

BULLETIN
de
L'A.M.I.S.

Numéro 49-50

2^{ème} trimestre 2006

Des gisements de métaux et des hommes
Souvenirs géologiques et universitaires

Pierre Routhier

(Conférence donnée dans le cadre des A.M.I.S le 15 octobre 2005)

Le texte que voici est surtout destiné à combler les plus grosses lacunes de mon exposé du 15 octobre 2005 auquel, de crainte d'être trop professoral, j'ai laissé la liberté d'un "salmigondis". Pour un exposé plus ordonné le meilleur plan paraît être celui qui a servi de trame à mes livres.

J'ai écrit deux gros ouvrages sur les gisements de métaux :

Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherche (2 volumes, 1282 pages !), Masson, 1963) et

Où sont les métaux pour l'avenir ? Les provinces métalliques. Essai de métallogénie globale (BRGM, 1980, version anglaise 1983).

Le premier m'a coûté neuf ans de veilles dont je fus récompensé par ce que les gens de science appellent "notoriété internationale", la mienne dura au plus une quinzaine d'années. Le deuxième ouvrage, beaucoup plus novateur, ne m'a coûté que cinq ans d'efforts, dont je ne fus récompensé que par l'attention de quelques grands praticiens de l'exploration minière tandis que les géologues qui écrivent dans les revues savantes faisaient silence.

Le même sort était déjà advenu à mon "*Essai critique sur les méthodes de la géologie*" (Masson, 1969), petit livre impertinent dont quelques mandarins de l'époque, qui s'y sentaient visés, s'empressèrent de ne pas parler à leurs étudiants. Ces expériences et quelques autres m'ont conduit à des réflexions - plus rigolardes qu'amères - sur certains comportements de la gent scientifique, réflexions que j'ai sacrifiées dans mon exposé oral.

Aujourd'hui ces livres sont épuisés ; on ne peut les consulter que dans les bibliothèques universitaires et de recherche. Après ma retraite en 1984 je n'ai jamais ressenti l'envie d'en préparer une deuxième édition et je me suis allégrement lancé dans la vulgarisation, la vraie, celle qui entraîne le lecteur dans le mouvement des découvertes. Pour *Les Conquérants du métal*, recueil de nouvelles échelonnées sur 8000 ans, je n'ai pas trouvé d'éditeur, mais *Voyage au monde du métal. Inventions et aventures* (Belin, 1999) a rencontré un bon succès.

Commençons par quelques précisions sur deux grands thèmes qui ont agité la métallogénie à partir des années **1950** et ont imprégné mon premier livre :

1) importance de la sédimentation dans la genèse de nombreux gisements, syngénèse 2) naissance d'une typologie des gisements.

Sédimentation, syngénèse

Les gisements "liés aux strates" et stratiformes ne se sont pas formés par remplacement progressif de roches sédimentaires pénétrées par des solutions hydrothermales. Les éléments chimiques qui les constituent se sont installés dans des sédiments avant leur lithification. Ces gisements ne sont donc pas "épigénétiques" (de épi : après) mais "syngénétiques" (de syn : avec, en même temps que). Plus exactement on dira "syn-diagénétiques" parce que, pendant la diagenèse - c'est à dire pendant la transformation d'un sédiment en roche sédimentaire par perte d'eau, compaction, cimentation - ont lieu des néoformations minérales qui influent sur la composition minéralogique du minéral.

Les preuves de syndiagenèse sont très souvent empruntées à la sédimentologie, discipline qui prit son essor avec le traité américain de Krumbein et Sloss en **1951**. Suivant les cas, ces preuves sont :

a) *des figures de sédimentation* où l'on peut lire une chronologie. Ainsi, sur la *figure 1* on voit, dans des quartzites minéralisés, des plis n'affectant que le niveau moyen. Ces plis sont forcément antérieurs au dépôt du niveau supérieur, qui les tronque et n'en est pas affecté. Ils sont nés par glissement (slumping) sur une pente sous-marine de sédiments encore meubles contenant déjà des sulfures. Tout est resté dans l'ordre stratigraphique et la naissance des sulfures eut lieu avant la lithification complète.

Fig. 1. Mine de zinc et plomb Sullivan (Colombie britannique), une preuve de syngénèse Coupette relevée le 4 sept. 1970. Sphalérite et galène dans couches détritiques d'âge précambrien supérieur. Jusqu'à 1969 la mine avait produit 15 millions de tonnes métal, zinc et plomb en quantités à peu près égales.

Dans le même secteur de la mine j'ai observé des injections de vase minéralisée dans des fractures d'extension de lits minéralisés : preuve de mobilité du sédiment minéralisé tant qu'il était gorgé d'eau.

