

| | | | | |
|--|----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Bulletin de la Société belge de Géologie Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie | T. 92 V. 92 | fasc. 2 deel 2 | pp. 77 - 87 blz. 77 - 87 | Bruxelles 1983 Brussel 1983 |
|--|----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|

MODELE GENETIQUE ET INCIDENCE SUR LA PROSPECTION DES GITES Pb-Zn BELGES EN MILIEUX CARBONATES

par S. CAUET (+*) et D. WEIS (+**)

RESUME. - Un modèle génétique relatif aux minéralisations Pb-Zn-Ba des ensembles carbonatés dévoniens moyens-supérieurs et carbonifères inférieurs de la Belgique a été élaboré sur base d'une étude isotopique comparative du Pb des minéralisations et de celui des sédiments hôtes. Les considérations qui en découlent quant à la source des métaux, leur(s) mobilisation(s) et transport(s) par des fluides hydrothermaux montrent l'importance métallogénique des niveaux dévoniens moyens et supérieurs. Contrairement aux niveaux carbonifères inférieurs dont le potentiel métallifère semble exclusivement lié à des minéralisations épigénétiques filoniennes et associées, les niveaux dévoniens moyens et supérieurs sont susceptibles de contenir un potentiel syndiagénétique stratiforme.

ABSTRACT. - A general genetic model concerning Pb-Zn-Ba mineralizations of middle-upper Devonian and lower Carboniferous carbonate sediments from Belgium has been elaborated on a Pb isotopic comparative study of mineralizations and their enclosing rocks. The reflexion which proceeds on the metals source, their mobilization(s) and transport(s) by hydrothermal fluids indicates the metallogenic importance of the middle and upper Devonian levels. On the contrary to the lower Carboniferous sediments whose metalliferous potentiality seems to be exclusively related to epigenetic veins and associated mineralizations, the middle and upper Devonian levels are suitable to contain syndiagenetic stratiform mineralizations.

I. INTRODUCTION.

L'étude génétique des concentrations métallifères est généralement considérée comme un idéal de recherche fondamentale sans intérêt majeur pour l'exploration minière.

Ce sont les relations systématiques observées entre les gisements et leurs environnements rocheux (métallotectes physiques et chimiques) qui constituent avant tout des guides logiques en exploration; jusqu'à nos jours, rares sont les exemples pour lesquels l'étude génétique a vraiment contribué à la découverte de gisements.

L'épuisement général des ressources métallifères "faciles", c'est-à-dire relativement concentrées et superficielles, rend l'exploration de plus en plus contraignante; une meilleure définition des métalotectes locaux mais aussi des aires favorables à l'échelle régionale apparaît

nécessaire. Dans la mesure où il repose sur une argumentation valable, l'aspect génétique semble pouvoir y contribuer.

Nous tenterons d'illustrer l'incidence que peut avoir l'aspect génétique sur l'exploration dans le "petit" cadre d'une série de minéralisations plombo-zincifères affectant les milieux carbonatés dévono-dinantiens de nos régions.

Les résultats d'une étude isotopique comparative du plomb de ces minéralisations et de celui de leurs encaissements carbonatés ont permis de définir une série de contraintes fondamentales qui combinées et confrontées aux données gîtologiques traditionnelles et aux résultats d'autres études géochimiques récentes (inclusions fluides, isotopes du soufre, lithogéochimie, ...) permettent d'élaborer un modèle génétique général.

(+) Laboratoires Associés de Géologie-Pétrologie, Université Libre de Bruxelles.

(*) Aspirant F.N.R.S.

(**) Chargé de Recherches F.N.R.S.

2. ELABORATION DU MODELE GENETIQUE : PRINCIPES, METHODES ET IMPLICATIONS THEORIQUES SUR L'EXPLORATION MINIERE.

Les gîtes métallifères impliquant des fluides hydrothermaux peuvent être considérés comme l'aboutissement d'une série de processus plus ou moins longs et complexes qu'il conviendra de modéliser. Le modèle génétique doit répondre à une série de questions :

- d'où viennent les métaux, ou en d'autres termes, quelles sont leurs sources ?
- par quels mécanismes ont-ils été mobilisés de cette source ?
- quels sont les modes de transport et de concentrations des éléments vers des sites de dépôt favorables ?
- quels sont les mécanismes de dépôt ?

Bien que les problèmes de genèse des hydrocarbures ne soient pas entièrement comparables à ceux conduisant aux concentrations métallifères les notions bien connues de "roche mère" et de "piège" sont, dans le principe transposables à celles de "source" et de sites de dépôt". L'attention portée par l'exploration pétrolière à ces notions donne à penser qu'elles constituent également des facteurs importants pour l'exploration minière.

LA "ZONE SOURCE" DES METAUX.

La zone source apparaît difficile à définir car elle a inévitablement perdu, au moins partiellement, le potentiel métallifère qui la caractérise.

Il apparaît logique de concevoir que cette zone source a dû renfermer à l'état disséminé une quantité de métaux au moins égale à celle des gîtes et sera toujours beaucoup plus vaste que ces derniers. De plus, cette zone ne sera généralement pas contiguë aux gîtes dans la mesure où leurs environnements respectifs ont dû être soumis à des conditions physico-chimiques radicalement différentes favorisant d'une part la mobilisation des métaux et d'autre part leur précipitation.

L'étude du fond géochimique en roche constitue une approche classique pour la recherche de la zone source. Elle se heurte cependant à une interrogation : dans la mesure où la zone source a libéré au moins une partie de son potentiel métallifère, est-elle, pour les métaux considérés, plus riche ou appauvrie par rapport aux milieux rocheux environnants "normaux", en d'autres termes, faut-il rechercher des anomalies positives ou négatives ? Les phénomènes d'altération peuvent également avoir dispersé et atténué ces anomalies.

La géochimie isotopique du plomb constitue une autre approche particulièrement intéressante. Les compositions isotopiques du plomb peuvent être utilisées comme des traceurs indépendants des problèmes de concentrations envisagés plus haut et des phénomènes d'altération. La géochimie isotopique du plomb limitée à l'étude des compositions isotopiques des minéralisations

est couramment pratiquée. Elle constitue une approche indispensable dans la recherche des zones sources mais elle n'apporte généralement pas d'arguments capables de les définir précisément. Dans un contexte géologique régional défini, les compositions isotopiques du plomb des minéralisations peuvent être comparées :

- les minéralisations de compositions similaires ont vraisemblablement une source identique; la répartition spatiale de ces minéralisations et les métallotectes systématiquement associés reflètent l'échelle et la nature des processus métallogéniques impliqués;
- les minéralisations dont les compositions sont différentes ont vraisemblablement des sources différentes, dans le temps et/ou dans l'espace; certaines relations peuvent être interprétées en terme de mélange incomplet de différentes sources ou/et de remobilisations à partir d'une minéralisation pour en former une autre.

