

# Quelques exemples récents des apports de l'hydrogéologie à la métallogénie des gîtes métallifères

Jacques AVIAS \*

## RESUME

*Le rôle des eaux dans les processus de concentration gîtogènes a pu, grâce à l'application de ses principes fondamentaux et grâce aux progrès récents de l'Hydrogéologie, être précisé ces dernières années. Ce rôle est alors apparu comme pouvant être, dans de nombreux cas, beaucoup plus étendu qu'on ne l'imaginait jusqu'alors. Des hypothèses génétiques nouvelles ont pu être avancées ou démontrées et des champs de recherche nouveaux se sont récemment ouverts.*

*Une série d'exemples est donnée appuyant ce point de vue, notamment concernant les corrélations entre les processus métallogéniques et :*

- *les différences de perméabilité et de porosité, la drainance des eaux à travers les couches dites imperméables (notamment pour l'Uranium, le Pb et Zn) ;*
- *les gradients hydrauliques, thermiques, de concentration ionique, les phénomènes de diffusion capillaire, etc. ;*
- *la circulation des eaux sursalées chlorurées ou sulfatées provenant d'évaporites ou de la compaction de sédiments argileux ;*
- *l'intervention d'agents réducteurs (hydrocarbures, H<sub>2</sub>S d'origine biochimique, etc.) ;*
- *le contexte géologique et géochimique intégré allant des phénomènes nanotectoniques ou microsédimentologiques jusqu'aux phénomènes globotectoniques ou à l'échelle des grands bassins sédimentaires.*

## SAMENVATTING

*Dank zij de toepassing van zijn fundamentele principes en de recente vooruitgang van de Hydrogeologie, kon de rol van de wateren in de afzettingvormende concentratieprocessen worden gepreciseerd. Deze rol bleek dan in vele gevallen veel uitgebreider te kunnen zijn dan men zich voordien voorstelde. Nieuwe genetische hypothesen konden worden naar voren gebracht of aangetoond en onlangs openden zich nieuwe onderzoekvelden.*

*Er wordt een reeks voorbeelden aangehaald die dit standpunt steunen, onder meer betreffende de onderlinge betrekkingen tussen de metallogenische processen en :*

- *de permeabiliteit- en porositeitverschillen, de waterafvoer doorheen zogenaamde ondoordringbare lagen (onder meer voor uranium, Pb en Zn) ;*
- *de hydraulische en thermische gradiënten, de ionconcentratiegradiënten, de verschijnselen van capillaire diffusie, enz. ;*
- *de circulatie van oververzoute gechlorideerde of gesulfateerde wateren voortkomende van evaporieten of van de verdichting van kleiachtige sedimenten ;*
- *het optreden van reducerende agenten (koolwaterstoffen, H<sub>2</sub>S van biochemische oorsprong, enz.) ;*
- *de geïntegreerde geologische en geochemische contexten gaande van nanotektonische of microsédimentologische verschijnselen tot globotektonische verschijnselen of op de schaal van de grote sedimentbekkens.*

\* Professeur à l'Université de Montpellier II - Directeur du Centre d'Études et de Recherches Géologiques et Hydrologiques (C.E.R.G.H.) - Place Eugène Bataillon - 34060 Montpellier-Cédex - France.

*Une tentative de récapitulation synthétique du cycle des eaux sous-océaniques et souterraines en liaison avec la métallogénie est donnée.*

*Er wordt een poging gedaan tot een synthese-overzicht van de kringloop van de onderoceanische en ondergrondse wateren in verband met de metallogenie.*

### ZUSAMMENFASSUNG

*Die Bedeutung des Wassers in den lagerstättenerzeugenden Konzentrationsprozessen konnte dank der Anwendung der Grundprinzipien bzw. angesichts der neulich erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der Hydrogeologie im Laufe der letzten Jahre näher umrissen werden. Es hat sich alsdann herausgestellt, daß diese Bedeutung in einer großen Anzahl von Fällen noch viel weitläufiger sein könnte, als man sich bis dahin gedacht hatte. Neue genetische Hypothesen konnten aufgestellt oder bewiesen werden, und neue Forschungsgebiete wurden in letzter Zeit in Angriff genommen.*

*Dieser Gesichtspunkt wird durch eine Reihe von Beispielen untermauert, u.a. betreffend die Wechselbeziehungen zwischen den metallogenetischen Prozessen und :*

- den Unterschieden in der Porosität bzw. in der Wasserdurchlässigkeit, der Dränung durch die sogenannten undurchlässigen Schichten (u.a. für Uran, Pb und Zn) ;*
- den hydraulischen, Temperatur- und Ionenkonzentrationsgradienten, den Kapillardiffusionserscheinungen, usw. ;*
- dem Umlauf des übermäßig salzhaltigen, schwefelsauren oder chlorierten Wassers aus Eindampfungssedimenten (Evaporiten) bzw. aus der Verfestigung von lehmhaltigen Sedimenten ;*
- der Einschaltung von Reduktionsmitteln (Kohlenwasserstoffen, H<sub>2</sub>S biochemischer Herkunft, usw.*
- dem integrierten geologischen und geochemischen zusammenhängenden Inhalt, angefangen bei den nanotektonischen oder mikrosedimentologischen Erscheinungen bis hin zu den globotektonischen Phänomenen oder im Maßstab der großen sedimentären Becken.*

*Es wird versucht, eine synthetische Aufstellung über den Zyklus des unterseeischen und unterirdischen Wassers im Zusammenhang mit der Metallogenie zu vermitteln.*

### SUMMARY

*The part played by water in the concentration processes which form mineral deposits have been explained in recent years by the application of the principles of hydrogeology and of the latest advances in this field. It was found that the action of water was, in numerous cases, much more far-reaching than had been thought.*

*The article lists a series of examples in support of this view, particularly in respect of the correlations between the metallogenic processes and :*

- the differences in permeability and porosity, the phenomenon of « drainance » through the so-called impermeable strata (especially in the case of uranium, Pb + Zn) ;*
- the hydraulic, thermal and ion concentration gradients, the capillary diffusion phenomena etc. ;*
- the circulation of supersaline chlorate or sulphate waters emanating from evaporites or from the compaction of clayey sediments ;*
- the action of reducing agents (hydrocarbons, H<sub>2</sub>S of biochemical origin, etc.) ;*
- the overall geological or geochemical context, ranging from the nanotectonic or microsedimentological processes to phenomena of a globotectonic nature or which are on the scale of the large sedimentary basins.*

*Finally, the author presents a tentative summary recapitulation of the water cycle for sub-oceanic and subterranean waters in connection with the process of metallogenesis.*

La présente synthèse a été préparée, d'une part, en raison du fait que notre laboratoire a depuis un certain nombre d'années axé une partie importante de ses activités de recherche sur les rapports de l'Hydrogéologie et des autres disciplines des Sciences de la Terre et notamment de la Métallogénie ; d'autre part, parce que, dans le cadre de ces Deuxièmes Journées de l'Industrie Minérale, organisées en hommage au Professeur Ivan de Magnée, il convenait de rappeler, qu'en Belgique, il fut le premier à invoquer l'hydrogéologie et la paléohydrogéologie, pour expliquer la genèse des gisements belges de plomb, zinc et barytine<sup>1</sup> ; ses vues, datant de près de dix ans, étant toujours d'actualité.

