

## L'EAU ET LA GENÈSE DES MINÉRAIS HYDROTHERMAUX (\*)

par M. J. J. DOZY (\*\*)

(14 fig. dans le texte)

### I. INTRODUCTION

Les idées sur la genèse des minerais ont été profondément influencées par des conceptions plutoniques. La différenciation magmatique serait à l'origine de la formation de minerais — sous température décroissante. En s'éloignant de la source le caractère deviendrait pegmatitique, pneumatolitique, et enfin hydrothermal. Les minerais hydrothermaux seraient des dépôts d'eaux chaudes de profondeur, porteuses des derniers minéraux de la différenciation. Selon ce point de vue les gisements de minerais seraient toujours liés à une source magmatique ou volcanique, sauf naturellement les gisements purement alluvionnaires.

Remarquons que la concentration moyenne en métaux des roches sédimentaires, surtout de l'argile, est plus ou moins égale à celle des roches plutoniques. La concentration de Li, As, Se, Sb, Hg et Sn est même 2 à 10 fois plus élevée dans les sédiments que dans les roches plutoniques (KRAUSKOPF). Des sédiments — y compris des effusions et des tufs intercalés — peuvent donc servir en principe, aussi bien que le magma des roches plutoniques, de roche-mère aux métaux de minerais. La question importante est d'établir le mécanisme le plus probable et efficace d'enrichissement et d'accumulation.

On peut penser en premier lieu à un enrichissement strictement sédimentaire, comme des placers ou des gîtes syngénétiques. On connaît les taconites ou « banded iron ores », les sulfures synsédimentaires (Rammelsberg etc.), mais en général l'abondance des métaux dans les sédiments est trop faible, en sorte qu'il convient de chercher un mécanisme de concentration additionnel pour arriver à une accumulation économique.

Quant aux minerais hydrothermaux on les a mis depuis longtemps en rapport avec l'eau. Leur caractère épigénétique indique un apport qu'on ne peut pas imaginer sans l'intermédiaire d'un liquide. L'eau est un excellent dissolvant, surtout en présence de sels de chlorure. ELLIS, en étudiant les saumures récentes qu'on pourrait comparer à des solutions hydrothermales, a démontré que dans des solutions artificielles la concentration des ions métalliques dépendait des faits suivants (fig. 1) :

1. la composition minéralogique de la roche en contact avec l'eau,
2. la salinité du liquide,
3. la température.

(\*) Texte de la vingtième Conférence Gustave Dewalque donnée devant la Société le 23 mars 1973.

(\*\*) Professeur à la Delft University of Technology, Geological Department, 20 Mijnbouwstraat, Delft (Netherlands).

## MÉTAUX DISSOUS DANS L'EAU (ppm)

(APRÈS 3 - 5 semaines)

(ELLIS)

<u>ANDESITE</u>		<u>Mg</u>	<u>Al</u>	<u>Mn</u>	<u>Fe</u>	<u>Pb</u>	<u>Cu</u>
400 °C	H <sub>2</sub> O	7		0,5	20	0,5	0,5
	+ 2 m NaCl	20	4	10	40	2	0,5
	+ 4 m NaCl	20	40	60	200	2	3

ARGILE SCHISTEUSE

400 °C	H <sub>2</sub> O	30	300	1	300	1	6
	+ 2 m NaCl	80	200	5	4.000	0,5	10
	+ 4 m NaCl	400	20	20	10.000	0,4	1

## CONTENU EN CUIVRE ET PLOMB DE L'ÉCHANTILLON (ppm)

<u>ANDESITE</u>	<u>Cu</u>	<u>Pb</u>
ÉCHANTILLON ORIGINAL	70	10
APRÈS LESSIVAGE : 400 °C H <sub>2</sub> O	30	8
+ 2 m NaCl	5	2
+ 4 m NaCl	5	2

Fig. 1. — Solubilité de quelques métaux dans l'eau chaude pure et salée (ELLIS).

Les mêmes règles s'appliquent sans doute aux solutions naturelles dans l'écorce terrestre. L'eau innée est souvent salée. La concentration peut être de 100 à 300 ‰, donc plus élevée que celle de l'eau de mer qui renferme 35 ‰ de sels. La température dans les bassins sédimentaires normaux peut atteindre de 50° à 200° C ou plus, selon le gradient géothermique et la profondeur. Les métaux et les éléments en traces dans l'eau innée proviennent des roches avec lesquelles l'eau a été en contact. Des recherches isotopiques ont en effet indiqué maintes fois une origine des métaux à partir de la roche encaissante et non d'une source magmatique. Il doit exister un équilibre chimique entre les éléments en solution et les phases cristallines des minéraux des roches ou des sédiments encaissants. On a reconnu l'existence d'eaux salées non seulement dans les chantiers de pétrole, mais aussi dans quelques régions hydrothermales récentes, comme nous verrons plus tard.

Ces eaux peuvent être rendues mobiles par des différences de pression hydrodynamique, propriété très importante pour notre problème. Sous certaines conditions, surtout en profondeur, la pression des liquides correspond à la pesanteur de toutes les roches superposées. Cette pression lithostatique vaut approximativement le double de la pression hydrostatique, celle d'une seule colonne d'eau. On imagine

aisément que le passage d'eau d'un régime lithostatique à des conditions hydrostatique puisse causer des déplacements importants de liquides. On peut s'attendre à de pareils déplacements surtout en connexion avec des mouvements orogéniques. Une migration d'eau salée, porteuse de métaux et d'éléments en traces, est également concevable comme conséquence de mouvements épigéniques, à cause de différences de température, pression osmotique, force gravitative, etc. On connaît des niveaux d'eau inclinés dans des gisements pétroliers.

Il reste à expliquer la précipitation du minerai à l'endroit où on le trouve. En général on reconnaîtra que l'équilibre chimique des solutions a été perturbé, par exemple par abaissement de température ou de pression, ou par mélange avec une solution de différente composition, peut-être avec de l'eau météorique. Il en résulte que certaines combinaisons d'ions se précipitent.

A l'aide de quelques exemples je tâcherai d'illustrer le rôle important que l'eau et les conditions géologiques jouent dans la genèse de beaucoup de minerais épigénétiques ou hydrothermaux. J'emprunterai ces exemples en partie à quelques systèmes hydrothermaux récents afin de montrer que l'hypothèse offre certaines analogies avec la réalité actuelle.