De nombreuses études, telles celles de WEDEPOHL *et al* (1978) pour des gisements européens, aboutissent à des conclusions sur l'âge (isochrone secondaire) du domaine crustal à partir duquel le plomb est dérivé par héritages et orogènes successives. Si ces considérations présentent un intérêt certain pour les modèles d'évolution continentale, elles ne concernent pas directement le métallogéniste soucieux de rechercher la zone source des gîtes la plus immédiate dans le temps et dans l'espace. En définitive, seules les études isotopiques comparatives du plomb des minéralisations et de celui des milieux rocheux plus ou moins proches constituant les sources hypothétiques des métaux peuvent apporter des arguments concrets sur les zones sources (DOE et DELEVAUX, 1972; BREVART *et al*, 1982; CAUET *et al*, 1982).

La définition des milieux rocheux constituant les sources possibles des métaux peut s'avérer utile à la prospection. Généralement trop éloignée des gisements, la source ne pourra servir à les localiser précisément; son utilité apparaît plutôt à l'échelle régionale pour orienter l'exploration. La reconnaissance des sources possibles au sein d'une région permettra de délimiter des aires de prospection en tenant compte de l'ampleur et des directions possibles des transports (circulations ascendantes, descendantes) vers les zones potentielles de dépôts.

MOBILISATION ET TRANSPORT.

Les problèmes de mobilisation et de transport, liaisons directes entre la source et les sites de dépôt, sont particulièrement difficiles à interpréter dans le cas des minéralisations dont la genèse implique des fluides hydrothermaux. Les idées des métallogénistes en la matière découlent en grande partie de l'observation et de l'étude des phénomènes actuels. Les caractéristiques des fluides sursaturés métallifères (Atlantis II, mer Rouge; Salton sea, Californie; Vallée du Mississippi, ...) ont été étudiées puis comparées à celles des inclusions fluides des minéralisations

(WHITE, 1968). La géochimie des isotopes stables a largement contribué à la détermination de l'origine des fluides (eau juvénile magmatique, connée, météorique, ...). L'étude de l'évolution physico-chimique des fluides au cours de la diagenèse des sédiments ou du lessivage des roches en général a pu rendre compte des processus de mobilisation des métaux (HANOR, 1974). Les moteurs responsables du déplacement des fluides vers les sites de dépôt ont pu être approchés grâce à l'étude de l'évolution des pressions et températures conditionnées par l'enfouissement et/ou l'activité magmatique.

L'utilisation directe des questions de mobilisation et de transport en exploration semble moins évidente dans la mesure où elles ne constituent que des processus transitoires laissant peu de traces.

LE DEPOT.

Les sites de dépôt constituent des pièges du fait de leur morphologie et des conditions physico-chimiques qui y règnent. Accessibles à l'observation, ils font l'objet d'une série d'études géologiques, minéralogiques et géochimiques; intégrées, ces études peuvent aboutir à la définition des conditions responsables du dépôt; elles sont quelquefois étayées par des expériences de laboratoire.

La définition des conditions de dépôt permet de comprendre le rôle, l'importance et la nécessité de certains métalotectes dans la formation des gîtes, d'où son intérêt certain pour l'exploration.

3. APPLICATION AUX MINERALISATIONS Pb-Zn-Ba BELGES EN MILIEU CARBONATE.

3.1. CADRE GEOLOGIQUE (fig. 1) ET HYPOTHESES GENETIQUES.

Les minéralisations Pb-Zn-Ba belges se rencontrent au niveau des terrains plissés du Dévonien et du Carbonifère. Le Cambro-Silurien n'est que très rarement minéralisé de même que les terrains de couverture horizontaux permians, mésozoïques et cénozoïques.

Les minéralisations les plus importantes sont liées à des failles subverticales dirigées N. N.W. - S. S.E. d'âge varisque ou post-varisque. Ces failles sont minéralisées à la traversée de deux grands ensembles carbonatés : le Dévonien moyen et supérieur (Couvinien, Givetien, Frasnien) et le Carbonifère inférieur (Dinantien). Elles sont rarement minéralisées au niveau du Famennien schistogréseux et du Houiller (de MAGNEE, 1967).

Dans le Synclinorium de Namur et de Herve, les failles sont abondamment minéralisées au niveau Dinantien (Vedrin, Hayes Monet, Engis, Neu Moresnet, Montzen, ...); elles le sont également au niveau des calcaires givetiens et frasniens que l'on retrouve à l'Est dans le Synclinorium de Herve (Breinigerberg, Daenz, ...) (GUSSONE, 1967). Les filons de ces Synclinoria peuvent se raccorder à des "amas couchés"; les

plus importants s'étendent généralement suivant le contact des calcaires francs et des calcaires dolomités qui constituent la partie basale de l'ensemble carbonaté dinantien, ou au sommet du calcaire sous les "shales" de base du Namurien. Le minerai consiste le plus souvent en une brèche d'éléments carbonatés plus ou moins silicifiés, cimentée par des sulfures concrétionnés (sphalérite, galène, marcasite en proportions parfois très variables). Selon BARTHOLOME et GERARD (1976), ces brèches ne résultent généralement pas de phénomènes tectoniques ou paléokarstiques, mais seraient plutôt dues à la dissolution des carbonates lors du passage des solutions hydrothermales. Dans le Synclinorium de Herve, certains minerais se caractérisent par une alternance centi- ou millimétrique de "schalenblende" beige à brun au sein de laquelle s'interstratifient des couches de marcasite et de la galène en plages polycristallines. De nombreux remplissages "karstiques", parfois récents, ont été reconnus à proximité des filons (BALCON, 1981). Les parties oxydées de certaines minéralisations peuvent être très importantes (amas calaminnaire de Moresnet). Les gisements de ces Synclinoria sont caractérisés par des minerais particulièrement riches et abondamment exploités autrefois.

Dans le Synclinorium de Dinant, les failles sont minéralisées exclusivement au niveau du Couvinien-Givetien et surtout Frasnien (Villers en Fagnes, Sautour, Vierves, Niverlée, Heure, Durbuy, ...). Elles recourent le bord sud du Synclinorium ou des anticlinaux secondaires à noyaux de calcaire givetien qui en accidentent la partie centrale. Aucun indice de minéralisation n'a été observé dans le Dinantien de ce Synclinorium (de MAGNEE, 1967). Les filons ne sont pas en relation avec des amas. Dans certains filons, la baryte et/ou la fluorine sont prépondérantes sur la galène, marcasite, sphalérite (Villers en Fagnes, Vierves, Ave et Auffe).