Ceci étant dit, il convient de rappeler d'abord ce que l'on entend par « Hydrogéologie » : au sens le plus large, l'Hydrogéologie est la science du comportement de l'eau dans le domaine souterrain en relation avec tous les facteurs qui contrôlent ce comportement. L'Hydrogéologie étudie donc en premier lieu cette partie du cycle de l'eau qui se passe en dessous de la surface du sol ; aussi préciserons-nous, dans une première partie, cet aspect cyclique des circulations d'eaux souterraines et les intégrerons dans le « cycle de l'eau » s.l. Dans une deuxième partie, nous examinerons quelques cas particulièrement typiques en Métallogénie, de l'importance des caractéristiques hydrauliques intrinsèques des roches (porosité, perméabilité) pour la localisation des gîtes métallifères. Ce faisant, nous parlerons du rôle fondamental de l'eau en tant qu'agent de transport par excellence des éléments métalliques.

Dans une troisième partie, nous verrons comment l'eau pourra jouer un rôle d'agent de mobilisation des métaux au cours de sa circulation souterraine, ensuite un rôle de précipitation et de fixation de ces éléments sous forme de ces concentrations anormales auxquelles on a donné le nom de gîtes métallifères. Ce faisant, nous devons faire appel aux propriétés physiques, physicochimiques et chimiques de l'eau et des corps qu'elle peut contenir en solution ou en suspension.

En conclusion, nous attirerons l'attention sur le fait que le rôle des eaux souterraines, en métallogénie, apparaît dans de nombreux cas beaucoup plus étendu qu'on ne l'imaginait jusqu'alors et que des champs de recherche nouveaux peuvent être considérés comme récemment ouverts dans ce « no man's land » qui a longtemps séparé et sépare encore souvent Hydrogéologues et Métallogénistes.

### 1. L'ASPECT CYCLIQUE DE LA CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES

Alors que la partie du cycle de l'eau au-dessus ou sur la surface du sol a fait l'objet d'études affines, le

cycle de l'eau sous la surface du sol n'a fait l'objet que d'études le plus souvent sommaires et non intégrées.

Les figures 1 et 2 récapitulent les traits fondamentaux de cette partie du cycle, comparativement au cycle fondamental érosion - sédimentation - pétrogenèse - orogénèse et au cycle de la « matière organique » dans l'hydrosphère et dans la lithosphère. On y voit que, pour l'eau souterraine, l'eau marine salée intervient en plus de l'eau douce d'origine météorique, toutes deux pouvant subir au cours de leurs mouvements, des réchauffements ou des refroidissements.

Y figure également le trajet de la matière organique, depuis les masses planctoniques océaniques jusqu'aux imprégnations diffuses ou concentrées (poches) d'hydrocarbures liquides ou gazeux. On y voit aussi, selon une théorie que nous avons récemment développée<sup>2</sup>, le cycle des eaux volcaniques, d'origine phréatique ou marine, responsables de lessivages et de concentrations dans les terrains traversés, volcaniques ou non.

Enfin, deux cercles indiquent très schématiquement les zones d'interférences eaux salées, eaux douces vadoses ou matière organique, hydrocarbures, réducteurs où se rencontrent le plus fréquemment les réactions d'interfaces gîtogéniques.

Quant à l'eau juvénile, elle est réduite à une hypothétique flèche en tireté, aucune certitude n'étant acquise sur son existence, si l'on n'y range pas l'eau pouvant résulter de certaines transformations minéralogiques lors du métamorphisme.

Nous remarquerons que l'énergie motrice de ces cycles — outre, dans les deux cas, la gravité — est

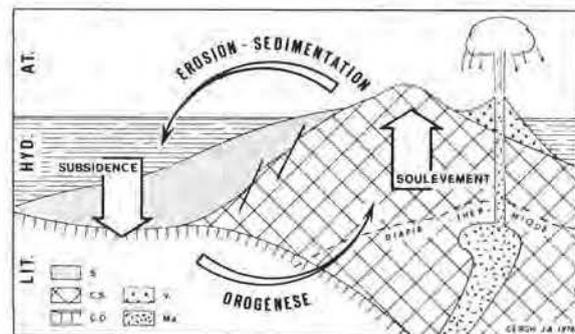


Fig. 1. — Cycles majeurs de matière dans le système fosse océanique — marge — continent (à l'exclusion de l'eau et des matières organiques)

- S = sédiments
- C.S. = croûte sialique
- C.O. = croûte océanique
- Hyd. = hydrosphère
- V = produits d'émission volcanique
- Ma = magma
- Lit. = lithosphère
- At. = atmosphère