## 2. LES GISEMENTS RÉCENTS DANS LA MER ROUGE

Des expéditions océanographiques ont découvert — comme vous le savez — des dépressions dans le fond de la Mer Rouge, près de Djedda, dépassant 2000 m de profondeur. La plus importante, la dépression de l'« Atlantis II », contient une saumure d'une salinité de 257 ‰ et une température de  $\pm 60^\circ$  C. On a trouvé des crevasses par lesquelles la saumure s'écoule de temps en temps (BÄCKER). Les sédiments y consistent en couches noirâtres et jaunâtres, contenant de la goethite, de la montmorillonite de fer, de la manganosidérite, de la sfalérite, de la blende et d'autres sulfures ainsi que de l'anhydrite. Nous nous limiterons ici au bassin de l'Atlantis II, parce que les autres bassins, comme celui du Discovery, reçoivent la saumure du premier. Les réactions y sont différentes.

Depuis le Miocène, l'Arabie et l'Afrique s'éloignent périodiquement. La fente entre les masses continentales qui en résulte, se remplit de roches basiques, apparentées aux basaltes des « mid oceanic ridges ». On a recueilli dans l'axe de la Mer Rouge des échantillons de basalte et de verre. Les activités magmatiques et volcaniques de caractère basique étant communes, on pourrait penser à première vue à une origine magmatique des minerais.

DEGENS et ROSS ont rédigé les résultats d'études détaillées et multidisciplinaires entreprises sur ces saumures chaudes et leur gîtes métallifères. Il a été ainsi démontré que la genèse était différente (fig. 2).

L'étude des isotopes démontre que l'eau provient probablement de la partie méridionale de la Mer Rouge et non loin de la surface. La composition des halogènes indique une solution de dépôts d'évaporites, qui abondent d'ailleurs dans la partie indiquée de la mer. L'eau salée a absorbé vraisemblablement en premier lieu les métaux des argiles avec lesquelles elle a été en contact pendant sa migration. Il est néanmoins possible que des laves basaltiques aient aussi contribué à la teneur en métaux. La liste en est imposante. A côté du fer on trouve comme éléments en traces le Zn, Cu, Pb, Cd, Co, ainsi que l'Ag, Mn, Ni, As, Se.

La matière organique présente dans les argiles a réduit sous la température

règnante le  $\text{SO}_4^{--}$  en  $\text{SH}^-$ . Des ions complexes de chlorures de métaux ont maintenu la solution en équilibre avec des sulfures pendant que la température était suffisamment élevée. La tension dans la zone axiale de la Mer Rouge permettait l'échappement de la solution lourde le long des fentes sur le fond de la mer. Le refroidissement causait la précipitation de sulfures métalliques, même dans les fentes avant l'écoulement.

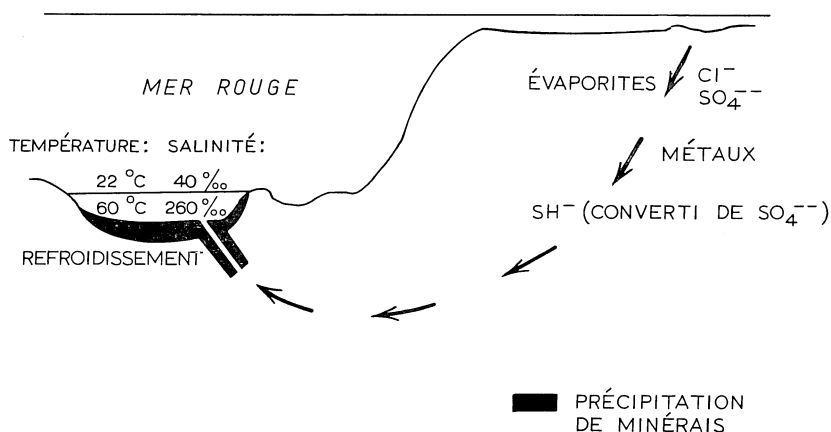


Fig. 2. — Section schématique, Fosse de l'Atlantis II dans la Mer Rouge. Dans cette figure et les suivantes, les flèches indiquent la direction du mouvement des eaux souterraines.

L'eau jaillissait très probablement à cause de la différence de gravité sur le fond de la mer, où les changements de condition provoquent la précipitation de sa teneur en métaux.

On connaît des gîtes comparables à ceux de la Mer Rouge, par exemple, à Akita au Japon, à Michipicoten, dans l'Ontario, au Canada. Les gisements stratiformes qui sont le résultat de la genèse décrite sont peu stables et apparemment souvent détruits, donnant notamment origine à des oolithes ferrugineux.

### 3. LES MINÉRAIS DE PLOMB ET DE ZINC DE PINE POINT AU CANADA (N W T)

Ils se trouvent dans les calcaires récifaux du Dévonien moyen. Un récif-barrière étendu existe dans ce qui est à présent le coin NE de la province de British Columbia à une profondeur de quelques mille mètres au pied des Rocky Mountains. Il s'étend en direction SW-NE, passant sous la région des Plaines dans toute sa largeur, vers le Great Slave Lake, où il affleure à Pine Point. Dans la partie où les calcaires récifaux sont scellés par des couches sédimentaires plus jeunes, on trouve des gisements de pétrole et de gaz naturel qu'on exploite (Rainbow, Zama etc) (fig. 3). Près de l'affleurement, il existe cette même zone poreuse et perméable remplie de blende et galène, au lieu d'hydrocarbures. L'étude des inclusions liquides dans les cristaux de blende indique que la salinité était environ 180.000 ppm et la température comprise entre 50° et 100° C lors de la cristallisation. On peut donc comparer cette solution avec l'eau innée qu'on rencontre aujourd'hui dans les gisements et qui a une salinité de

100.000 à 300.000 ppm et une température allant de 30° à 120° C (BILLINGS, KESLER et JACKSON).

