral Exploration. Harper and Row, New York, N. Y., 415 pp.
- LECOMTE, P., 1971. — Géochimie des éléments en traces dans les alluvions et les roches de la vallée de la Lomme (de Recogne à Grupont). Mémoire de Licence inédit, Faculté des Sciences, Université de Louvain, 73 pp.
- LEPELTIER, C., 1969. — A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Econ. Geol.*, 64, pp. 538-550.
- MARTIN, H. et LAUDELOUT, H., 1963. — Thermodynamique de l'échange des cations alcalins dans les argiles. *J. Chim. Phys.* 60, pp. 1086-1099.
- MATHERON, G., 1962. — Traité de Géostatistique Appliquée, tome 1 : Mémoire n° 14 du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Paris, 333 pp.
- PAQUET, H., 1970. — Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux à saisons contrastées. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr. Strasbourg*, n° 30, 212 pp.
- ROSE, A. W., DAHLBERG, E. C. and KEITH, M. L., 1970. — A multiple regression technique for adjusting background values in stream sediment geochemistry. *Econ. Geol.*, 65, pp. 156-165.
- ROUTHIER, P., 1963. — Les Gisements Métallifères. Masson, Paris, 2 t., 1282 pp.
- SONDAG, F., 1971. — Géochimie des éléments en traces dans les sols et les roches de la région de Bras (Serpont). *Mémoire de licence inédit*, Faculté des Sciences, Université de Louvain, 69 pp.
- TARDY, Y., 1969. — Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Strasbourg et Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr., Strassbourg, (à l'impression).
- TREUIL, M., FAUCHERRE, J. et MACQUAR, J. C., 1970. — Contribution à l'étude du comportement géochimique de quelques éléments métalliques dans la sédimentogenèse. *Mineral. Deposita*, 5, pp. 1-22.

DISCUSSION

M. J. MICHOT : Dans le graphique qui exprime le logarithme de la teneur en Cu des alluvions en fonction de la teneur moyenne en Cu des roches de chaque bassin versant correspondant, quatre points s'inscrivent nettement à l'écart des autres. Cette figuration ne pourrait-elle être liée au type de prélèvement des roches qui ont servi à l'étude, les processus d'altération aux affleurements n'ayant pas été pris en considération ?

Réponse : Certainement, c'est une hypothèse qui n'est pas à écarter. Elle s'ajoute à celles émises en faveur de la non représentativité des roches analysées pour le cuivre par rapport aux roches des même assises qui font partie des quatre bassins versants dont les alluvions représentatives ne suivent pas la corrélation stratigraphique.

Il sera tenu compte de cette remarque lors du nouvel échantillonnage des roches dans les deux assises concernées.