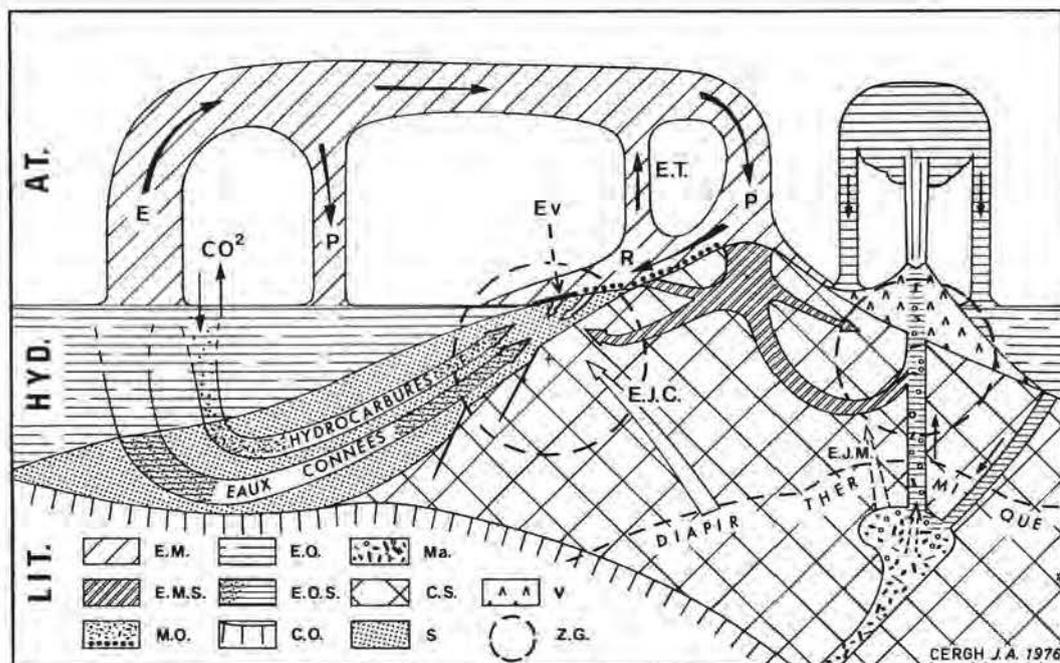


Fig. 2. — Cycle de l'eau montrant les rapports de la partie souterraine avec le reste du cycle et avec la métallogénie (à un instant  $t$ , ce cycle se modifiant constamment en fonction de l'évolution du prisme de croûte terrestre considéré).

(Echelles non respectées)

Z.G.	= zones gîtogènes métallogéniques majeures
AT	= atmosphère
HY	= hydrosphère
LIT	= lithosphère
C.S.	= croûte sialique plissée et métamorphisée
C.O.	= croûte océanique
S	= sédiments et roches sédimentaires
MA	= magma

V	= roches volcaniques
EV	= évaporites
MO	= matière organique
E	= évaporation
P	= précipitation
ET	= évapotranspiration
R	= ruissellement
EM	= eau météorique
E.M.S.	= eau souterraine d'origine météorique
E.O.	= eau de mer
E.O.S.	= eau souterraine d'origine marine (→ eaux connées)
E.J.C.	= eaux juvéniles de cristallogénèse
E.J.M.	= eaux juvéniles d'origine magmatique (hypothétiques ?)

d'origine externe dans l'atmosphère (énergie de radiation-solaire entraînant l'évaporation de l'eau de mer et engendrant les vents vecteurs de nuages — à l'exception du cas des eaux des panaches volcaniques) et d'origine interne pour les eaux souterraines (essentiellement *pressions lithostatiques*, *pressions orogéniques* ou *énergie thermique* d'origine interne (magmatique ou provenant de la radioactivité)).

## 2. L'EAU SOUTERRAINE, AGENT DE TRANSPORT DES IONS METALLIQUES

### 21. Variations des coefficients hydrauliques intrinsèques des sédiments et des roches (porosité, perméabilité) spatialement et temporellement et mise en place des gîtes

Il est évident que la possibilité de formation d'un gîte dans une roche hôte dépend du rapport du volume des vides au volume total (porosité) et de la

vitesse possible de transfert de l'eau à travers les roches dans des conditions unitaires (perméabilité) ; que la porosité et la perméabilité soient de roches à interstices ou de roches à fissures agrandies (cas des roches karstiques) ou non (cas des roches cristallines) par solution.

On peut citer les exemples suivants :

a) Liaison des gîtes d'uranium « tabulaires » ou « en rouleaux » des Etats-Unis (Colorado, Wyoming, fig. 3) avec des circulations d'eaux ayant lessivé antérieurement l'uranium disséminé dans les formations surincombantes ou adjacentes et s'étant canalisées dans les bancs les plus perméables des grès triasiques, correspondant le plus souvent aux passages de grès à stratifications entrecroisées ou à des paléochenaux situés entre des interlits marneux imperméables (fig. 3)<sup>3 et 4</sup>.

b) Localisation des zones riches en uranium par lessivage de la masse de la roche-mère (*schistes autuniens*) et concentration dans des paléochenaux

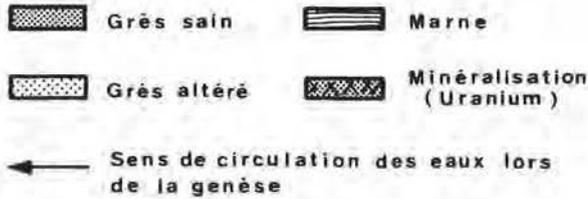
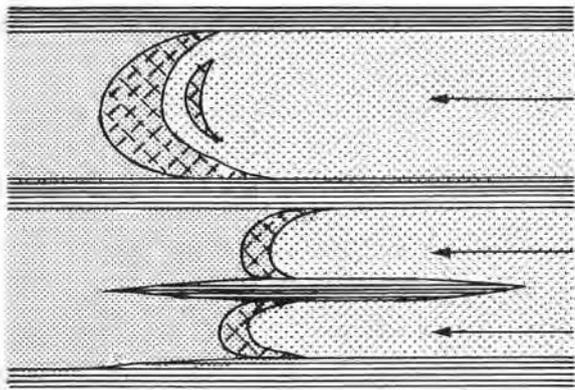


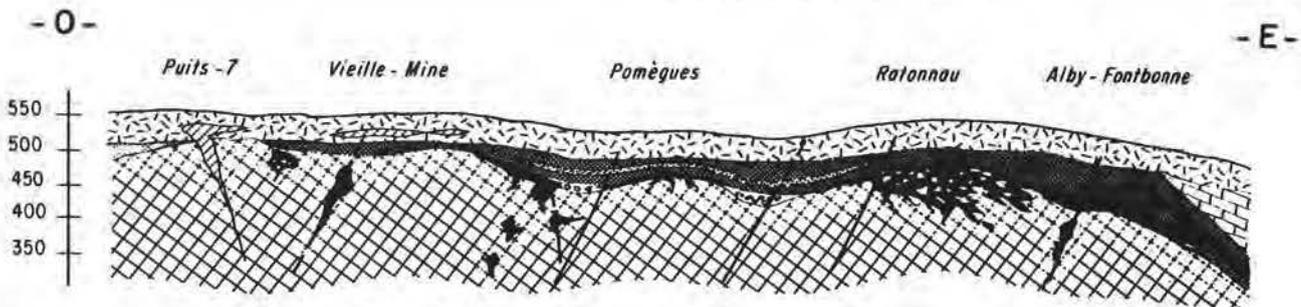
Fig. 3. — Schéma de la disposition des gîtes « en rouleaux » d'Uranium Vanadium du plateau du Colorado et du Wyoming (Amérique du Nord).