La genèse des minéralisations filoniennes de ces différents Synclinoria a fait l'objet d'hypothèses impliquant d'abord l'hydrothermalisme magmatique et plus récemment des processus en milieu sédimentaire. L'hypothèse magmatique faisant appel à une hypothétique activité post-varisque a été fréquemment avancée (FOURMARIER, 1934). Elle semble de plus en plus difficile à soutenir dans la mesure où une telle activité n'a jamais été décelée en dépit de sondages profonds (de MAGNEE, 1967). Conjointement au développement de la géochimie, une prise de conscience générale du rôle métallogénétique possible des milieux sédimentaires est apparue peu à peu; par le biais de ces hypothèses génétiques relatives aux minéralisations Pb-Zn-Ba belges, de MAGNEE (1967) fut un des précurseurs en ce sens. Le schéma génétique qu'il a établi peut se résumer ainsi : les métaux disséminés au sein des ensembles sédimentaires au sens large ont été mobilisés à l'intervention de fluides d'origine météorique principalement et éventuellement connée. Devenant de plus en plus salins et métallifères, ces fluides hydrothermaux circulent au travers de paléocircuits dont les drains principaux sont constitués par les failles. Le dépôt des métaux s'y effectue; comme BARTHOLOME et GERARD (1976)

MINÉRALISATIONS Pb Zn PRINCIPALES ET CARACTÉRISTIQUES EN ENVIRONNEMENTS CARBONATÉS.

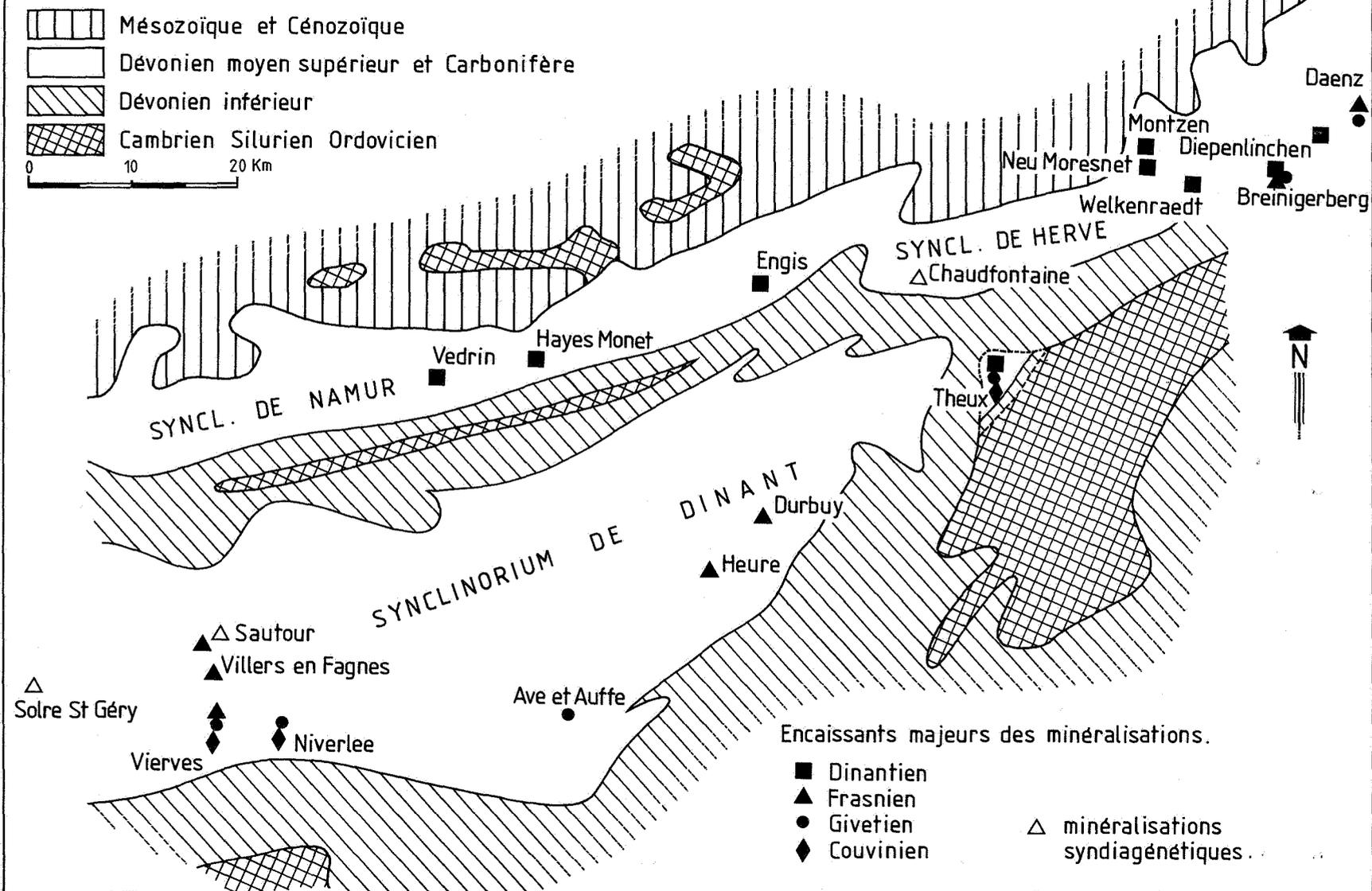


Fig. 1 - Cadre géologique général des minéralisations Pb-Zn-Ba étudiées.

le précisent, la libération du gaz dissous constitue probablement un facteur de précipitation. Le caractère salin des fluides a été mis en évidence par les études d'inclusions fluides (SMITH and HIRST, 1974; DARIMONT et COIPEL, 1982); la répartition des températures d'homogénéisation au sein de ces inclusions semble très complexe tout en ne dépassant pas 300°C. L'étude du fractionnement des isotopes du soufre entre différents sulfures cogénétiques peut donner une indication indirecte sur la température de formation compatible avec celle des inclusions fluides (HERBOSCH *et al.*, 1982). Le problème de la source des métaux est plus critique. La rareté des indices Pb-Zn-Ba dans le Cambro Silurien et le Dévonien inférieur détritique conduit à rejeter ces formations en tant que sources les plus directes dans le temps et dans l'espace; il convient plutôt de rechercher les sources directes dans les ensembles carbonatés, et éventuellement détritiques, dévoniens et carbonifères, constituant les sédiments hôtes des minéralisations. D'autres hypothèses invoquant des sécrétions latérales à partir des sédiments adjacents aux failles ou des circulations descendantes (remplissage par le haut) sont avancées mais n'ont jamais été développées ni argumentées.