Dans cette mine je fus fraîchement reçu mais réconforté par la découverte de ce slumping qui démolissait la théorie officielle (épigénétiste). Puis, à

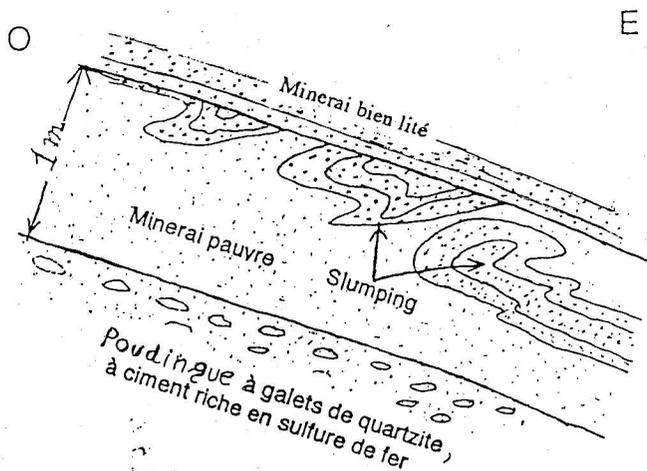


Fig.1 Mine de zinc et plomb Sullivan (Colombie britannique), une preuve de syngénèse

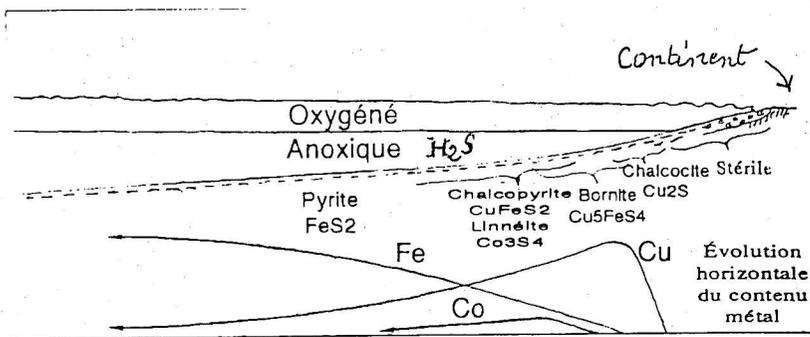


Fig.2. Zonalité paléogéographique dans les gisements de cuivre de Zambie

quelques kilomètres de là, par l'accueil enthousiaste d'un basset d'Artois qui tint à me prouver qu'en Colombie britannique on pouvait rencontrer des êtres hospitaliers !

A propos de cette figure 1 j'ai oublié de dire que les métaux, zinc et plomb, ont été introduits dans un bassin marin par des venues hydrothermales, attestées par la minéralogie d'autres parties du gisement. Celui-ci peut donc être qualifié d'*hydrothermal-sédimentaire* : hydrothermal par l'apport, sédimentaire par le mode de dépôt. Des floppées de gisements sulfurés stratiformes sont dans ce cas.

b) une zonalité chimique et minéralogique à partir d'un ancien rivage

Zonalité en accord avec les domaines d'équilibre des minéraux de basse température en fonction du pH et du Eh (potentiel d'oxydo-réduction), connaissance introduite par l'ouvrage de géochimie des Américains Krumbain et Garrels, en **1952**.

Curieusement, la plupart des métallogénistes et géologues miniers américains n'en tirèrent pas parti et restèrent encore longtemps accrochés à la bible épigénéliste de Waldemar Lindgren (dernière édition en 1940).

Exemple : dans les gisements de cuivre de Zambie et du Shaba (République Dé. du Congo, ex Zaïre, ex Congo belge), quand on s'éloigne d'un ancien rivage la teneur en cuivre diminue, et corrélativement la teneur en fer augmente. La composition minéralogique du minerai varie donc latéralement : les sulfures les plus riches en cuivre sont les plus proches du paléorivage (*figure 2*). Explication en langage simple : l'affinité du cuivre pour le soufre est plus forte que celle du fer. Noter la présence d'un peu de cobalt, que j'avais oublié de mentionner.

Fig.2. *Zonalité paléogéographique dans les gisements de cuivre de Zambie*

Principalement d'après W.Garlick, 1976.

Ces gisements d'âge précambrien supérieur ont été intensément plissés peu après leur dépôt. Plus à l'ouest, au Shaba (ex Katanga) ils ont même été charriés ; le fameux site minier de Kolwezi est dans un lambeau de nappe. On conçoit que les reconstitutions paléogéographiques aient demandé un long travail. Longue de 600 kilomètres, la ceinture cuprifère Zambie- Shaba a longtemps produit au moins 15% du cuivre mondial et n'avait pour équivalent que le Chili. Aujourd'hui, du côté congolais, hélas !....

Ainsi orientée, cette zonalité prouve que l'apport métallique dans le bassin marin eut lieu dans la zone de rivage et non au large. Quantaux *sources* de cet

apport deux hypothèses sont possibles : altération et lessivage superficiels de la masse continentale adjacente, ou montée d'eaux thermales par des fractures bordières du bassin (non placées sur la figure). La deuxième hypothèse a été défendue par Hubert Pélissonnier, professeur à l'Ecole des Mines de Paris, notamment dans son ouvrage posthume *Réflexions sur la métallogénie* (2002), mais elle n'exclut pas la première, car en Zambie on a identifié des grains de sulfures de cuivre roulés provenant du paléo-continent voisin.

Quelle que soit l'hypothèse adoptée le cuivre a forcément été "hérité" de terrains plus anciens que les couches porteuses. Cette notion d'*héritage*, que j'ai exaltée dans mon livre de 1980, a été et reste étonnamment sous-estimée. En feuilletant la revue "Mineralium Deposita" on ne déniche que rarement le mot "inheritance", même quand les auteurs se sont échinés à hypothétiser sur les sources des métaux et du soufre.

c) Autre preuve de syngénèse, celle-ci non sédimentologique et géochimique : *un gisement stratiforme plissé s'est formé avant la phase de plissement qui l'affecte, ou avant la première phase s'il en a subi plusieurs*. Ce n'est qu'une lapalissade et pourtant, si elle a été acceptée pour de nombreux gisements plissés comme ceux de la ceinture Zambie-Shaba, elle ne s'est pas encore imposée partout !