(zones plus perméables) de la base des formations permiennes de Lodève (France) <sup>5</sup>.

c) Localisation fréquente, dans les séries gréseuses, de minéralisations plombo-zincifères dans les parties les plus perméables, par exemple de plus forte granulométrie, que sont les conglomérats de base (ex. : conglomérats de base du Trias belge) <sup>1</sup> — Circulation générale des eaux ascendantes dans les formations néritiques périphériques des bassins par opposition aux formations à granulométrie plus fine du centre de ceux-ci.

d) Localisation classique des minéralisations dans les réseaux de fissures en extension, notamment des roches cristallines et métamorphiques (zones de fractures tectoniques, parties des charnières anticlinales ou synclinales en distension, etc.). La minéralisation

Fig. 4. — Coupe synthétique de la mine de plomb et de zinc des Malines (Cévennes) montrant les liaisons : Minéralisations — Roches argilocarbonées (Trias marneux) roches carbonatées (socle Cambrien et recouvrement bajocien), en liaison avec les hauts fonds et talus de la paléosurface (en partie paléokarstique) et avec la tectonique. (d'après J.J. Orgeval - Thèse) <sup>11 et 12</sup>.



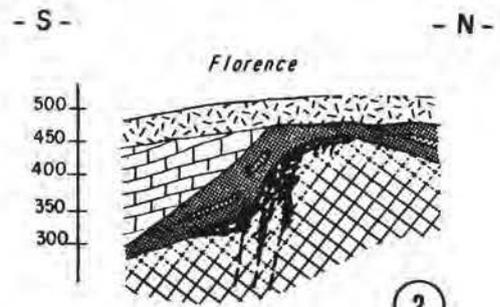
Coupe - III

1

J.J. Orgeval 1973

Légende

- Bathonien
- Amas sulfurés et oxydés dans le Bathonien
- Hettangien
- Trias marneux
- Trias "conglomératique"
- Socle Cambrien Carbonaté ( Unité I )
- Minéralisations massives : en couches ( Pb - Zn - ba )
- Minéralisations massives : en amas
- Minéralisations massives : en ciment de brèche
- Minéralisations diffuses
- Pyrite et bitume



Coupe - II

2

Echelle de longueur des coupes : 0 100 200 m

n'étant le plus souvent possible qu'avec une *tectonique vivante*, entretenant l'ouverture des fissures qui sans cela peuvent se refermer ou se cimenter très rapidement<sup>1 et 6</sup>.

e) Localisation des minéralisations, notamment de nombreux gîtes plombo-zincifères dans des cavités antérieures (ex. : *cavités paléokarstiques*) ou créés par *dissolution effondrement*, ou par dissolution réaction et remplacement syngénétiques<sup>1-7 et 10</sup> etc. A citer, entre autres, les travaux récents de notre laboratoire (J.J. Orgeval)<sup>11</sup> dans la mine de plomb et de zinc des Malines (bordure cévenole) (minéralisation des paléokarsts dans les dolomies cambriennes) (fig. 4).

f) Localisation de minéralisations Pb-Zn dans les *parties récifales* (à haute perméabilité due à leurs nombreuses cavités) des formations calcaires, telles celles décrites par I. de Magnée dans les gîtes stratiformes des récifs dolomités du Dévonien supérieur belge<sup>1</sup>.

A noter ici que, ce qui compte essentiellement pour l'orientation des circulations d'eaux, ce sont plus les perméabilités relatives des couches en présence que les perméabilités absolues<sup>8</sup>.

A cet égard et à l'échelle d'espace et de temps géologique, la notion d'*impermeabilité devient très relative*. C'est ainsi que les couches argileuses considérées jusqu'à une époque très récente comme écrans parfaitement imperméables sont en réalité perméables, *si les gradients hydrauliques sont suffisants*. Ces gradients étant d'un ordre de grandeur supérieur à la gravité, peuvent orienter les circulations, non seulement vers le bas, mais aussi vers le haut ou latéralement. Ce qui permet d'expliquer certaines dispositions de gîtes restées longtemps énigmatiques<sup>8</sup>.

Au passage très lent, sous gradient hydraulique, de l'eau dans les roches argileuses ou « semi-perméables », on a donné le nom de *drainance*. Les roches argileuses ayant souvent pris naissance en *milieu de sédimentation euxinique* sont relativement riches en matière organique et en métaux lourds fixés par actions biophysiques ou biochimiques à partir de l'eau de mer ; à titre d'exemple, les marnes toarciennes de la bordure des Causses (Région du Tournadous) dans un volume de moins d'un demi km<sup>3</sup> (3 km × 3 km × 50 m) contiendraient, en se basant sur des analyses moyennes, environ 400.000 tonnes de plomb et 135.000 tonnes de zinc<sup>13</sup>.

Si des conditions de drainance adéquates sont réalisées<sup>8</sup>, on conçoit alors que les eaux puissent mobiliser les métaux contenus ; on aura alors ce que j'ai proposé d'appeler une « *drainance métallogénique* ». Une telle drainance métallogénique peut expliquer l'observation si fréquente de la localisation

des minéralisations plombo-zincifères au contact ou à proximité de telles roches argilocarbonées (ou en cas de métamorphisme surajouté, graphitiques) (fig. 4 et 5).

La mise en jeu de la drainance métallogénique nécessitant évidemment que puissent être générés (grâce aux variations topologiques dues à la sédimentation, à l'érosion ou à la tectonique) des gradients hydrauliques suffisants, la variation de ces gradients expliquera à son tour les variations de la gîtogénèse.

Par ailleurs, ces eaux circulantes (par drainance ou non) peuvent être, soit des eaux d'origine météorique, soit des eaux d'origine marine (eaux connées) expulsées lors de la compaction des sédiments ou lors de la diagenèse<sup>11 et 12</sup>.

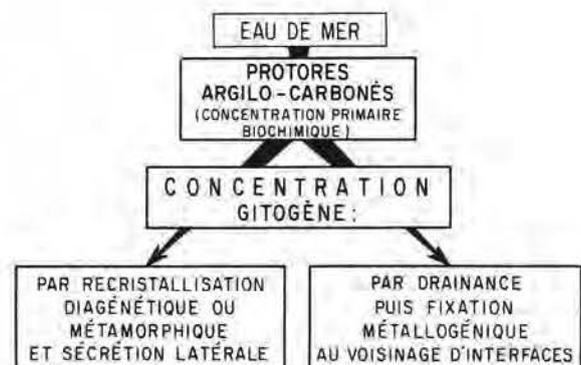


Fig. 5. — Schéma des possibilités de concentration gîtogène à partir des protores argilocarbonés. (d'après J. Avias, 1971)<sup>8</sup>.