Des minéralisations d'apparence stratiformes s'observent dans divers épisodes carbonatés du Dévonien moyen et supérieur (Chaudfontaine, Solré St-Géry, Sautour, ...). La minéralisation de Chaudfontaine, constituée essentiellement de barytine se situe dans le Frasnien supérieur du Synclinorium de Herve; elle semble associée à un faciès d'arrière récif; de nombreuses observations géologiques, pétrographiques (DEJONGHE, 1979) étayées par des études géochimiques (DEJONGHE *et al.*, 1982) suggèrent une origine diagénétique précoce. Les minéralisations de Solré St-Géry et de Sautour sont constituées de mouchetures ou nodules de sphalérite et galène au sein de dolomies grossières appartenant à un niveau bien défini du Frasnien inférieur du Synclinorium de Dinant (BALCON, 1981); les sulfures semblent contemporains de la dolomitisation qui affecte des dépôts récifaux, une origine diagénétique est très probable. La minéralisation de Membach, mal connue, pourrait avoir une origine plus ou moins comparable dans le Givetien supérieur du Synclinorium de Herve.

3.2. GEOCHIMIE ISOTOPIQUE.

3.2.1. Approche théorique de l'étude.

La démarche relative à cette étude isotopique comparative du Pb des minéralisations et de celui de leurs encaissants carbonatés comporte plusieurs phases successives (CAUET *et al.*, 1982) que l'on peut résumer de la façon suivante.

La première phase consiste à mettre en évidence, au sein de la région investiguée, les minéralisations "consanguines", c'est-à-dire dont les compositions isotopiques du Pb sont similaires et proviennent dès lors vraisemblablement d'une source identique. L'examen de la typologie, de la répartition stratigraphique et structurale de ces minéralisations peut apporter alors des indications quant à l'échelle des processus métallogéniques à envisager.

La deuxième phase consiste à définir les zones sources possibles du Pb en comparant le Pb des minéralisations et celui des sédiments sources hypothétiques. A la différence des compositions isotopiques du Pb des galènes des minéralisations gelées au moment de la formation de ces dernières, celles du Pb disséminé dans les sédiments évoluent jusqu'à nos jours suite à la désintégration de l'U et du Th présents dans le sédiment. La composition isotopique du sédiment mesurée aujourd'hui est celle du Pb commun de l'environnement sédimentaire au moment du dépôt, auquel s'ajoute le Pb radiogénique provenant de la désintégration de l'U et du Th incorporés lors du dépôt. Cette désintégration in situ peut prendre des proportions non négligeables dans le cas notamment de sédiments d'âge paléozoïque. L'étude des filiations isotopiques du Pb entre sédiments et minéralisations nécessite dès lors la détermination de la composition isotopique du Pb des sédiments à l'époque de leur formation ou éventuellement de la mise en place des minéralisations. Rechercher ces compositions initiales peut se faire en corrigeant les compositions isotopiques mesurées en fonction de l'intervalle de temps considéré et de leurs teneurs en Pb et U :

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}_{\text{initial}} = \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}_{\text{mesuré}} - \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} \left(e^{\lambda_{238} t} - 1 \right)$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}_{\text{initial}} = \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}_{\text{mesuré}} - \frac{1}{137.88} \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} \left(e^{\lambda_{235} t} - 1 \right)$$

$$\lambda_{238} = 1.55125 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

$$\lambda_{235} = 9.8485 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

constantes de désintégration pour ^{238}U et ^{235}U (JAFNEY *et al.*, 1971)

Ces corrections sont soumises à des incertitudes car il est possible que les rapports U/Pb des sédiments aient été modifiés après leur formation suite à des migrations différentielles de ces éléments; la mobilité de l'U dans les conditions oxydantes de surface est particulièrement importante. Vu la prépondérance de l' ^{238}U par rapport à l' ^{235}U (rapport actuel : $\frac{1}{137.88}$),

les corrections et, par conséquent les incertitudes associées, seront beaucoup plus importantes pour les rapports

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \text{ que pour } \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$$

Indépendamment de ces incertitudes liées aux corrections, un doute peut également exister quant à l'origine du Pb analysé : est-il propre au sédiment, c'est-à-dire acquis lors de la sédimentation, ou correspond-il à une faible auréole de dispersion liée à la mise en place des minéralisations plus ou moins proches.

Devant ces incertitudes, il a paru intéressant d'étudier la composition isotopique du Pb dans des minéraux synsédimentaires dont la concentration en U est suffisamment faible que pour négliger l'influence de sa désintégration sur la composition isotopique du plomb. Les pyrites synsédimentaires, relativement fréquentes au sein des sédiments en question, répondent à ces conditions; leur composition isotopique représente donc théoriquement celle des environnements sédimentaires à l'époque de leur formation. La comparaison des compositions isotopiques du Pb de ces pyrites et de celles des minéralisations couplées à celles des roches totales corrigées permet de définir quels sont les sédiments qui représentent des sources potentielles : l'évolution isotopique se faisant toujours dans le sens d'une augmentation des rapports isotopiques, seuls les sédiments dont les Pb initiaux ont des rapports isotopiques moins élevés ou comparables à ceux du Pb des minéralisations constituent des sources possibles.

Dans une troisième phase, des considérations relatives aux processus de transport du Pb entre les sources possibles et les concentrations minérales peuvent être déduites des différences isotopiques entre le Pb initial de la source et celui des minéralisations.

3.2.2. Résultats et interprétation (fig. 2)

L'étude de la composition isotopique du Pb des galènes des minéralisations filoniennes montre que la quasi totalité de ces dernières affectant les sédiments carbonatés du Dévonien moyen, supérieur et du Carbonifère inférieur des Synclinoria de Namur, Herve et Dinant possèdent des rapports isotopiques voisins oscillant autour de 18.40 pour le rapport

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \text{ et } 15.60 \text{ pour le rapport } \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$$

Cette similitude peut être interprétée en terme de dérivation à partir d'une zone source bien définie, isotopiquement homogène, ou plus vraisemblablement en terme de

brassage à partir de différentes zones sources. Le fait que des minéralisations filoniennes localisées au sein de terrains d'âges différents possèdent des plombs ayant une même origine reflète l'ampleur du phénomène métallogénique et apporte un argument de poids en faveur de la théorie des circulations hydrothermales. Il apparaît en effet difficile de pouvoir rendre compte de cette similitude par des sécrétions latérales ou des remplissages de fractures par le haut ne faisant intervenir que des zones sources proches et spécifiques à chaque minéralisation.

L'étude de la composition isotopique du Pb en trace dans les sédiments hôtes montre, par la similitude des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, qu'une filiation entre les Pb de certains sédiments et celui des minéralisations est possible (fig. 2). L'incertitude associée à la correction des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ne permet malheureusement pas de préciser ces filiations.