En voici un exemple frappant : le gisement de *Morro Velho* (Brésil), qui a produit 470 tonnes d'or depuis 1834, date de son ouverture par des Anglais, jusqu'à sa fermeture en 1999. J'ai visité cette mine pendant l'été 1968 (après la "chienlit", dixit De Gaulle) en compagnie de mon très bon élève brésilien Ronald Fleischer. Nous y vîmes le minerai suivre tous les plis et microplis très serrés de sa couche-porteuse de carbonate magnésien et ferrugineux. Néanmoins, la théorie "officielle" s'obstinait à soutenir que le fluide hydrothermal apporteur de sulfures aurifères serait monté *après* le plissement de la couche carbonatée, s'y serait insinué et en aurait suivi tous les replis dans leurs moindres détails. Prodige de dynamique des fluides et de conservation de la chaleur !

Plus tard un autre géologue brésilien, Eduardo Ladeira, a procédé à l'analyse structurale du gisement et de son enveloppe. Il a reconstitué la succession suivante : volcanisme basique sous-marin, puis venues hydrothermales sous-marines qui ont déposé carbonate et minerai, puis plissement à - 2,5 milliards d'années Cette succession est donc d'âge archéen. Syngénétique, le gisement

appartient à un modèle bien représenté dans d'autres "boucliers" archéens, notamment au Canada..

Ladeira a proposé cette reconstitution à la revue "Economic Geology", qui l'a refusée. Plus tard, dans un volume de "Mineralium Deposita" consacré aux gisements d'or du Brésil, presque tous les contributeurs sont revenus à l'épigenèse ! Enfin, dans un livre sur l'ensemble des gisements métallifères du même pays, un géologue jadis français, qui fut (sans doute modérément...) mon élève, a lui aussi entonné le même refrain rétrograde. A l'aube du 21ème siècle, après cinquante ans de travaux soignés dans plusieurs nations, on en reste pantois !

Moralité : en science, en tout cas dans celle à laquelle je me suis adonné, on peut assister à une régression ! Comme beaucoup d'autres chercheurs j'avais observé des escamotages de priorités et quelques étouffements par le silence, mais je n'ai découvert ce cas de régression qu'après ma retraite en 1984.

Quand on est sorti de l'arène scientifique, mieux vaut en général n'y pas revenir en pépé grognon ou flingueur, n'est-ce-pas ? Si je le fais aujourd'hui, la responsabilité en revient à Jacques Geysant, qui a pris le risque de m'inviter. Faut-il alors s'attendre à un rebondissement polémique ? C'est fort improbable car, sauf accident, aucun des métallogénistes actuellement dans l'arène ne lira ce texte doublement négligeable, puisque publié dans une revue non internationale et écrit en français, langue quasiment "morte" aux yeux des scientifiques dans le vent.

Naissance d'une typologie des gisements

Jusque vers 1950 on a classé la plupart des gisements suivant leur température de dépôt, décroissante quand on s'éloigne du magma générateur, réel ou hypothétique. La thermométrie géologique était encore dans l'enfance et l'on se contentait des mots orthomagmatique, pneumatolytique et hypo, méso, épithermal. Ne tenant guère compte de l'anatomie des gisements et du milieu géologique dans lequel ils se sont déposés, cette classification mono-paramétrale n'avait quasiment aucun pouvoir prédictif.

Au lieu d'une classification dite "génétique" fondée sur les variations d'un seul facteur il fallait construire une typologie. En comparant de nombreuses descriptions de gisements et de leurs enveloppes, on tenterait de réduire leur grande variété à un petit nombre de modèles anatomiques ou *types* L'anatomie

étant une des clefs de la physiologie des organismes, on comprendrait sans doute mieux la genèse des gisements.

On peut élaborer une typologie pour chaque métal. Cette étape fut inaugurée en 1952, au Congrès géol. internat. d'Alger, par Fernand Blondel, ingénieur du Corps des Mines, qui présenta les types de gisements de fer du monde. Je poursuivis cet effort en donnant, dans mon livre de 1963, des tableaux de types pour les principaux métaux. C'était le résultat d'un travail réalisé dans un séminaire de troisième cycle au laboratoire de géologie appliquée de la Faculté des Sciences de Paris, avec l'aide de Henri Rouvier, alors assistant.

Travail très répétitif car un même modèle anatomique peut renfermer des métaux différents. Une meilleure typologie doit donc placer en première ligne l'anatomie plutôt que le contenu métal. Or, les données n'étaient pas encore tout à fait mûres ; des descriptions de types de gisements étayées sur de nombreux exemples n'apparurent que quelques années plus tard.

Ce fut d'abord, au milieu des années 1960, le type " *amas sulfurés* (massive sulfide deposits) *associés à un volcanisme sous-marin généralement acide* , type établi à partir de dizaines d'exemples du Canada, découverts "en rafale" par une intense exploration du bouclier archéen de ce pays.

Notons en passant que la connaissance du Précambrien, encore très rudimentaire et souvent très erronée vers 1950, prit son essor grâce à cette exploration et aux rapides progrès des radio-datations.