## 22. Mécanisme de mise en mouvement des eaux souterraines

La considération de la répartition des perméabilités, dépendant elle-même de la Géologie historique (paléosédimentologie et paléostratologie — paléogéographie et répartition des faciès — histoire diagénétique, épigénétique, tectonique et métamorphique, etc.), permettant de déterminer quelles seront les voies possibles de circulation des eaux souterraines, quels vont être alors les *moteurs* de cette circulation ?

a) En premier lieu, joueront les *gradients hydrauliques* déterminés par la gravité (pressions hydrostatiques et lithostatiques) et par les contraintes *tectoniques* (y compris globotectoniques). Ceci explique la mise en mouvement ascendante des eaux connées ou diagénétiques des centres des bassins sédimentaires vers leur périphérie (plus perméable). Cela explique aussi l'action des mouvements orogéniques, des

chevauchements, etc. dans la genèse de certaines circulations d'eaux souterraines.

b) En second lieu, joueront les *gradients de température* d'origine radioactive ou magmatique provoquant les phénomènes bien connus de *thermosiphon* dans les fissures ouvertes <sup>11</sup> ou de *circuits convectifs* des zones géothermiques <sup>12</sup> mais pouvant, même dans de l'eau immobile, provoquer des *migrations ioniques des pôles chauds vers les pôles froids* <sup>16 et 17</sup>.

c) Pourront également jouer les *gradients de concentration ioniques* dus aux *croissances cristallines* liées à la diagenèse, à l'épigenèse ou au métamorphisme, extrayant du milieu certains ions qui se remplaceront de proche en proche <sup>18</sup>.

d) Pourront également, dans les milieux à fine granulométrie ou fine fissuration, jouer, bien entendu, les *forces capillaires* et de véritables *diffusions « chromatographiques »*.

### 3. L'EAU AGENT DE MOBILISATION PRIMAIRE, DE PRECIPITATION ET DE FIXATION GITOGENES, DE REMOBILISATION ET DE DESTRUCTION DES GITES METALLIFERES - HYDROCHIMIE ET METALLOGENESE

Au cours de sa circulation, l'eau va alors « mobiliser » en tant que solvant et par *dissolution* ou par *entraînement* simples ou avec réactions physicochimiques (réactions chimiques de l'eau ou des corps contenus avec l'encaissant, adsorption ou chélation avec la matière organique, réactions biochimiques dues aux bactéries contenues, etc.) divers éléments des formations qu'elle traversera et ce, en fonction évidemment de sa température, de son pH, de son potentiel d'oxydoréduction (EH) etc. <sup>15</sup>.

Si ces facteurs varient, on aura augmentation de la dissolution ou au contraire précipitation en raison des lois d'équilibre chimique et de la thermodynamique.

Si la précipitation est diffuse, aucun gîte exploitable ne pourra généralement être engendré. Par contre, si une précipitation suffisamment cumulative est localisée à un *interface* d'ordre hydrique, lithologique, physique, physicochimique, chimique ou dans un « goulot d'étranglement » <sup>18</sup>, on pourra alors avoir formation d'un véritable *gîte métallifère*.

Une attention particulière doit, à ce point de vue, être portée aux *eaux sursalées acides chlorurées ou sulfatées* résultant de la traversée de *formations d'origine évaporitique*, ou provenant de la *compaction de sédiments argileux* dans lesquels les minéraux des argiles fixant davantage de K et de Ca que de Na et de Mg, fourniront des eaux enrichies en Na et Mg, déséquilibrées et par là même agressives ou incrustantes <sup>1 et 15</sup> pouvant, par exemple, entraîner la dolomitisation de formations calcaires. En ce qui concerne les éléments métalliques qui nous intéressent plus spécialement ici (Ba, Pb, Zn, Cu, Mg, Fe, Ni, Ag, etc.), ces eaux acides et sursalées les feront alors passer en solution et nous rappellerons ici les résultats expérimentaux d'Ellis rapportés par Dozy <sup>13</sup> (tableau I).

De simples refroidissements pourront alors entraîner des précipitations <sup>19</sup>. De même si des solutions acides rencontrent des formations basiques, par exemple carbonatées, on pourra avoir neutralisation et formation par exemple de carbonates de plomb, zinc, etc. tels qu'on en observe dans certains gîtes des mines du Laurium en Grèce. La diminution du pH due à l'oxydation de la pyrite des terrains traversés par des eaux oxydantes pourra, à ce point de vue, avoir un rôle déterminant, mais le *rôle des interfaces milieux oxydants-milieux réducteurs*, joue certainement un rôle bien plus considérable, ce qui nous amène aux considérations du chapitre 4.

TABLEAU I  
Métaux dissous dans une eau (en ppm) après 3 à 5 semaines en fonction de la teneur en Na Cl (l'eau étant à 400°)

		Mg	Al	Mn	Fe	Pb	Cu
à partir d'une andésite	+ 0	7		0,5	20	0,5	0,5
	+ 2 m Na Cl	20	4	10	40	2	0,15
	+ 4 m Na Cl	20	40	60	200	2	3
à partir d'une argile schisteuse	0	30	300	1	300	1	6
	+ 2 m Na Cl	80	200	5	4000	0,5	10
	+ 4 m Na Cl	400	20	20	10000	0,4	1

#### 4. LE ROLE DE LA MATIERE ORGANIQUE ET NOTAMMENT DES HYDROCARBURES ET DES BACTERIES ANAEROBIES DES SEDIMENTS ET DES ROCHES

Les études menées principalement par les géologues pétroliers ont établi l'importance et la presque omniprésence dans les formations d'origine sédimentaire de *matière organique*, d'*hydrocarbures* plus ou moins évolués en fonction des conditions physicochimiques rencontrées, ainsi que fréquemment de bactéries encore vivantes.

Or, cette matière organique, qu'elle soit originelle ou qu'elle provienne de migrations, soit à l'état particulaire et transportée par les eaux, soit à l'état liquide ou gazeux (hydrocarbures), en fonction elle aussi de la perméabilité des roches, va bien entendu en certains points rencontrer les solutions sursaturées de métaux précédemment cités où les solutions salines oxydées ayant remanié par oxydation et drainage les métaux sulfurés qu'on peut rencontrer à l'état diffus dans les formations argilocarbonées d'origine euxinique.