Par rapport aux Pb des minéralisations, les Pb des pyrites synsédimentaires extraites des sédiments givetiens, frasniens ont des compositions légèrement moins radiogéniques ou semblables, tandis que, au contraire, les Pb des pyrites synsédimentaires issues des sédiments dinantiens ont des compositions plus radiogéniques (fig. 2). Suivant le schéma génétique invoquant une mobilisation à partir des sédiments, le Pb initialement incorporé dans le sédiment subira une évolution isotopique fonction de la durée de son séjour dans le sédiment avant sa mobilisation, de son transport vers le site de dépôt et des concentrations relatives en Pb et U des milieux correspondants. Cette évolution qui se traduit par un enrichissement en isotopes radiogéniques 206 , 207 , 208 n'est dès lors possible qu'à partir des Pb initiaux des sédiments givetiens frasniens. Les zones sources principales du Pb doivent se trouver au sein de ces étages. Par contre, les sédiments dinantiens ne peuvent constituer des zones sources à part entière; seul un mélange avec les zones sources principales est a priori possible. Les Pb des minéralisations diagénétiques givetiennes frasniennes sont comparables aux Pb des pyrites synsédimentaires des mêmes niveaux; les minéralisations diagénétiques apparaissent donc en quelque sorte comme des expressions locales d'un potentiel métallifère lié aux sédiments.

Les Pb initiaux des sédiments sources ne sont que légèrement moins radiogéniques que ceux des minéralisations; en d'autres termes, l'évolution isotopique n'a pas dû être importante depuis la formation des sédiments jusqu'à la formation des minéralisations. Différentes hypothèses, schématiques, sur les mobilisations et transports des métaux ont été confrontées à ce fait.

- Hypothèse de la sécrétion à partir des sédiments proches des filons.

Ces sécrétions n'ont évidemment pu se faire qu'après la formation des fractures réceptrices lors de l'orogénèse varisque ou même postérieurement (Permo-Trias). Avant de s'y concentrer, le Pb en trace

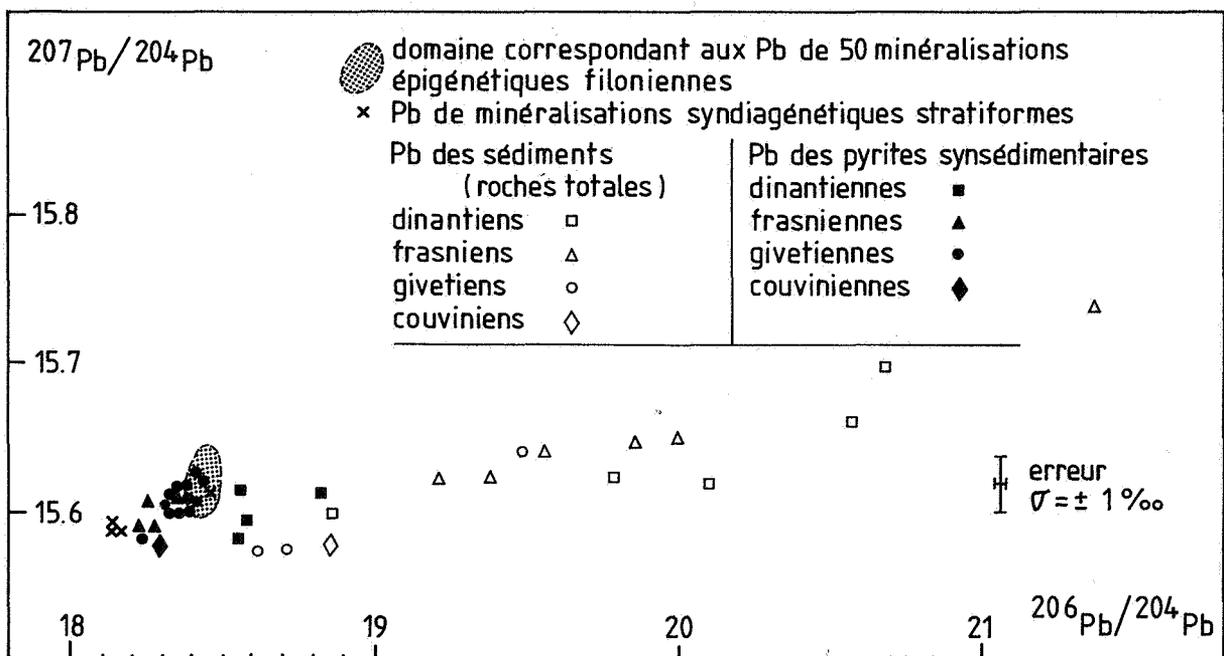


Fig. 2 - Diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: comparaison entre les compositions isotopiques du plomb des minéralisations, des pyrites syngénétiques et des sédiments encaissants.

au sein des sédiments dévoniens moyens à supérieurs aurait subi une évolution isotopique plus ou moins importante selon les teneurs relatives en U et en Pb de ces sédiments. Si l'on prend ces teneurs moyennes en U et Pb pour les sédiments carbonatés respectivement égales à 2 ppm (ROGERS et ADAMS, 1968) et 5 ppm (WEDEPOHL, 1974), l'évolution isotopique du Pb depuis le Dévonien moyen à supérieur jusqu'au Permo Trias conduirait à des rapports isotopiques $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ beaucoup plus élevés que ceux mesurés pour les minéralisations. Pour obtenir une valeur similaire à celle des minéralisations, il faudrait des teneurs en Pb proches de 50 ppm. Au delà de ce problème, l'évolution isotopique différentielle d'un sédiment à l'autre caractérisé par des valeurs du rapport U/Pb différentes ne pourrait rendre compte de la similitude des compositions isotopiques des minéralisations.

- Hypothèse d'une mobilisation et d'un transport par des fluides d'origine météorique.

Cette hypothèse est confrontée de la même manière que celle de la sécrétion au problème des teneurs relatives en U et Pb dans les sédiments, en effet, le régime normal des circulations météoriques et par conséquent la mobilisation n'aurait pu débiter qu'après la formation du relief à l'orogénèse. Les circulations à grande échelle permettraient cependant d'expliquer les similitudes isotopiques des minéralisations.

- Hypothèse d'une mobilisation et d'un transport par des fluides d'origine connue.

Cette hypothèse peut être compatible avec les résultats isotopiques et des teneurs "normales" en U et Pb pour les sédiments dans la mesure où le Pb serait incorporé de façon précoce dès la diagenèse dans un fluide métallifère devenant rapidement

beaucoup plus riche en Pb relativement à l'U.

En conclusion, les résultats de cette étude apportent une série de contraintes pour établir un modèle génétique :

- la quasi-totalité des minéralisations filoniennes affectant les sédiments carbonatés du Dévonien moyen, supérieur et du Carbonifère inférieur des différents Synclinoria de Dinant, Namur, Herve résulte de processus métallogéniques à grande échelle; l'origine du Pb est identique;
- les zones sources principales du Pb peuvent être liées aux sédiments carbonatés du Dévonien moyen et supérieur mais non à ceux du Carbonifère inférieur;
- seules les mobilisations du Pb des sédiments et des circulations à grande échelle sont envisageables; la sécrétion du Pb à partir d'environnements restreints et proches des minéralisations paraît peu probable;
- la mobilisation et le transport du Pb par des fluides d'origine météorique ne sont possibles qu'à partir de sédiments anormalement riches en Pb (teneurs proches de 50 ppm), impliquant une préconcentration;
- des fluides d'origine connue peuvent avoir mobilisé et transporté le Pb à partir de sédiments aux teneurs "normales" en cet élément.