On s'aperçut vite que ces gisements âgés d'au moins 2,5 milliards d'années étaient identiques aux gisements japonais dits "kuroko" (minerai jaune), d'âge miocène, et que rares sont les orogènes de tous âges qui en sont dépourvus. Ceux du sud de l'Ibérie (Rio Tinto, etc) sont d'âge carbonifère. C'est une belle illustration du principe "uniformitariste".

A propos de sa très vaste distribution dans le temps géologique, j'ai oublié de rappeler que ce type est également *actuel*, représenté par les cheminées ou "smokers" des fonds océaniques ; avec cette réserve qu'ici le volcanisme acide est absent. Plus on en découvre et plus on s'aperçoit que ces gisements très jeunes ou en cours de formation peuvent renfermer de gros tonnages de minerai riche, dont l'exploitation n'est pas pour demain.

Figure 3 *Le type amas sulfuré.*

"Hydrothermal-sédimentaire" par excellence Dispositif centré ; il peut être excentré, l'amas étant séparé de la cheminée parce que l'eau chaude minéralisée arrivant par celle-ci s'est écoulée latéralement vers des bas-fonds du bassin marin.

Zonation verticale : dans l'amas avec beaucoup de pyrite, de bas en haut : chalcopyrite puis sphalérite, galène et parfois barytine ; dans la cheminée altération hydrothermale (beaucoup de chlorite), pyrite et chalcopyrite.

Ce type fournit environ un dixième du cuivre mondial (estimation peut-être à réviser), ainsi que beaucoup de zinc et d'or.

Le type '*porphyry*' (*figure 4*), qui grouille surtout à la périphérie de l'Océan Pacifique, ne fut, après de nombreuses études, complètement dépeint qu'en 1972, bien que l'exploitation de plusieurs de ses champions ait commencé longtemps avant, par exemple à Chuquicamata (Chili) en 1917.

Fig.4. Le type porphyry (ou apical associé à intrusions acides)

Doigt de gant vertical ; le diamètre de sa section horizontale peut atteindre plusieurs kilomètres ; zones concentriques d'altération hydrothermale affectant granites, granodiorites et/ou des laves andésitiques pénétrées par ces roches intrusives. Les zones de minéralisation, avec une 'coque'(shell) plus riche que le cœur, sont également bien centrées. On peut donc tirer 'à la cible' à partir d'une zone hydrothermale extérieure au minerai, repérée à l'affleurement ; donc découvrir des gisements 'aveugles'. Ce type fournit surtout du cuivre (copper porphories), du molybdène, de l'or, plus rarement de l'étain (tin porphories, Bolivie). Pour le cuivre, les teneurs sont souvent trop basses pour être exploitables et ne le deviennent que par altération superficielle (enrichissement 'supergène' par cémentation) ; à Chuquicamata la teneur de 1% du minerai primaire a été ainsi élevée à 2,5%. L'âge des représentants de ce type varie surtout depuis le Trias, à partir du début de la tectonique des plaques moderne et du fonctionnement des plans de subduction à la périphérie du Pacifique, jusqu'à presque actuel ; certains se sont mis en place après l'apparition de l'homme ! il en est de paléozoïques. Les exemples précambriens paraissent en quelque sorte 'avortés' (affaire de rhéologie des plaques ?)

N'accumulons pas plus longtemps des descriptions de types. Ajoutons seulement que la typologie, apparue très tardivement, a complètement rénové la métallogénie et qu'elle guide souvent la recherche minière.

Une question se pose : combien de types faudrait-il pour englober tous les gisements connus ; une vingtaine ou plus ?

Je me suis posé de nouveau cette question récemment en écoutant, lors du 40^{ième} anniversaire de l'Union française des Géologues, un exposé sur les très riches gisements d'uranium du bassin de l'Athabaska (Canada) ; apparemment ils ne se rallient pas à un type connu par ailleurs.

Ou encore, le gisement d'étain de Renison Bell en Tasmanie (*Figure 5*), dans des dolomies non métamorphisées, sans pluton granitique proche, gisement que j'ai qualifié d''*énergumène*', est-il unique ou a-t-il des analogues ailleurs ?

Fig.5. Renison Bell (Tasmanie)