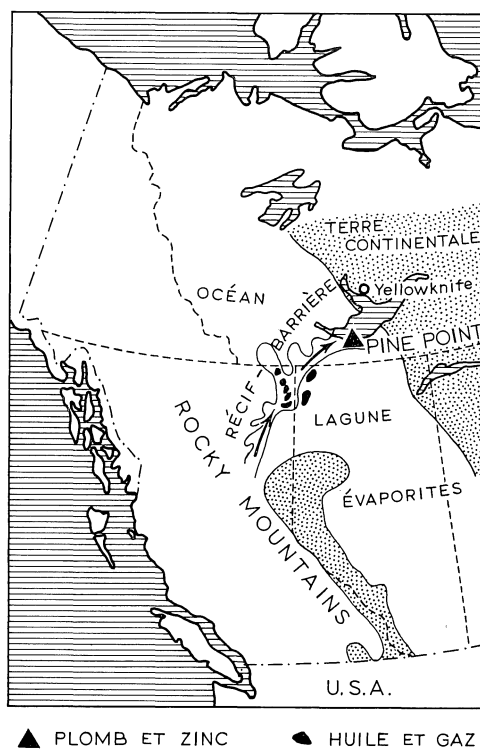


Fig. 3. — Situation paléogéographique de la zone récifale de Presqu'île (Canada) pendant le Dévonien moyen.

BEALES et JACKSON supposent que l'eau provient de formations argileuses dans le bassin sédimentaire marin au NW du récif-barrière. Les métaux sont absorbés par dissolution de la roche encaissante. Le liquide a passé par le canal des récifs à l'affleurement. Le « moteur » du déplacement des liquides fut probablement l'eau sous pression lithostatique qui s'est échappée après le chevauchement des nappes dans les Rocky Mountains (fig. 4). HITCHON a montré qu'il existe même aujourd'hui un mouvement de l'eau souterraine vers le NE et le N le long des zones récifales dans la région des plaines. Des phénomènes volcaniques sont entièrement inconnus dans la région.

La précipitation constitue un problème. BEALES et JACKSON supposent que l'eau souterraine aurait rencontré l'eau météorique de surface près de l'affleurement. Cette dernière se trouvait aussi en contact avec des formations riches en évaporites au SE de la zone récifale. Le mélange et l'action bactérienne produisant du sulfure auraient donc causé la précipitation de la blende et de la galène. Dans ce cas il semble difficile d'expliquer le remplissage des pores presque entièrement par le minéral. Une seule solution d'ions complexes de chlorures et sulfures en équilibre et une précipitation là où cet équilibre est perturbé, par exemple par refroidissement, semblent plus plausibles. Enfin, on peut calculer que tout le zinc des gisements de

Pine Point n'est équivalent qu'à deux fois la quantité se trouvant actuellement dans l'eau innée acheminée par le récif.

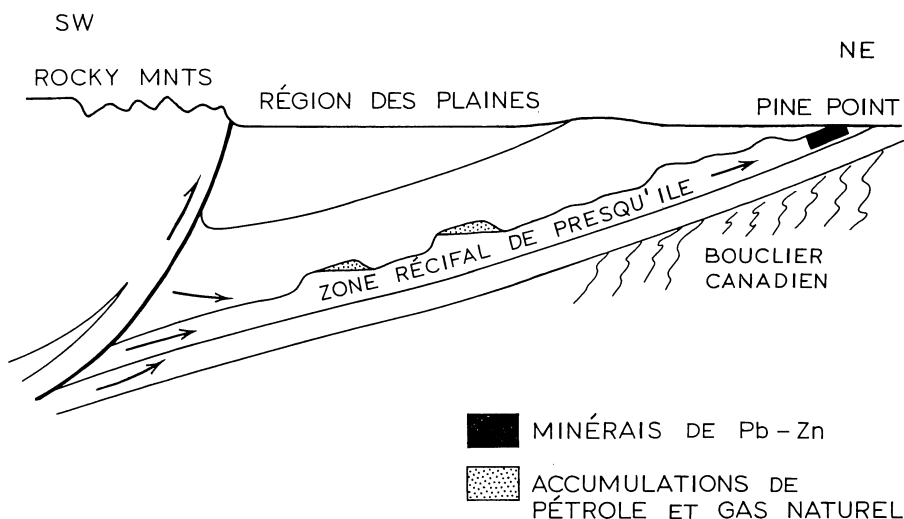


Fig. 4. — Section schématique de la Région des Plaines et de la zone récifale de Presqu'île (Canada).

#### 4. LA MINÉRALISATION DU « MISSISSIPPI VALLEY »

Il y a plusieurs gîtes de Pb-Zn comparables dans le Mid-continent des États Unis. Ils se trouvent, comme la mine de Pine Point, sur les flancs des élévations du socle — l'Ozark uplift par exemple — et dans des formations paléozoïques, souvent des calcaires et des dolomies, qui contiennent des hydrocarbures dans les bassins sédimentaires avoisnants (fig. 5). Un apport par des solutions chaudes et salées est en harmonie avec les résultats des études des inclusions liquides dans les cristaux de blende : salinité de 120.000-300.000 ppm et température de 70-135° C. La proportion de Deutérium dans le liquide est la même que dans les eaux innées du bassin pétrolifère. On peut donc imaginer que l'eau salée des formations contenues dans les bassins sédimentaires a dissous les traces métalliques. Une coulée de cette solution chaude doit s'être déplacée vers les points élevés des bords du bassin, où on rencontre les précipitations dans les gisements de galène et de blende. Récemment DOE et DELEVAUX ont démontré que la galène des mines du SE Missouri, qu'on exploite dans les dolomies de Bonneterre, provient très probablement d'une formation aquifère gréseuse sous jacente (Lamotte sst).

Sur les flancs opposés à l'orogène paléozoïque (par exemple les Ouachitas) on peut supposer l'existence de coulées en rapport avec des paroxysmes orogénétiques. Dans les bassins épicontinentaux, comme le bassin d'Illinois, des coulées souterraines sont plus difficiles à imaginer. Peut-être peut on penser à des conditions hydrodynamiques à cause de l'expulsion d'eau pendant la diagenèse des sédiments. Les températures observées dans les cristaux peuvent s'être produites dans les fonds des bassins, (Dozy) (fig. 6).