Si des contacts suffisamment localisés ou si des *interfaces*, zones oxydées, zones réduites, se produisent on pourra alors avoir, selon ces interfaces, *précipitation de sulfures métalliques* dans les discontinuités de la matrice rocheuse.

Nous donnerons à titre d'exemple :

a) Les explications proposées par Harshman <sup>1</sup> pour la formation des *gîtes d'uranium en rouleaux* d'Amérique du Nord dont nous avons déjà parlé, l'action réductrice pouvant être due à la rencontre des eaux minéralisées circulantes avec des hydrocarbures gazeux naturels (fig. 6), phénomène qui a été par ailleurs démontré dans le cas de minéralisations analogues au Texas.

b) Les études effectuées ou en cours dans le cadre de notre laboratoire et en collaboration avec la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine, par notre

élève J.J. Orgeval <sup>2</sup>, notamment dans la *mine de Pb et de Zn des Malines* (bordure cévenole), ou pour expliquer les minéralisations barytiques et plombo-zincifères des schistes autuniens du bassin de Lodève <sup>11, 12 et 13</sup>.

Dans la mine des Malines, l'association, notamment en inclusions, d'hydrocarbures (*bitumes*) aux minéralisations piégées ou non dans les paléokarsts, est très caractéristique.

On y rencontre aussi de belles stalactites de galène témoignant d'une genèse en milieu gazeux qui serait due, d'après J.J. Orgeval, à de véritables poches gazeuses piégées dans les cavités du paléokarst. Cet auteur a en effet mis en évidence, dans les croûtes de bitume tapissant certaines de ces cavités et provenant des marnes triasiques sus-jacentes, des gaz inclus résiduels tels :  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$  etc., ce qui rejoint la description par Ivan de Magnée <sup>1</sup> de cloches gazeuses analogues, à stalactites sulfurées, à  $CO_2$ , méthane et hydrocarbures qui furent recoupées par les sondages dans les zones plombo-zincifères de Belgique.

A *Saint Privat*, J. Connan et J.J. Orgeval <sup>13</sup> ont étudié en détail la géochimie des filons barytiques et de leurs épontes et montré que le schiste autunien riche en matières organiques, à peine mature, est la roche-mère des bitumes abondamment répandus dans les filons barytiques et dont la nature exclut une minéralisation autre qu'à basse température.

<sup>2</sup> auquel je tiens à exprimer ma reconnaissance pour les documents qu'il a bien voulu fournir pour le présent article.

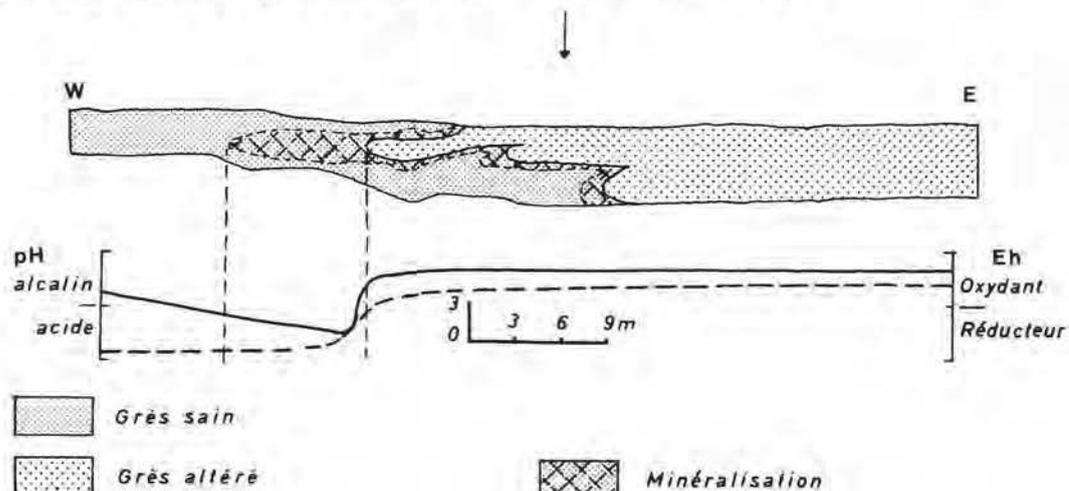


Fig. 6. — Interprétation d'Harshman pour expliquer la précipitation gîtogène des gîtes d'Uranium, Vanadium « en rouleaux » du Wyoming lorsque l'état d'oxydation diminue pour passer à un état de réduction suffisant, dû à la matière organique rencontrée lors de la circulation des eaux, ou aux dégagements de  $H_2S$  dus à l'activité bioréductrice des bactéries anaérobies rencontrées. (d'après Harshman 1970) <sup>1</sup>.

Les bitumes des filons témoignent par ailleurs de dégradations bactériennes passées, probablement causées par des bactéries sulfatoréductrices qui s'alimentaient en carbone en dégradant les composants des huiles et synthétisaient l'H<sub>2</sub>S, responsable de la réduction des solutions sulfatées véhiculant les ions métalliques et de la précipitation des sulfures métalliques (galène, pyrite, bournonite, cuivre gris) accompagnant les cristallisations et recristallisations de barytine dans les parties précisément les plus riches en bitumes (planche I). L'origine des éléments métalliques peut être, d'après ces auteurs, une « *sécrétion latérale* » causée par « *drainance métallogénique* » induite par la fracture en distension génératrice du filon et drainant des eaux météoriques à travers les schistes autuniens.

Le rôle de la matière organique semble donc souvent fondamental tant pour la genèse de roches-mères à métaux lourds provenant de l'eau de mer, lors de la sédimentation, que pendant et postérieurement à la diagenèse et à l'évolution en hydrocarbures, pour la précipitation par réduction des métaux véhiculés par des solutions sursalées d'eaux météoriques oxydantes ou d'eaux connées ou de compaction des sédiments argileux. L'interaction post-diagénétique du cycle des eaux souterraines sursalées et de celui des matières organiques ayant accompagné les sédiments, combinée au jeu des bactéries anaérobies sulfatoréductrices, semble donc un des métallotectes fondamentaux de la précipitation des sulfures métalliques (fig. 2), notamment de plomb et de zinc.