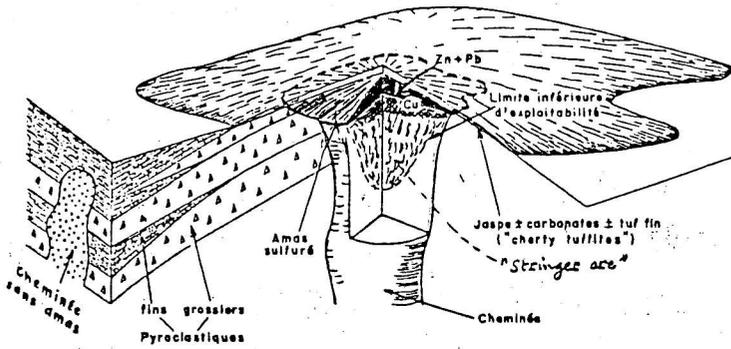


Fig. 3. Le type amas sulfuré

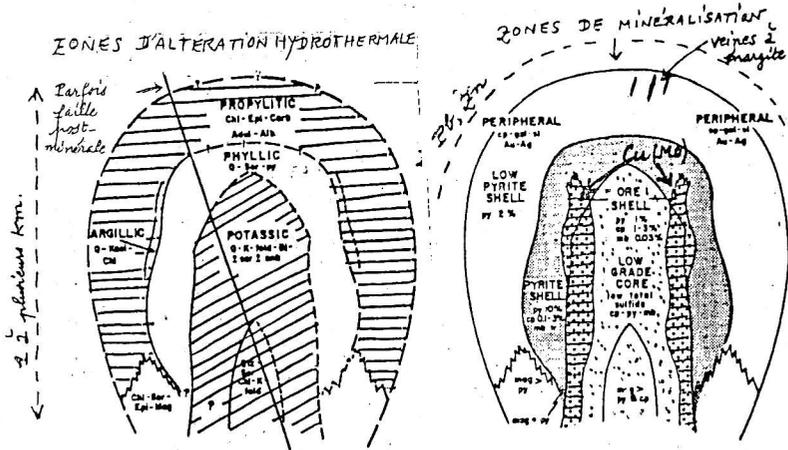


Fig.4. Le type porphyry (ou apical associé à intrusions acides)

En 1976 (25^{ème} Congrès géol.international en Australie), c'était une accumulation de plus de 200000 tonnes d'étain dans un minerai à teneur exploitable, donc un mastodonte pour ce métal. La cassitérite y est à grain très fin (5 à 200 microns). Personne – semble-t-il – n'a eu l'astuce de proposer une origine sédimentaire chimique et d'examiner les conditions géochimiques de transport de l'étain dans des eaux superficielles.

Dernière remarque : pour autant que j'en puisse juger équitablement, l'esprit typologique semble n'être plus assez cultivé. Mineralium Deposita est aujourd'hui presque exclusivement rempli d'études géochimiques très 'pointues', notamment isotopiques, où l'on discute de la genèse de tel ou tel gisement, mais on n'y voit guère de tentatives pour les intégrer à une typologie. Ce que j'ai jadis appelé les 'synthèses étagées' manque ici cruellement. Au total ces travaux très complexes paraissent souvent des "bazookas pour tuer des mouches" ! Or, ils sont très onéreux alors que les travaux antérieurs sur la syngénèse et les types, basés sur des cartes géologiques soignées et des observations à l'œil nu, à la loupe et au microscope, l'étaient beaucoup moins.

En tout cas, les études techniquement sophistiquées, et pour cela réputées "modernes", ne prennent jamais en compte la notion dont il va être question maintenant.

Les provinces métalliques

Ne pas confondre cette notion avec celle de "province métallogénique", fourre-tout qui décrit mal la réalité. J'en ai pris pleine conscience en 1970, alors que je commençais à participer à la recherche minière au BRGM, où je venais d'entrer.

La recherche minière exige l'examen de beaucoup de cartes et de descriptions de gisements et indices, et si possible de statistiques de productions et/ou de réserves. Un trait de la distribution géographique des métaux accumulés en gisements saute alors aux yeux : il y a des domaines fortement *spécialisés*, dotés de gisements de cuivre, ou de zinc et plomb, ou d'étain et tungstène, etc, et privés de ou pauvres en gisements d'autres métaux. Appelons provinces métalliques ces domaines spécialisés. Quand on en sort on ne trouve plus que de très petits gisements du même métal et éventuellement des gisements d'autres métaux.

Si les provinces métalliques existent bien on doit pouvoir les dessiner. Par la "*méthode pondérale*", que l'on contrôlera par celle des "contrastes

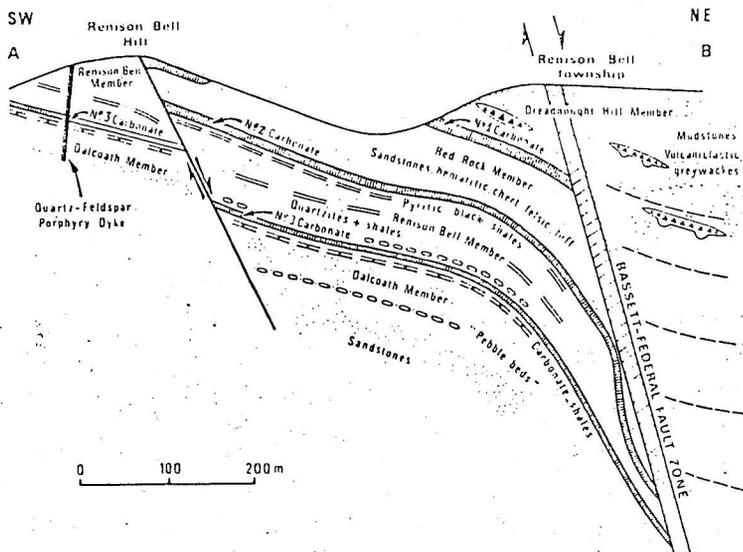


Fig.5. Renison Bell (Tasmanie)



Fig. 6. Une architecture imprévue : les ceintures à zinc-plomb d'Europe et du Maghreb

En 1976 (25^{ème} Congrès géol.international en Australie), c'était une accumulation de plus de 200000 tonnes d'étain dans un minerai à teneur exploitable, donc un mastodonte pour ce métal. La cassitérite y est à grain très fin (5 à 200 microns). Personne – semble-t-il – n'a eu l'astuce de proposer une origine sédimentaire chimique et d'examiner les conditions géochimiques de transport de l'étain dans des eaux superficielles.