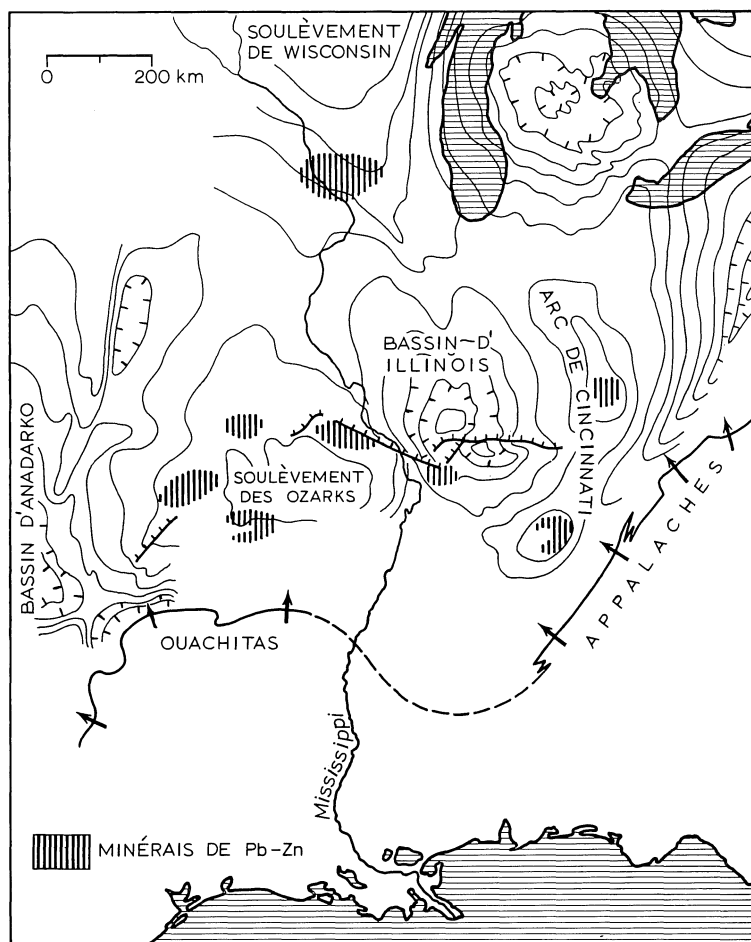


Fig. 5. — Distribution de la minéralisation du type Mississippi Valley dans le « Midcontinent » des États-Unis.

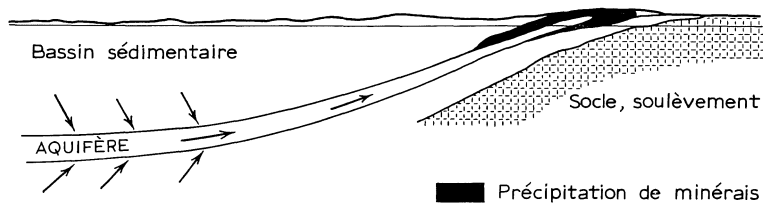


Fig. 6. — Modèle d'une genèse de gîtes du type « Mississippi Valley ».

La température dans les exemples traités jusqu'à présent, Pine Point et « Mississippi Valley », n'a pas été très haute. La source des métaux se trouve dans les mêmes bassins que la source des accumulations de pétrole de la région. Les hydrocarbures liquides ne supportent pas des températures dépassant 180° à 200° C environ, ce qui est conforme aux observations des inclusions liquides dans les minerais.

## 5. LA RÉGION GÉOTHERMALE DU « SALTON SEA » EN CALIFORNIE

Des températures plus élevées ont été observées dans une région géothermale récente près du Lac de Salton dans la Vallée Impériale, le prolongement du Golfe de Californie. On a mesuré dans un forage 300° C à 1000 m de profondeur et 360° à 2100 m (fig. 7).

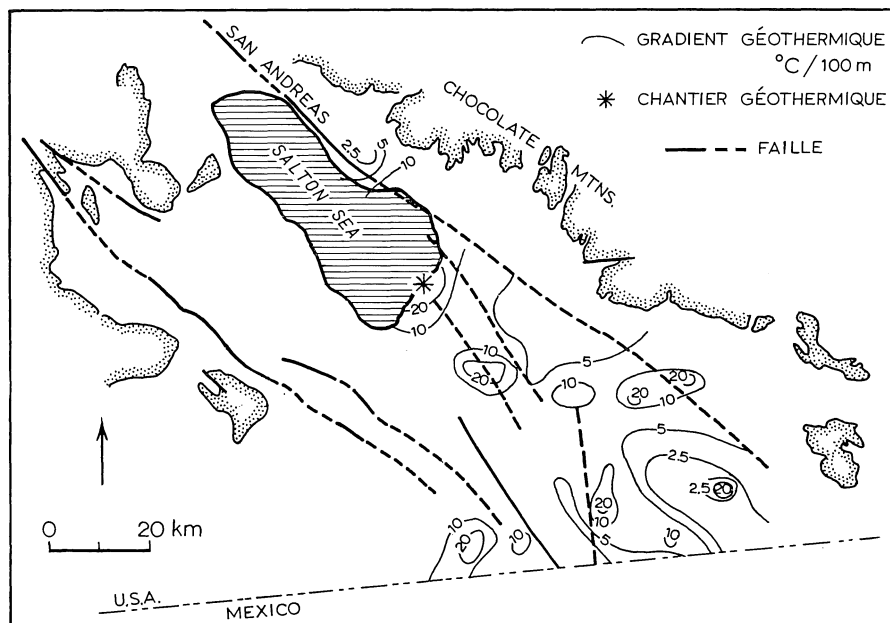


Fig. 7. — Anomalies géothermiques de la Vallée Impériale et du lac de Salton (Californie) (adapté d'ELDERS et al.).

Comme dans la Mer Rouge, il s'agit d'une région de mouvements de l'écorce terrestre. Toutefois ici le graben n'est pas rempli d'eau, mais d'environ 6000 m de sédiments, dont au moins 4000 m sont deltaïques et d'âge quaternaire ou pliocène. Dans ce milieu se trouvent quelques dômes rhyolitiques. Ce volcanisme cause une anomalie géothermique prononcée. A faible profondeur on rencontre déjà un métamorphisme du faciès de schistes verts dans les sédiments.