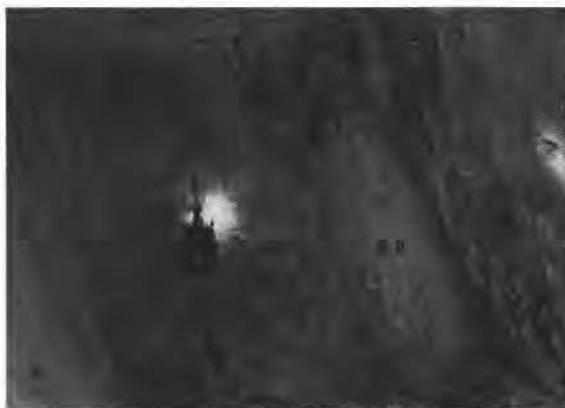


Planche I. — Mine de St-Privat.

- 1 — Front ouest du niveau - 45 montrant de gauche à droite :
  - un miroir de faille cannelé (C)
  - une zone de 1,50 m de barytine lamellaire (B)
  - une zone mylonitique de 0,50 à 0,70 m de puissance avec, près de l'éponte, de la barytine zonée, une brèche à ciment de galène et de bitume (C, B)
  - le miroir de faille (F)
 d'après J. Connan et J.J. Orgeval, 1973 <sup>19</sup>.
- 2 — Détail de la photographie précédente montrant les microplans au sein de la masse barytique bréchisée et les imprégnations bitumineuses.

### 5. INFLUENCE DE L'ENSEMBLE DU CONTEXTE GEOLOGIQUE SUR LE JEU DES EAUX SOUTERRAINES GITOGENIQUES ET DONC INDIRECTEMENT SUR LA GITOGENESE

Pour terminer, nous voudrions insister sur la nécessité, là comme ailleurs, pour bien comprendre l'histoire des minéralisations, de faire une *étude intégrée de l'histoire géologique* de la zone en question.

L'évolution de la perméabilité des roches est en effet fonction de l'histoire spatiale et temporelle des sédimentations anciennes, de l'histoire des événements diagénétiques, épigénétiques et éventuellement métamorphiques conditionnés par les changements de température et de pression : fonction donc aussi de l'histoire magmatique et tectonique.

L'histoire paléotectonique et paléomorphologique (avec évolution des niveaux de base) peut souvent seule permettre de comprendre l'évolution fondamentale des gradients hydrauliques. Nous citerons à cet égard les lois de répartition des gîtes riches de nickel de la Nouvelle-Calédonie, liés aux zones de paléodrainage et en particulier à celles constituées par les brèches et zones fracturées contemporaines de la mise en place par charriage des ultrabasites <sup>20</sup> ; la destruction par lessivage de certains de ces gîtes riches (ibid.). Nous citerons aussi l'incidence, récemment reproduite au laboratoire, des contraintes tectoniques pour augmenter considérablement la microfissuration et donc la microporosité de certaines roches dans les zones atteintes par ces contraintes <sup>21</sup>.

A noter ici que les études isotopiques et les études d'inclusions fluides (gazeuses ou liquides) permettant de reconstituer les caractéristiques de salinité, de température, de pH, etc., d'origine des paléo-environnements aqueux souterrains ont permis ces dernières années une approche beaucoup moins hypothétique de la réalité des choses.

Les incidents de l'histoire du globe terrestre dans son ensemble ne peuvent par ailleurs pas être négligés, certaines oscillations du niveau marin peuvent suffire à expliquer certaines apparitions ou certaines disparitions de minéralisations.

Les données de la *globotectonique* et l'évolution des grandes fractures médio-océaniques ou intracontinentales, les effondrements grabéniques, les surrections en horsts, les chevauchements, les subductions et les obductions peuvent expliquer en fin de compte les causes de certaines variations de perméabilité<sup>13</sup> ou de pression des eaux souterraines<sup>22</sup> et<sup>15</sup> (fig. 7). L'histoire vulcanologique et magmatique et celle du métamorphisme plus ou moins profond d'une région considérée peut renseigner sur les possibilités d'apparition d'eaux liées ou non à des cristallogénèses, sur l'évolution des gradients géothermiques, des gradients de pression, etc.

### CONCLUSIONS

En conclusion, et tout en admettant évidemment que d'autres mécanismes tout aussi incontestables que ceux liés à la circulation des eaux souterraines peuvent intervenir dans la métallogénie des gîtes métallifères, nous voudrions ici insister sur la nécessité, dans toute étude métallogénique, d'examiner dans le cadre du paléo-environnement géologique, la part éventuelle que peut jouer la paléo-hydrogéologie de la zone considérée en corrélation avec l'histoire de l'évolution, dans le même milieu souterrain, de la matière organique et de la vie bactérienne.

Notre souhait est que les quelques exemples présentés ici fassent prendre conscience que d'ores et déjà leur importance apparaît comme *beaucoup plus générale* que ne l'avaient pensé jusqu'à présent la plupart des auteurs.

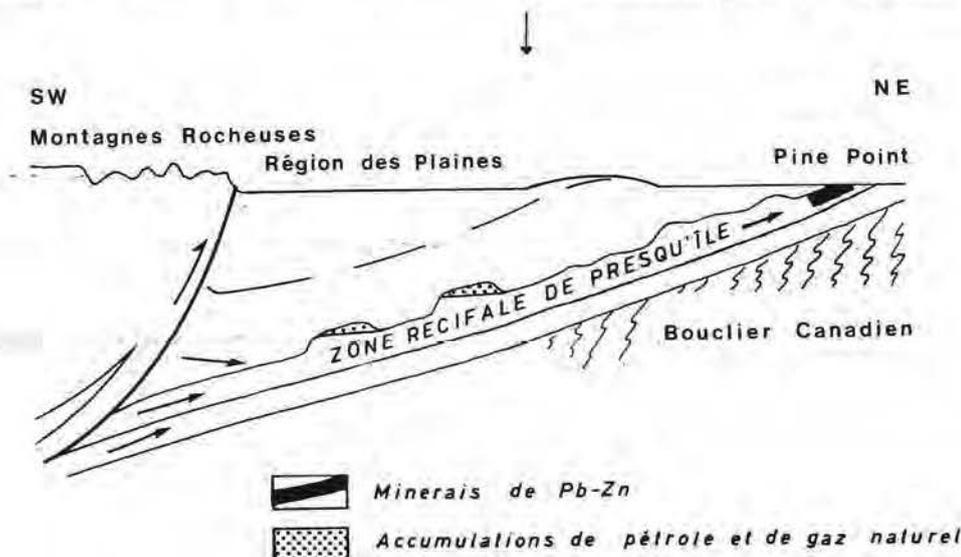
### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Vu l'ampleur du sujet traité, seules sont données quelques publications récentes aux bibliographies desquelles nous renverrons pour plus de détails.