Dernière remarque : pour autant que j'en puisse juger équitablement, l'esprit typologique semble n'être plus assez cultivé. Mineralium Deposita est aujourd'hui presque exclusivement rempli d'études géochimiques très 'pointues', notamment isotopiques, où l'on discute de la genèse de tel ou tel gisement, mais on n'y voit guère de tentatives pour les intégrer à une typologie. Ce que j'ai jadis appelé les 'synthèses étagées' manque ici cruellement. Au total ces travaux très complexes paraissent souvent des "bazookas pour tuer des mouches" ! Or, ils sont très onéreux alors que les travaux antérieurs sur la syngenèse et les types, basés sur des cartes géologiques soignées et des observations à l'œil nu, à la loupe et au microscope, l'étaient beaucoup moins.

En tout cas, les études techniquement sophistiquées, et pour cela réputées "modernes", ne prennent jamais en compte la notion dont il va être question maintenant.

Les provinces métalliques

Ne pas confondre cette notion avec celle de "province métallogénique", fourre-tout qui décrit mal la réalité. J'en ai pris pleine conscience en 1970, alors que je commençais à participer à la recherche minière au BRGM, où je venais d'entrer.

La recherche minière exige l'examen de beaucoup de cartes et de descriptions de gisements et indices, et si possible de statistiques de productions et/ou de réserves. Un trait de la distribution géographique des métaux accumulés en gisements saute alors aux yeux : il y a des domaines fortement *spécialisés*, dotés de gisements de cuivre, ou de zinc et plomb, ou d'étain et tungstène, etc, et privés de ou pauvres en gisements d'autres métaux. Appelons provinces métalliques ces domaines spécialisés. Quand on en sort on ne trouve plus que de très petits gisements du même métal et éventuellement des gisements d'autres métaux.

Si les provinces métalliques existent bien on doit pouvoir les dessiner. Par la "*méthode pondérale*", que l'on contrôlera par celle des "contrastes

Cévennes et aux Causses, puis aux Pyrénées médianes en passant sous le Bassin aquitain., puis la prolonge jusqu'aux confins Asturies-Galice.

Ces audaces s'appuient sur un fait souvent observé : des gisements de même contenu métallique peuvent se trouver dans un "socle", paléozoïque par exemple, et dans sa "couverture" mésozoïque transgressive et discordante. Dès lors les contours des provinces métalliques ne peuvent être partout parallèles aux surfaces géologiques isochrones ; en conséquence ils ne peuvent l'être fidèlement à la direction des chaînes de montagnes. Ce constat contredit un dogme remontant au moins à de Launay (1913).

Ajoutons que dans la fig. 6 je n'ai pas voulu introduire certaines reconstitutions "mobilistes" ; par exemple refermer le golfe de Gascogne pour raccorder le Massif armoricain à la Galice, même si cette opération s'appuie sur de solides arguments géologiques et géophysiques.

Voici encore un autre dessin que m'ont inspiré les découvertes, au cours des années 1970, d'importants gisements de zinc-plomb dans les régions arctiques (figure 7).

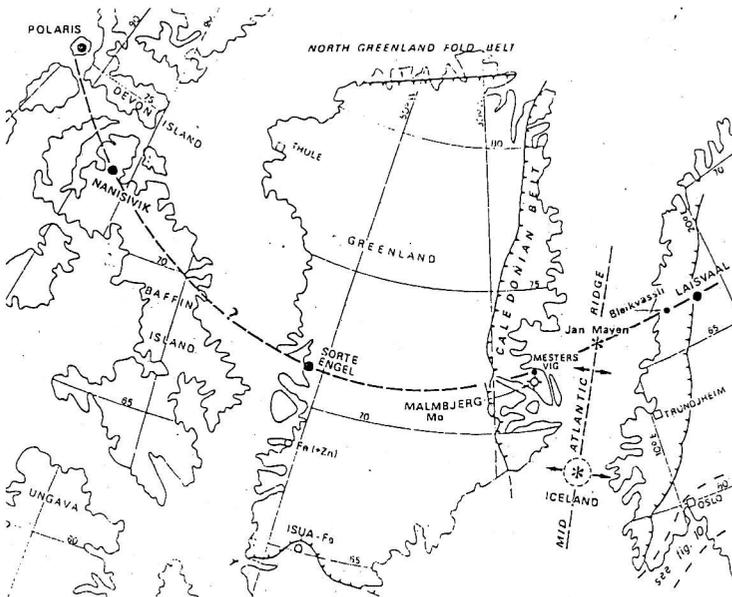


Fig. 7. Les gisements de zinc-plomb du grand Nord

Cet alignement suivant un parallèle ne serait-il dû qu'à des hasards ? On remarquera qu'il traverse la chaîne calédonienne

Lorsque je travaillais au BRGM, un ancien Polytechnicien sympathique mais très peu géologue, qui y dirigeait la recherche minière un peu partout dans le monde, vint un matin, frétilant, me demander ce que je pensais de la découverte toute récente du gisement situé sur la côte ouest du Groenland. En ce temps je n'avais pas encore conçu les fig. 6 et 7. Je ne pus que lui répondre "Il y fait froid et ces régions à permafrost ne sont pas pour nous ; laissons-les aux Canadiens et aux Soviétiques". Aujourd'hui il faudrait dire "Attendons encore un peu la fonte du permafrost"!