Des recherches isotopiques ont indiqué que l'eau est essentiellement d'origine météorique. L'apport d'une fraction magmatique n'est pas entièrement exclu. L'eau correspond à celle sortant de sources au pied des Chocolate Mnts. On peut croire avec D. E. WHITE que l'eau s'infiltré dans ces montagnes et passe par des évaporites, qui ont fourni le contenu en Cl, Na et Ca (fig. 8). La composition isotopique du Pb et du Sr indique qu'ils tirent leur origine des sédiments deltaïques. Le soufre, au contraire, pourrait être considéré comme magmatique au vu de son  $\delta S^{34}$  moyen de 1,1 ‰, mais ce n'est pas une preuve. L'acide carbonique, qui a été exploité dans le passé, se trouve dissous dans l'eau salée à faible profondeur dans une zone marginale du système géothermal. Il provient des réactions métamorphiques entre carbonates et silicates dans les sédiments deltaïques. Une faible addition de  $CO_2$  d'origine magmatique pourrait s'être produit. A la profondeur atteinte par les



forages il semble que le Fe, Mn, Zn et Hg se précipitent ou sont redistribués dans les roches réservoir, tandis que le Pb est encore faiblement dissous. Il paraît donc probable que ces métaux proviennent de sédiments plus profonds.

L'anomalie géothermale est causée par une circulation d'eau de fond maintenue par la chaleur magmatique ou volcanique (fig. 8). L'eau salée monte près de la source

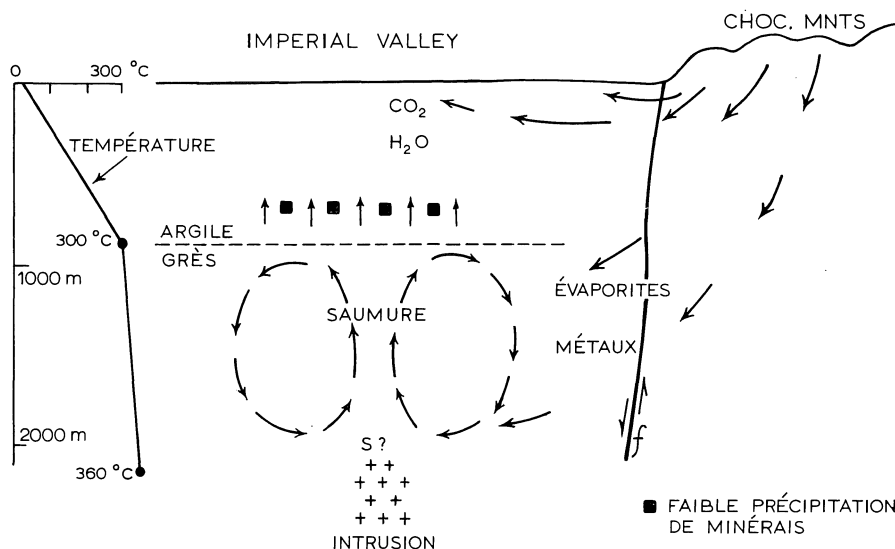


Fig. 8. — Section schématique de la région géothermique du lac de Salton (Californie).

de chaleur. Le courant descendant est dilué et moins chaud ou froid. Une telle circulation est seulement possible quand la différence de température des courants descendant et ascendant est assez forte, dans notre cas plus ou moins 200° C (fig. 9).

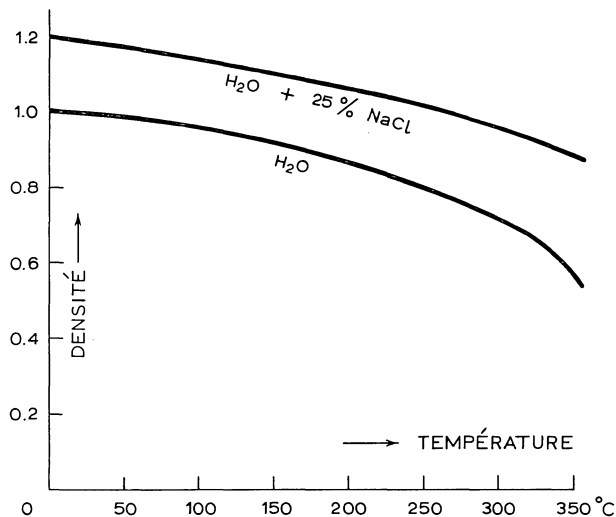


Fig. 9. — Comparaison de la densité de l'eau pure et d'une saumure sous températures différentes (D. E. WHITE).

Après 3 mois d'essais de production de la saumure, on a récupéré 8 tonnes d'incrustations siliceuses dans les tuyaux de décharge. Les métaux contenus dans la masse siliceuse étaient pour 20 % du Cu, entre 1 et 6 % de l'Ag, et en outre du Fe, S et Mn en quantités considérables. La saumure était assez riche en métaux lourds : 2000 ppm Fe, 1400 ppm Mn, 500 Zn, 90 Pb, 12 As etc. A cause d'un défaut de sulfure une partie seulement du Cu et Ag était précipitée et le Zn et Pb restaient en solution comme la plus grande partie du Fe. Dans les roches réservoir on ne rencontrait que de la pyrite en certaine quantité, avec occasionnellement une faible teneur de Zn, Cu et Pb. Il n'est donc pas question d'un gisement de minerai économique.

En résumé, nous reconnaissons au Salton Sea l'existence d'une circulation d'eau météorique, qui recueille des sels et des métaux pendant sa migration souterraine. Une source de chaleur magmatique provoque une circulation qui paraît capable de précipiter des minerais en faible quantité.