- [1] de MAGNEE I., 1967. — Contribution à l'étude génétique des gisements belges de plomb, zinc et barytine. Genesis of stratiform Lead-Zinc-Barite Florite deposits (Mississippi Valley type deposits). A symposium pp. 255-266. J.S. Brown ed. Monogr. 3, *Econ. Geol.* Lancaster, Pens.
- [2] AVIAS J., 1974. — Possibilité d'une interprétation hydrogéologique du volcanisme de type éruptif, et de l'évolution chimique du « basique à l'acide » des laves émises. *Mém. C.E.R.G.H.*, t. VIII, fasc. 1, Notes condensées, pp. 3-6, CERGA, Montpellier.
- [3] HARSHMAN E.N., 1970. — Uranium ore rolls in the United States. *Int. Assoc. Atom. Ass.* 391/4, pp. 219-231, 6 fig., Vienne.
- [4] SHAW D.R., 1955. — Gisements en rouleaux et genèse des dépôts d'uranium-vanadium du plateau du Colorado. *Conf. Int. Util. Pac. En. Al.*, pp. 383-385, 2 fig., Genève.
- [5] GARRIC J., HERY B., 1963. — Les gisements permocarbonifères de l'Hérault. (*In* : Itinéraire géologique dans le Languedoc. Institut de Géologie, 17-20 Mai 1966) Montpellier (ronéo).
- [6] AVIAS J., 1974. — Sur le contrôle tectonique en général et globotectonique en particulier des grands aquifères de fissure, notamment de la zone périméditerranéenne. *Mém. C.E.R.G.H.*, t. VIII, fasc. 1, Notes condensées, pp. 1-3, CERGA, Montpellier.
- [7] McCORMICK J.F., CRAWFORD J. et alii, 1969. — Papers on the stratigraphy and Mine Geology of the Kingsport and Mascot formations (Lower Ordovician) of East Tennessee State of Ten. Dep. of Cons. Div. of Geology. *Report of investigation* n° 23, pp. 1-90, 6 fig. Nashville.

Fig. 7. — Liaison des gîtes Pb-Zn des calcaires récifaux du Dévonien moyen de Pine Point (Canada), avec le « chenal de perméabilité » de la zone récifale, avec la pression lithostatique de la région des plaines et avec la pression tectonique due au chevauchement vers le Nord-Est des Montagnes Rocheuses sur cette région des Plaines.

(d'après Beale et Jackson 1968<sup>22</sup> et J.J. Dozy 1973<sup>15</sup>.)



- [8] AVIAS J., 1971. — Réflexions sur le rôle de l'hydrogéologie et de la paléohydrogéologie dans la genèse, le remaniement et la destruction des gîtes minéraux en général, et des gîtes métallifères stratiformes en particulier. Colloque sur les tendances actuelles de la métallogénie. A.G.S.O. Castres 1971 *Mém. C.E.R.G.H.*, t. VI, fasc. 1, pp. 1-15, 9 fig., Montpellier.
- [9] AVIAS J. et ORGEVAL J.J., 1974. — Contrôles hydrogéologiques de la formation et de la localisation des gîtes minéraux en général, et des gîtes associés aux roches carbonatées en particulier. *Mém. As. Int. Hydrog.*, Tome X, pp. 271-275.
- [10] LAGNY P., 1975. — Le gisement plombo-zincifère de Salafossa (Alpes italiennes orientales). Remplissage d'un paléokarst triasique par des sédiments sulfurés. *Miner. Deposita*, T. 10, pp. 345-361, Springer Verlag, Berlin.
- [11] ORGEVAL J.J., 1975. — Les remplissages karstiques minéralisés : exemples de la mine des Malines, Gard, France. Séance spéc. Soc. Géol. France. *Métallogénie et Géologie Minérale*. (Orléans, 3-4-5 Mai) (sous presse).
- [12] ORGEVAL J.J. (en cours). — Contribution à l'étude géologique des minéralisations plombo-zincifères du socle carbonaté Cambrien de la Mine des Malines (Gard, France) relations de la minéralisation avec des structures paléokarstiques et l'environnement marno-dolomitique bitumineux triasique. Thèse, Montpellier.
- [13] MELAS P., 1974. — Approche métallogénique de la notion de drainance appliquée aux formations argilocarbonées liasiques des Causes et de Lorraine. *Rapport de D.E.A.*, ron. 48 p., inédit, C.E.R.G.H. Montpellier.
- [14] DE LAUNAY L., 1913. — *Traité de Métallogénie, Gîtes Minéraux et métallifères*. 3 vol. Béranger, Paris.
- [15] DOZY J.J., 1973. — L'eau et la genèse des minerais hydrothermaux. *Ann. Soc. géol. Belgique*, t. 96, pp. 387-402, 14 fig. Bruxelles.
- [16] DANDURAND J.L., FORTUNE J.P., PERAMI R., SCHOTT J. et TOLLON F., 1972. — On the importance of mechanical action and thermal gradient in the formation of metal bearing deposits. *Miner. Deposita*, vol. 7, pp. 339-350.
- [17] SOULIE M., JOSEPH C., RODIER C., BIBENT B., 1976. — Concentration actuelle de barytine par percolation à l'interface Trias-socle dans le bassin de Bédarieux (34) France. I. Géologie, Minéralogie, Hydrogéologie. II. Géochimie. Métallogénie. *C.R. Ac. Sc. Paris* (2 notes sous presse).
- [18] PELISSONNIER H., 1967. — Analyse paléohydrogéologique des gisements stratiformes de plomb, zinc, baryte, fluorine du type « Mississippi Valley ». *Econ. Geol. Monograph.*, 2 pp. 334-350, 10 fig.
- [19] CONNAN J. et ORGEVAL J.J., 1973. — Les bitumes des minéralisations barytiques et sulfurées de St-Privat (bassin de Lodève, France). *Bull. Centre Rech. Pau.* — S.N.P.A., t. 7, fasc. 2, pp. 557-585, 11 fig., 2 tabl., 3 pl.
- [20] AVIAS J., 1968. — Note sur les facteurs contrôlant la genèse et la destruction des gîtes de Nickel de la Nouvelle-Calédonie. Importance des facteurs hydrologiques et hydrogéologiques. *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 268, pp. 244-246.
- [21] PERAMI R., 1971. — Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques. Thèse Doct. Etat, Sc. Nat. Toulouse.
- [22] BEALES F.W. et S.A. JACKSON, 1968. — Pine Point, a stratigraphical approach. *The Canadian Mining and Metallurgical (C.I.M.) Bull.*, vol. 61, n° 675, pp. 503-512.