3.3. MODELE GENETIQUE GENERAL (Fig. 3).

La gîtologie (de MAGNEE, 1967; BARTHOLOME et GERARD, 1976) et les inclusions fluides (SMITH et HIRST, 1974; DARIMONT et COIPEL, 1982; DEJONGHE *et al.*, 1982) démontrent clairement l'origine hydrothermale des minéralisations qui nous concernent. Bien que très importantes du point de vue de l'exploitabilité, la formation des chapeaux de fer et les remobilisations superficielles locales parfois récentes (BALCON, 1981) à partir de ces minéralisations

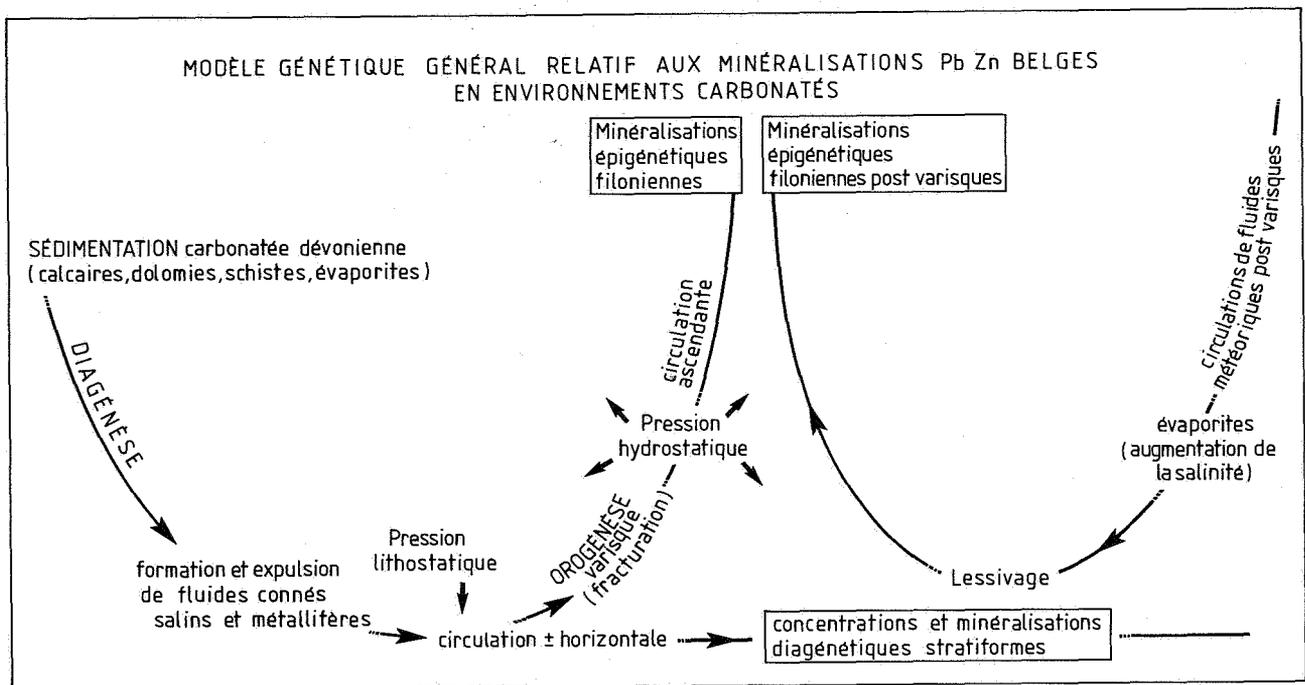


Fig. 3 - Schéma du modèle génétique général.

sortent du cadre du modèle.

Le modèle a été élaboré en confrontant les contraintes isotopiques aux théories métallogéniques générales bien établies ainsi qu'aux données géologiques régionales, gîtologiques et géochimiques; il tente de considérer les zones sources des métaux, leurs modes de mobilisation, de transport et dans une moindre mesure, les dépôts.

Zones sources des métaux.

Les zones sources des métaux sont principalement associées aux ensembles carbonatés dévoniens moyens et supérieurs, les ensembles carbonifères peuvent constituer une source complémentaire mais non à part entière. Les anomalies géochimiques en roches, indices et minéralisations diagénétiques observées dans certains niveaux du Dévonien moyen et supérieur des Synclinoria de Dinant et Herve* et l'absence d'occurrence significative de ce genre dans le Carbonifère inférieur (SWENNEN *et al.*, 1982) sont en accord avec ces résultats; les anomalies peuvent être considérées comme des traces résiduelles ou "épargnées" d'un potentiel métallifère propre aux sédiments, les indices et les minéralisations comme des concentrations locales de ce potentiel vraisemblablement formées lors de la diagenèse.

Mobilisation(s) et transport(s)

La formation des indices et/ou minéralisations diagénétiques ne peut se

concevoir que par l'intermédiaire de fluides d'origine connue formés lors de la diagenèse des sédiments sources argilo-carbonatés; la formation des minéralisations épigénétiques peut a priori être également liée à de tels fluides ou au lessivage par des fluides d'origine météorique de sédiments préconcentrés en métaux.

Comme il a été clairement observé pour les sédiments argilo-carbonatés récents (HANOR, 1974), la diagenèse s'accompagne d'une élévation de la température, salinité et teneurs en métaux des fluides connés qui représentent de l'ordre de 20% du volume total des sédiments.

Les températures de formation des minéralisations en question manifestement inférieures à 300°C (DARIMONT et COIPEL, 1982) sont compatibles avec celles observées lors de l'enfouissement, de la diagenèse des sédiments récents. La salinité des fluides peut s'expliquer par la présence au sein des sédiments sources de minéraux argileux et de nombreux indices évaporitiques récemment mis en évidence (BLESS *et al.*, 1980) : les niveaux argileux peuvent, lors de la compaction, agir comme des membranes semi perméables qui laissent passer les molécules non chargées comme H₂O et retiennent les ions dans le fluide résiduel; les évaporites sont facilement dissoutes lors de la compaction (WHITE, 1968). Les teneurs en métaux peuvent être attribuées à la déstabilisation de certains minéraux argileux concentrant le Pb et Ba en particulier (HANOR, 1974), et plus généralement au simple lessivage des matériaux sédimentaires par un fluide salin (WHITE, 1968).