## 6. LE MINERAI PORPHYRIQUE DE CUIVRE

Il est attrayant de supposer une relation entre les phénomènes que nous venons de décrire et le minerai porphyrique de cuivre. Ces gisements de cuivre disséminé consistent en général en une intrusion de monzonite à quartz de forme cylindrique verticale et de coupe circulaire ou ovale (fig. 10). La transition par une zone méta-

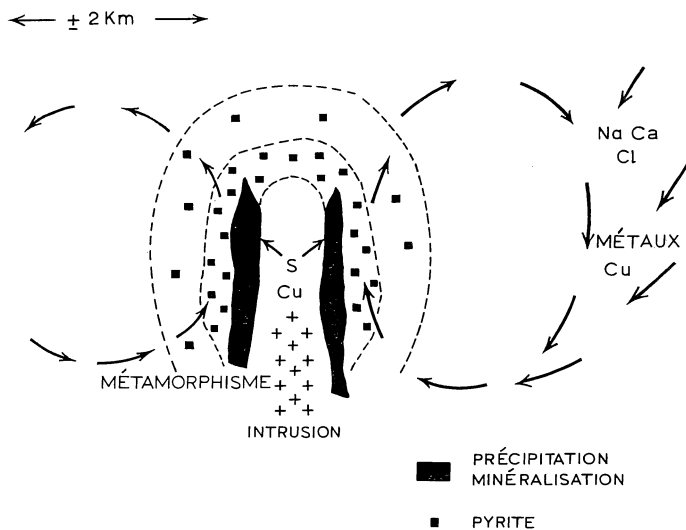


Fig. 10. — Coupe schématique d'un gîte de minerai porphyrique de cuivre du type San Manuel-Kalamazoo.

morphique vers la roche sédimentaire encaissante est graduelle. Les dimensions sont en général du même ordre de grandeur, le diamètre de l'ensemble étant de 1000 à 2000 m. Le gisement a la forme d'un tuyau redressé, dont les parois ont une épaisseur de 180 m; il se trouve dans la zone métamorphique entourant approxi-

mativement le noyau intrusif. On a calculé une température de 580 à 390° C pour le métamorphisme potassique (orthoklase et biotite) à l'intérieur de la zone de minéralisation du cuivre, et de 390° à 285° pour la zone extérieure caractérisée par la séricite. (LOWELL et GUILBERT). La dernière correspond aux observations faites dans les forages de Salton Sea.

La minéralisation est zoniforme et concentrique. La masse centrale contient 0,5 % de cuivre disséminé, le « tuyau » 0,5-1 % de Cu avec de fins filons de pyrite. Dans la zone extérieure le contenu en cuivre diminue jusqu'à 0,1 %, tandis que le pyrite y abonde surtout dans des veines.

SHEPARD, NIELSEN et TAYLOR ont montré que la partie centrale seule a été métamorphosée sous l'influence de l'eau magmatique de l'intrusion, tandis que la zone extérieure est caractérisée par l'action de l'eau météorique. Le gisement cuprifère se trouve donc dans la zone de transition. On croit que des différences de pH, température, salinité entre les deux liquides qui s'y mélangeaient ont causé la précipitation du cuivre. Le soufre pourrait être d'origine magmatique comme à Salton Sea. L'origine des métaux est incertaine. Le cuivre peut être d'origine magmatique, mais un apport par l'eau météorique n'est pas exclu non plus. Quoi qu'il en soit, la circulation d'eau météorique paraît essentielle à l'accumulation du minerai et cette eau riche en Na, Ca et Cl a sans doute aussi apporté des métaux en solution.

#### 7. LE QUARTZ AURIFÈRE DE YELLOWKNIFE

On peut se demander encore comment des gisements épigénétiques hydrothermaux en relation plus intime avec des batholites granitiques, cadrent avec les cas décrits jusqu'à présent.

BOYLE a étudié la minéralisation d'or dans la région de Yellowknife sur le Great Slave Lake dans les Territoires du Nord-Ouest Canadien (fig. 3). Il en a fait un grand nombre d'analyses géochimiques, ainsi que des roches encaissantes. Un massif de granite se trouve en discordance dans une série métamorphique de faciès amphibolitique allant jusqu'au schistes verts. Cette série est composée de roches éruptives basaltiques, de tuffs, grauwackes et d'autres sédiments d'âge archaïque. Le granite anatexique est accompagné de filons de pegmatite.

Il existe dans la série métamorphique des zones de cisaillement qui contiennent à certains endroits des filons ou des traînées de quartz avec de l'or et des minerais. Selon la conception classique le quartz et l'or émaneraient du magma granitique intrusif. Des liquides hydrothermaux les auraient déposés dans des fentes de la roche encaissante où ils circulaient.

BOYLE a démontré que le métamorphisme régional n'a pas changé essentiellement la composition chimique des roches originales, sauf le contenu en matière volatile (fig. 11). En s'éloignant du grandiorite la teneur en H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et S augmente partout régulièrement dans les faciès métamorphiques consécutifs : amphibolitique, épidote — amphibolitique et schiste vert. Les pegmatites et le granite encaissant, au contraire, en ont une teneur extrêmement faible. Il est donc peu probable que la matière volatile ait son origine dans les granites et on peut supposer qu'elle faisait partie des roches encaissantes originelles.

La concentration en matières volatiles dans la zone de cisaillement y a donné naissance à la séricite, à la chlorite, à l'ankérite et à d'autres carbonates. Une diminution de la teneur en SiO<sub>2</sub> fut le résultat de ces réactions. Le quartz s'est concentré

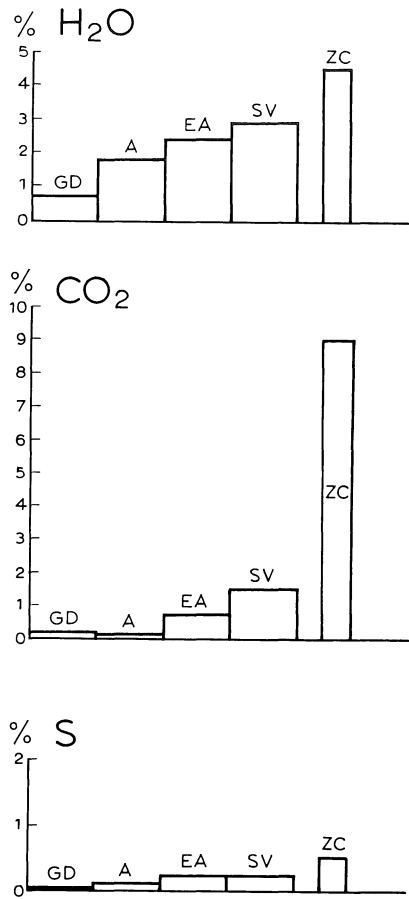


Fig. 11. — Teneur moyenne en eau, acide carbonique et soufre, du granodiorite (GD), des faciès métamorphiques amphibolitique (A), épidote-amphibolitique (EA) et schiste vert (SV), et des zones de cisaillement (ZC) de la région de Yellowknife N.W.T. Canada (BOYLE).

dans des filons souvent lenticulaires. Le quartz et les sulfures ont entraîné des métaux, éléments en traces, comme l'or, dont les atomes ne pouvaient être incorporés dans l'assemblage nouveau des minerais. Le quartz des filons ne représente qu'un quart de la quantité de quartz disparu de la zone de cisaillement. Le reste s'est échappé par les zones tectonisées entraînant une partie des métaux mobilisés (fig. 12).