Suspendons un moment les questions posées par ces ceintures et constatons seulement que leur existence introduit en métallogénie un facteur jusqu'alors inaperçu ou très sous-estimé : la *province métallique*.

Ce machin-là, comment est-il né ? Puisque son créateur l'ignore, et nous aussi, n'en parlons pas !

En science l'introduction d'un nouveau facteur, ou paramètre, est forcément un moment perturbant. Vous pouvez en sortir louangé ou vilipendé. Qu'en fut-il dans ce cas ? La figure 6 a été publiée pour la première fois en 1976, avec un texte en anglais, dans la revue *Economic Geology*. A mon grand étonnement, cette revue parfois très "conservatrice" ne me fit pas d'objection et aucun lecteur ne lança une contestation ou n'apporta une approbation. Silence...

En 1979 je donnai dans les comptes-rendus de l'Académie des Sciences la note la plus dense que j'aie écrite. Aucune réaction. En 1980, dans *Où sont les métaux pour l'avenir ?*, puis en 1983 dans sa version anglaise, je présentai un essai de "métallogénie globale" très transformiste où les héritages géochimiques susceptibles d'expliquer les provinces métalliques jouent un rôle majeur.

Les recensions françaises et étrangères de cet ouvrage furent en général équitables, sauf celle d'un membre de la Colorado School of Mines qui s'était gardé d'indiquer les faits sur lesquels mes raisonnements reposaient. Aucune recension ne mit en doute l'existence de provinces métalliques. Qui ne dit mot consent ? N'en croyons rien !

Dans les textes postérieurs jamais une citation (peut-être une, mais à mon avis mal à propos). Cause(s) de ce silence ? M'aurait-on pris pour un farfelu ou

pour un rouleur de mécaniques ? Hypothèse peu vraisemblable car mon nom était encore honorablement connu parce que mon livre de 1963 avait été salué avec élégance, dans *Economic Geology*, par l'éminent géochimiste Konrad Krauskopf, professeur à Stanford (une perle rare qui comprenait le français). La vraie cause du silence, la voici : les ceintures étaient "embêtantes" parce qu'on ne pouvait les expliquer dans le système de connaissances de l'époque. Aujourd'hui, soit vingt-cinq ans plus tard, elles ne sont pas mieux expliquées, ainsi que l'on va voir. Au surplus, en 1980 la tectonique des plaques s'était imposée depuis plus de dix ans et on l'appliquait à tour de bras à la genèse des gisements métallifères. Dans cette métallogénie à la mode seuls les plans de subduction jouaient un rôle moteur tandis que la longue histoire des plaques de lithosphère continentale était complètement négligée. Enfin, mon essai de métallogénie globale n'était que rarement étayé sur des techniques sophistiquées, péché grave aux yeux de nombreux "modernistes". Venons-en donc aux questions "embêtantes".

Des questions coriaces soulevées par les ceintures à zinc-plomb et plus généralement par les provinces métalliques

D'abord, pourquoi le couple zinc-plomb ? On s'y est tellement habitué que l'on ne pose jamais la question. Or, ni la table périodique des éléments chimiques, ni leur configuration électronique, ni les classifications géochimiques variées qui prennent en compte diverses propriétés des éléments, ne rapprochent suffisamment les deux métaux pour expliquer leur compagnonnage. A ce sujet, mea culpa ! En 1963 et en 1980 je n'ai pas souligné clairement ce manque théorique. Curieusement, personne ne le fit remarquer et il semble bien que la question reste posée. Quand on fait par ailleurs de la géochimie très savante, ne pourrait-on s'y attaquer ?

Autres questions : durant quelle(s) époque(s) géologique(s) les ceintures se sont-elles individualisées et à quelles structures directrices doivent-elles leur allongement, leur parallélisme approximatif et parfois leur indépendance par rapport aux structures majeures des chaînes de montagnes ? Je n'ai pas répondu à ces questions et personne ne l'a fait à ma place. Sans aucun doute, les réponses gîtent plus profondément ; pour la ceinture n° III par exemple, sous la chaîne hercynienne, dans le socle précambrien. Il faudrait alors faire jouer, de bas en haut et des temps anciens aux plus récents, d'une part des

héritages structuraux discrets (à chercher) et d'autre part des héritages géochimiques.

Ces questions sont fort difficiles et ne peuvent être clarifiées que par des recherches plus approfondies. Encore faut-il qu'elles soient posées ! Or, les publications actuelles de métallogénie, obnubilées par l'échelle atomique, ne prennent pas ce chemin.

En résumé les ceintures que j'avais dessinées ne furent contestées par personne mais parce qu'elles restaient inexpliquées, on préféra "ne pas les voir" et n'en jamais parler ! Une telle attitude révèle une conception absolument infirme de la méthodologie scientifique. Elle rappelle la mise sous le boisseau, pendant cinquante ans, de la dérive des continents selon Alfred Wegener, parce que celui-ci n'avait pas proposé un moteur pour expliquer la dérive.

D'un point de vue psychologique on pourrait aussi conclure, en exagérant un peu, avec le spirituel éthologue Rémy Chauvin : "*La science avance malgré les efforts des hommes de science pour l'en empêcher*".