L'expulsion du fluide est liée à la réduction de la porosité des sédiments, lors de la compaction et éventuellement à des instabilités gravitationnelles; ces dernières apparaissent au delà d'un certain

* Minéralisations de Chaudfontaine, indices et anomalies du même niveau stratigraphique (DEJONGHE, 1979); minéralisations de Solré St-Géry, Sautour (BALCON, 1981); indices liés à des structures récifales à Frasnes (PEL et MONSEUR, 1979); anomalies et indices de Heure (DEJONGHE et DEWALQUE, 1981).

seuil où la température du fluide (à laquelle la densité est inversement proportionnelle) anihile les effets de la profondeur et de la salinité (avec lesquels la densité croît) (HANOR, 1974).

La migration des fluides se fait à sens unique vers les niveaux les plus perméables et du fait de la pression lithostatique subie, plus ou moins horizontalement. A ce stade, une partie du fluide va rencontrer des sites favorables de dépôt (milieux confinés, etc...) et engendrer des minéralisations diagénétiques concordantes (stratiformes); une autre partie du fluide reste en circulation jusqu'à l'apparition des mouvements tectoniques varisques dont on peut situer le paroxysme au Westphalien (MICHOT, 1980) : après une série de déformations plastiques des sédiments, des fractures apparaissent, mettent le fluide en contact avec l'extérieur, donc sous un régime de pression hydrostatique; la pression hydrostatique étant beaucoup moins élevée que la pression lithostatique subie antérieurement, une dépression est créée, et la progression du fluide acquiert une composante ascendante. La rencontre de sites favorables de dépôt à différents niveaux lors de la remontée dans les fractures (encaissants carbonatés, discontinuités lithologiques) engendre des minéralisations épigénétiques discordantes (filoniennes avec amas, éventuels).

Ce processus génétique ne nécessite aucun apport de matières ou de forces étranger à l'évolution propre du bassin sédimentaire de la diagenèse à l'orogénèse; il rend compte de la formation des minéralisations diagénétiques et des minéralisations épigénétiques liées aux fractures varisques. La formation des minéralisations épigénétiques rhénanes post-varisques, comme dans la partie orientale du Synclinorium de Herve (Montzen, Neu Moresnet, Daenz, Diepenlinchen, ...) impliquent un processus complémentaire. En effet, comme le souligne VANDENVEN (1976), les fractures transversales minéralisées du Synclinorium de Dinant peuvent être considérées comme le reflet de bandes de terrains intensément fissurés par les diaclases normales à la direction axiale des plissements varisques alors que les fractures transversales de la partie orientale du Synclinorium de Herve sont postérieures aux mouvements varisques et liées aux mouvements rhénans. Il n'est évidemment pas concevable que les fluides hydrothermaux d'origine connée puissent avoir été préservés jusqu'à l'apparition de ces fractures transversales rhénanes alors que les multiples fractures varisques, notamment longitudinales de charriage constituaient des exutoires certains. La formation des minéralisations liées aux fractures transversales tardives de la partie orientale du Synclinorium de Herve semble donc devoir faire appel à des fluides post-varisques d'origine nécessairement météorique. De tels fluides ont dû acquérir leur salinité par une interaction avec des évaporites (HANOR, 1974), probablement abondantes comme le montrent les nombreux indices mis en évidence dans les sédiments carbonatés du Dévonien moyen, supérieur et du Carbonifère inférieur (BLESS *et al.*, 1980).

La contrainte isotopique liée aux fluides d'origine météorique implique le

lessivage de préconcentrations en métaux; ces préconcentrations, pas nécessairement exprimées sous forme de minéralisations, pourraient avoir été formées lors de diagenèse des sédiments au Dévonien moyen et supérieur.

Dépôt(s)

En ce qui concerne les minéralisations diagénétiques stratiformes, la détermination des conditions de piégeage, de concentration et de dépôt des métaux au sein des environnements sédimentaires constitue un problème complexe. D'une façon générale, les séries condensées, les milieux confinés ou les dolomitisations précoces constituent des métallotectes (DEJONGHE, 1979; BALCON, 1981).

Pour les minéralisations épigénétiques filoniennes, la détermination des conditions de dépôt indique de basses températures (DARIMONT et COIPEL, 1982) (300°C). Selon de MAGNEE (1967) et BARTHOLOME et GERARD (1976), les conditions de dépôt seraient réductrices et les gaz dissous notamment le CO₂, pourraient jouer un rôle dans la précipitation des métaux sous forme de sulfures. Le rôle du soufre lors du dépôt n'est cependant pas déterminé; son origine réside probablement dans la réduction des sulfates marins précipités au Dévonien moyen, supérieur et au Carbonifère inférieur.

Les métallotectes liés à ces minéralisations épigénétiques filoniennes sont relativement bien connus (de MAGNEE, 1967; DEJONGHE, 1982); il s'agit des failles transversales, des contacts lithologiques marqués ...

3.4. CONCLUSIONS ET IMPLICATION POUR LA PROSPECTION.

Le modèle génétique général établi implique des fluides d'origine connée, formés lors de la diagenèse des sédiments argilo-carbonatés du Dévonien moyen à supérieur principalement, pour expliquer la formation des minéralisations diagénétiques stratiformes et des minéralisations épigénétiques liées aux fractures varisques (Synclinorium de Dinant); des circulations de fluides d'origine météorique devenus salins par interactions avec des évaporites ont pu lessiver des préconcentrations d'origine syndiagenétique et former les minéralisations épigénétiques liées aux fractures rhénanes post-varisques (partie orientale du Synclinorium de Herve).

Ce modèle rend compte de l'existence potentielle de minéralisations diagénétiques stratiformes au niveau du Dévonien moyen et supérieur ainsi que de la présence de minéralisations épigénétiques filoniennes au niveau du Dévonien moyen supérieur et du Carbonifère inférieur. Le Carbonifère inférieur ne semble pouvoir receler que ces minéralisations épigénétiques filoniennes. Ces résultats sont en accord avec la distribution des occurrences stratiformes et filoniennes connues.

Ce modèle est donc susceptible d'orienter l'exploration des minéralisations diagénétiques stratiformes à grande échelle.

Ces minéralisations ont, relativement aux minéralisations épigénétiques filoniennes, plus de chance d'être exploitables eu égard à leur étendue. Au delà de cette orientation à grande échelle de l'exploration, il est toujours impératif, à partir des occurrences connues, d'étudier ou de préciser les métallotectes nécessaires et suffisants pour engendrer des concentrations significatives.

REMERCIEMENTS.

Une partie de ce programme de recherche a fait l'objet d'un financement CEE (contrat 110-79-7 MPPB) - SPPS (MP/CE/6).

Les auteurs bénéficient de bourses de recherche du Fonds National de la Recherche Scientifique, S. CAUET, en tant qu'Aspirant et D. WEIS en tant que Chargé de Recherches.

Les mesures isotopiques ont été réalisées à l'Université Libre de Bruxelles sur les spectromètres de masse du Centre belge de géochronologie.

BIBLIOGRAPHIE.