Il est évident qu'un apport étranger du quartz aurifère, par exemple à partir du granite, aurait causé un enrichissement au lieu d'un décroissement en SiO<sub>2</sub> dans la zone en contact avec les filons de quartz.

On a constaté que tous les éléments de la minéralisation sont présents dans la roche encaissante normale. L'abondance est plus que suffisante pour expliquer leur concentration dans les gîtes de minerais. Ainsi le contenu en or, d'un volume de roche normale équivalent à une zone de cisaillement, est trois fois plus grand que la quantité totale des gisements d'or de la zone.

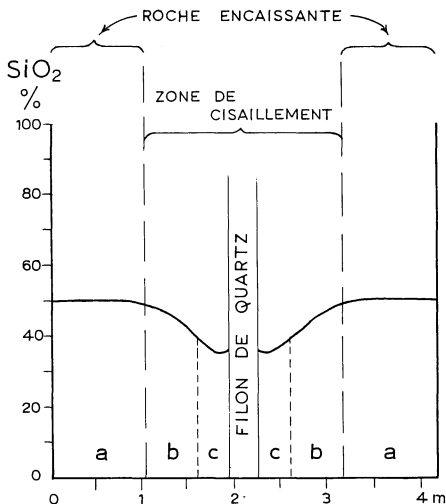


Fig. 12. — Teneur en SiO<sub>2</sub> d'une section typique d'une zone de cisaillement avec filon de quartz. Yellowknife N.W.T. Canada (BOYLE).  
 a = greenstone; b = schistes à chlorite; c = schistes à carbonate et chlorite et schistes à carbonate et séricite.

On rencontre les filons de quartz aurifère avec des minerais surtout dans les inflexions des zones de cisaillement, dans les charnières et autour de masses résistantes (fig. 13). Ce sont des endroits où le déplacement tectonique a causé une certaine réduction de pression.

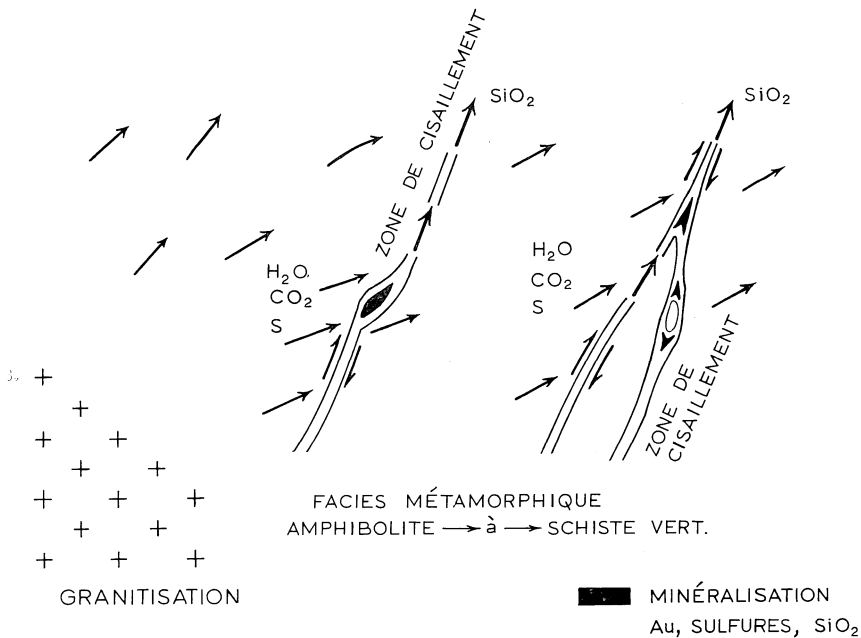


Fig. 13. — Coupe schématique indiquant le déplacement de l'eau et d'autres matières volatiles devant une granitisation type Yellowknife.

Dans notre dernier exemple la quantité d'eau n'était que le faible reste présent dans les roches métamorphosées. Il fût déplacé par l'avancement d'un front d'un métamorphisme plus intense. L'eau a enlevé certains éléments, les a redistribués et déposés là où un nouvel équilibre chimique et minéralogique le permettait. Il est peu surprenant que la composition isotopique du soufre confirme son origine dans les roches métamorphosées encaissantes.

## 8. CONCLUSIONS

Les exemples de minéralisation hydrothermale que nous avons traités laissent encore beaucoup de questions en suspens. Néanmoins certains faits apparaissent clairement.

1. Les éléments des gisements de minerais proviennent dans leur majorité de roches — y compris de roches volcaniques — des bassins sédimentaires. On y cherchera leur « roche mère ».
2. L'eau souterraine en général salée et d'origine innée, météorique ou océanique, emmène les éléments métalliques en solution et permet la migration.
3. Il y a plusieurs « moteurs » pour déplacer les solutions : des gradients hydrodynamiques (affaissement, différences de gravité ou de température), géodynamiques (tensions orogéniques), géothermiques (chaleur magmatique, métamorphisme) etc.
4. L'accumulation sélective par précipitation peut être conçue comme le résultat d'un déséquilibre chimique : refroidissement, changement de pH et Eh, mélange de solutions différentes.
5. Le rôle du plutonisme est modeste et rarement essentiel comme pourvoyeur des éléments ou de l'eau dans les exemples traités. On rencontre des sources magmatiques, mais j'ai l'impression qu'elles font plutôt exception à la règle.
6. En étudiant les gîtes hydrothermaux il est donc souhaitable de tenir compte des roches encaissantes et de leur composition géochimique, ainsi que des relations géologiques en général. Les géologues du pétrole envisagent de la même manière leur problème.

En conclusion — et en simplifiant les détails — on peut reconnaître l'existence d'un cycle dans les modèles décrits (fig. 14). On distingue initialement une augmentation de la température ou de la profondeur des sédiments et de l'eau. Pendant cette phase descendante différents éléments se dissolvent. En profondeur des déplacements de liquide peuvent avoir lieu comme conséquence de mouvements tectoniques, de métamorphisme, de diagenèse etc. Après dépassement d'une température maximale, il se produit un mouvement ascendant, par exemple par suite de l'érosion. Pendant cette phase, des précipitations et accumulations se font en différents endroits, selon l'équilibre chimique des ions en solution et les températures. La dernière précipitation, semble-t-il, prend place près de la surface, peut-être en contact avec l'eau météorique douce.

Le caractère de chaque cycle est déterminé par la profondeur, la température maximale et la quantité d'eau.

L'image donnée n'est probablement pas exclusivement valable. On peut sans doute concevoir d'autres modèles pour expliquer la genèse de certains gîtes hydrothermaux. Il s'agit plutôt d'un « Leitmotiv » parmi d'autres dans la symphonie génétique des gîtes de minerais.

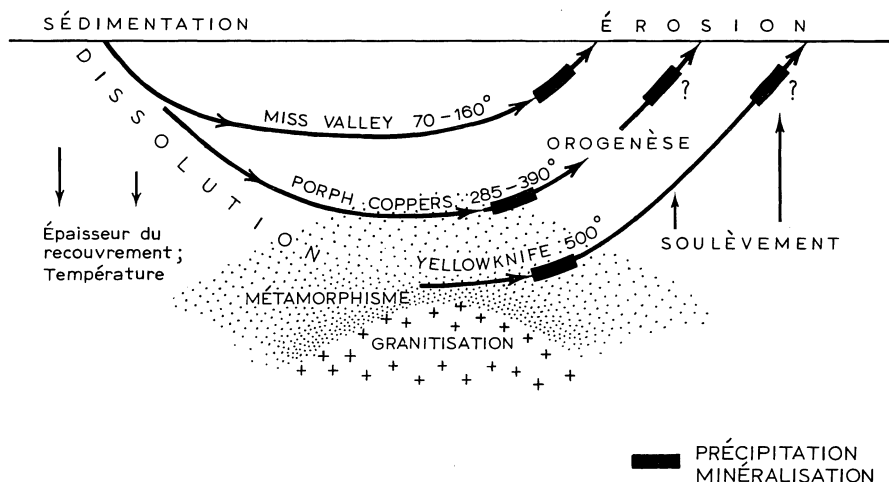


Fig. 14. — Modèle schématisé simplifié de la genèse de quelques gisements de minerais hydrothermaux selon le déplacement de liquides innés.

Ne perdons point de vue qu'une couche de sédiments ayant une épaisseur de 10 mètres et une trentaine kilomètres de côté contient une quantité de métal très grande. La dissolution et la concentration d'un dixième seulement de la teneur moyenne représenterait déjà, selon CLARKE, un gisement de 100.000 tonnes environ de cuivre métallique, ou le double de zinc. C'est équivalent à la réserve d'une mine assez grande. Nos bassins sédimentaires et leur contenu sont en réalité beaucoup plus vastes.

#### LITTÉRATURE

- BÄCKER H., 1971. — Das aktuelle Interview : Kupfer und Zink im Roten Meer. *Umschau*, Heft 19, p. 707.
- BEALES F. W. et S. A. JACKSON, 1966. — Precipitation of lead-zinc ores in carbonate reservoirs as illustrated by Pine Point ore field, Canada. *Transactions/Section B, Inst. Mining and Metallurgy*, B 278-285.
- BEALES F. W. et S. A. JACKSON, 1968. — Pine Point, a stratigraphical approach. *The Canadian Mining and Metallurgical (C.I.M.) Bulletin*, Vol. 61, No. 675, July 1968, p. 503-512.
- BILLINGS G. K., S. E. KESLER et S. A. JACKSON, 1969. — Relation of Zinc-rich Formation Waters, Northern Alberta, to the Pine Point ore Deposit. *Econ. Geol.* Vol. 64, p. 385-391.
- BOYLE R. W., 1959. — The geology, geochemistry and origin of the gold deposits of the Yellowknife district. *Geol. Survey of Canada, Memoir* 310, 187 pag.
- DEGENS E. T. et D. A. ROSS, 1969. — Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea. Springer Verlag.

- DOE B. R. et M. H. DELEVAUX, 1972. — Source of Lead in Southeast Missouri Galena Ores. *Econ. Geol.* Vol. **67-4**, p. 409-425.
- DOZY J. J., 1970. — A geological model for the genesis of the lead-zinc ores of the Mississippi Valley, U.S.A. Transactions Section B, Institution of Mining and Metallurgy, Vol. **79**, pag. B. 163-170.
- ELDERS W. A., R. W. REX, T. MEIDAV, P. T. ROBINSON et S. BIEHLER, 1972. — Crustal spreading in Southern California. *Science*, Vol. **178**, No. 4056, p. 15-24.
- ELLIS A. J., 1967. — The chemistry of some explored geothermal systems. In : H. L. BARNES (editor) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Holt, Rinehart and Winston, New York-London. p. 465-504.
- ELLIS A. J., 1969. — Present day hydrothermal systems and mineral deposits. Paper 7, Ninth Commonwealth Mining and Metallurgical Congress. London.
- HITCHON B., 1963. — Composition and movement of formation fluids in strata above and below the Pre-Cretaceous unconformity in relation to the Athabasca Oil Sands. The K. A. Clark volume, Research Council of Alberta, *Information Series* No. **45**, p. 63-74.
- KRAUSKOPF K. B., 1967. — Source rocks for metal-bearing fluids. In : H. L. BARNES (editor) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Holt, Rinehart and Winston, Inc. New York-London, p. 1-33.
- LOWELL J. D. et J. M. GUILBERT, 1970. — Lateral and vertical alteration-mineralisation zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.* Vol. **65**, No. **4**, p. 373-408.
- SHEPPARD S. M. F., R. L. NIELSEN et H. P. TAYLOR JR., 1971. — Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Econ. Geol.* Vol. **66-4**, p. 515-542.
- WHITE D. E., 1968. — Environments of generation of some Base-Metal Ore Deposits. *Econ. Geol.* Vol. **63-4**, p. 301-335.