- BALCON, J. (1981) - Quelques idées sur les minéralisations plombo-zincifères dans les formations carbonatées en Belgique. *Bull. Soc. belge de Géologie*, T. 90, fasc. 1, 9-39.
- BARTHOLOME, P. et GERARD, E. (1976) - Les gisements plombo-zincifères de la région d'Engis, province de Liège, Belgique. *Ann. Mines de Belgique*, n°11, 901-917.
- BLESS, M. J. M., BOUCKAERT, J. and PAPROTH, E. Eds (1980) - Pre-Permian around the Brabant Massif in Belgium, the Netherlands and Germany. *Med. Rijks Geol. Dienst*, 32-1/14, 1-179.
- BREVART, O., DUPRE, B. and ALLEGRE, C. J. (1982) - Metallogenic Provinces and the Remobilization Process studied by Lead Isotopes: Lead-Zinc Ore Deposits from the Southern Massif Central, France. *Econ. Geol.*, vol. 77, n°3, 564-575.
- CAUET, S., WEIS, D. and HERBOSCH, A. (1982) - Genetic study of Belgian lead zinc mineralizations in carbonate environments through lead isotopic geochemistry. *Bull. B.R.G.M. (2), section II*, n°4, 329-341.
- DARIMONT, A. et COIPEL, J. (1982) - Dispersion des températures d'homogénéisation des inclusions aqueuses - ébullition ou division par étranglement. *Chem. Geol.*, 37, 151-163.
- DEJONGHE, L. (1979) - Discovery of a sedimentary Ba (Fe, Zn, Pb) ore body of frasnian age at Chaudfontaine, Province de Liège, Belgium. *Mineral. Deposita (Berl)*, vol. 14, 15-20.
- DEJONGHE, L. et DEWALQUE, L. (1981) - Pétrologie et géochimie du filon sulfuré de Heure (Belgique) du chapeau de fer associé et de l'encaissant carbonaté. *Bull. BRGM (2), section II*, n°3, 165-191.
- DEJONGHE, L., RYE, R.O. and CAUET, S. (1982) - Sulfur isotopes of barite and lead isotopes of galena from the stratiform deposit in frasnian carbonate and shale host-rocks of Chaudfontaine (Province of Liège, Belgium). *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 105, 97-103.
- DEJONGHE, L., GUILHAUMOU, N. et TOURAY, S. C. (1982) - Les inclusions fluides de la barite du gisement sédimentaire de Chaudfontaine (Province de Liège, Belgique). *Bull. Soc. belge de Géologie*, t. 91, fasc. 2, 79-85.
- DEJONGHE, L. et JANS, D. (1982) - Typologie des gisements Pb Zn (F-Ba) du district métallogénique du Synclinorium de Herve. *Symposium Cttes filoniens de basse température du domaine varisque d'Europe et d'Afrique du Nord, Orléans 82, abstract.*
- DOE, B.R. and DELEVAUX, M.H. (1972) - Source of lead in southeast Missouri galena ores. *Econ. Geol.*, vol. 67, n°4, 409-425.
- FOURMARIER, P. (1934) - Le problème des gisements filoniens de la Belgique. *Revue Univ. des Mines, Liège*, n°10, 202-208.
- GUSSONE, R. (1967) - Mitteilungen über die Blei-Zinc-Erzlagerstätten der umgebung von Aachen Stolberg (Köln), Der Minister Präsident des Landes Nordrhein Westfalen - Landesamt für Forschung). *Jahrbuch 1967*, 139-157.
- HANOR, J. S. (1974) - The sedimentary genesis of hydrothermal fluids. In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, H.L. Barnes, ed. New York, 137-172.
- HERBOSCH, A., CAUET, S. et PREAT, A. (1982) - Recherche de métallotectes nouveaux de nature géochimique en milieu carbonaté. *Rapport d'une recherche financée par la CEE (contrat 110-79-7MPPB) et le SPPS (contrat MP/CE/6)*.
- JAFFEY, A. H., FLYNN, K. F., GLENDENIN, L. E., BENTLEY, W. C. and ESSLING, A. M. (1971) - Precision measurement of the half lives and specific activities of ²³⁵U and ²³⁸U. *Phys. Rev. C*, 4, 1889-1906.
- de MAGNEE, I. (1967) - Contribution à l'étude génétique des gisements de plomb, zinc et barytine. In: *Genesis of stratiform lead-zinc-barytine deposits (J.S. Brown, Ed.) Econ. Geol. Mon 3*, 255-266.
- MICHOT, P. (1980) - Belgique. Introduction à la géologie générale. *26e Congrès Géologique International, Paris*, vol. C 16, 89 p.
- PEL, J. et MONSEUR, G. (1979) - Minéralisations de galènes et de pyrites dans le récif F₂h du Frasnien de Frasnes (Belgique). *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 101, 389-397.
- ROGERS, J. S. and ADAMS, J.A.S. (1968) - Uranium. In: *Wedepohl K. H. (Ed.) Handbook of Geochemistry*, vol. II/3, Springer-Verlag, Berlin.

- SMITH, F. W. and HIRST, D. M. (1974) - Analysis of trace elements and fluid inclusions in fluorite from the Ardennes massif. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 97, 281-285.
- SWENNEN, R., VAN ORSMAEL, J., JACOBS, L., OPDEBEECK, K., BOUCKAERT, J. and VIAENE, W. (1982) - Dinantian sedimentation around the Brabant Massif, Sedimentology and geochemistry. In *"The Pre-Permian around the Brabant Massif"*; *Publ. Natuurk. Gen. Limburg*, XXXII, 1-4, p. 16-23, 64-69.
- VANDENVEN, G. (1977) - Les Ardennes belges vues par le satellite ERTS-1 (LANDSAT-1). *Bull. Soc. belge de Géologie*, T. 86, fasc. 1, 51-56.
- WEDEPOHL, K. H. (1974) - Lead. In : *Wedepohl K.H. (Ed.) Handbook of Geochemistry*, vol. II/3, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- WEDEPOHL, K. H., DELEVAUX, M.H. and DOE, B.R.(1978) - The potential source of lead in the Permian Kupferschiefer bed of Europe and some selected Paleozoic mineral deposits in the Federal Republic of Germany. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 65, 273-281.
- WHITE, D. E. (1968) - Environments of generation of some base-metal ore deposits. *Econ. Geol.* 63, 4, 301-335.

Communication présentée à la
séance du 8 mars 1983.

Ciments d'Obourg s.a.

Ciments Portland à la pouzzolane PPz30

Ciments Portland P 40, P 50.

Ciments de haut fourneau HL 30, HK 40.

Concassés calcaires secs et lavés de tous calibres.

Sables spéciaux pour constructions.

Sables de concassage et fillers pour routes.

Mélanges spéciaux pour fondations de routes (graves laitier
(graves chlorure

Chaux hydraulique artificielle.

Administration centrale et direction générale

7048 OBOURG