Eh bien non, n'exagérons pas, car il est des scientifiques - travaillant en général hors des laboratoires étatiques - qui ne se comportent pas ainsi. Je leur dois mes plus grandes satisfactions intellectuelles et je vais en conter une.

Les alternances étain-tungstène et un grand merci à des connaisseurs

Encore un couple fidèle avec, d'un gisement à un autre, un ratio très variable. Pas plus que le couple zinc-plomb celui-ci ne peut être expliqué par une propriété physique ou chimique simple. Ainsi, l'étain est très fusible (232°) tandis que le tungstène est très réfractaire (plus de 3000°). Ils sont fort éloignés dans la table périodique des éléments. Cependant, un caractère pourrait expliquer leur compagnonnage : pour la même valence +4 ils présentent des rayons ioniques très voisins, respectivement 0,71 et 0,70 angström. Mais dès que l'on examine leur distribution géographique et les poids de métal (produit + en réserve) on retombe dans l'"inexpliqué".

La plupart des gisements d'étain et de tungstène s'inscrivent dans de longues ceintures méridiennes. Faute d'espace je n'en donne pas de figures ; il faut suivre sur un atlas. Le long de chaque ceinture, le ratio Sn /W dans les gisements varie beaucoup, indépendamment de leur type et de leur âge.

Ainsi, dans la ceinture circum-pacifique, du côté ouest, en partant du sud, en Tasmanie étain très dominant, dans King Island un beau gisement de

tungstène, puis le long des plis de l'Australie orientale une succession de segments où dominant alternativement étain et tungstène. En Indonésie, dans les îles Banka et Billiton étain très dominant, exploité par les Néerlandais dès 1718 ; puis étain de Malaisie; plus au nord, en Birmanie et en Thaïlande du tungstène s'y associe en quantités à peu près égales, et ainsi de suite.

A l'est du Pacifique, un contraste saisissant entre Argentine, à tungstène seul, et Bolivie, à étain dominant. En Afrique occidentale une ceinture nord-sud incluant l'étain du Nigeria montre une très belle alternance, qui se poursuit au Brésil quand on recolle l'Afrique à l'Amérique du Sud.

On observe ces alternances dans tous les domaines stanno-tungstifères, mais la dimension nord-sud des segments alternants n'est jamais constante ; le phénomène est oscillant mais non rythmé. Si l'on cherche dans l'histoire géologique visible, profondeur d'érosion comprise, des différences entre segments susceptibles d'expliquer ce phénomène, on échoue. "Tout se passe comme si" ces différences étaient plus profondes et très anciennes.

C' est "ébouffant" ? Pourtant c'est ! Comment cette découverte fut elle accueillie ? Elle ne fut pas plus souvent citée que les ceintures à zinc-plomb, c'est à dire jamais ! Ici surgissent deux souvenirs. Le premier, rigolard. Peu de temps avant ma retraite j'ai participé à une réunion de métallogénie en Finlande. Quelques mois auparavant j'avais envoyé au comité d'organisation un "abstract" sur les alternances étain-tungstène. Un sélectionneur (anonyme) crut pouvoir me chercher des poux dans la tête. Je répondis qu'il n'avait rien compris et que je ne changerais pas un mot. Finalement, ma note fut imprimée telle quelle. J'aurais aimé la relire mais ses tirés à part sont, avec bien d'autres, fossilisés dans une cave de P. et M.Curie grâce aux soins conservateurs de François Boyer et de Jacques Geysant. Déranger ces amis pour si peu m'aurait paru inconvenant.

Deuxième souvenir, ému et reconnaissant celui-ci. En 1982, deux ans avant ma retraite, A.Westerhof, géologue en chef de *Billiton International Metals*, compagnie minière polymétallique après avoir été longtemps spécialisée dans l'étain, m'invita à venir aux Pays-Bas. Ce confrère que je ne connaissais pas s'était donné la peine de préparer, à l'intention de ses subordonnés, un copieux résumé en anglais de mes publications et il me l'avait adressé. Je me retrouvai devant plus d'une douzaine de géologues explorant de nombreux pays pour y sélectionner des cibles. C'est un genre d'auditoire qui ne se satisfait pas de

topos purement théoriques. Après mon exposé général de métallogénie régionale, deux géologues vinrent à la tribune.

Le premier dessina la Cornouailles britannique et le Devon, y plaça beaucoup d'indications quantitatives sur l'étain et le tungstène et conclut : "Même dans ce domaine restreint, il y a bien des alternances". Le deuxième présenta une carte géologique d'Australie, assortie de quelques chiffres, et conclut : "il semble bien que ça marche". Dans l'assistance, aucun ne demanda "Comment expliquez-vous ça ?" Ces praticiens sentaient bien qu'il n'y avait pas encore d'explication, mais pour eux, avant de théoriser, il fallait d'abord se mettre d'accord sur des faits.

Pour terminer cette note j'avais prévu de reprendre une figure synthétique intitulée "schéma unitaire de la métallogénie", destinée à faire comprendre la formation des provinces métalliques et leur permanence, figure que jusqu'ici j'avais trouvée assez parlante. Or, je n'en suis plus satisfait parce qu'elle est plane et ne traduit pas l'écoulement du temps. Il faudrait la remplacer par un bloc-diagramme compliqué, travail auquel je n'ai plus le courage de m'atteler. Je vous prie donc de m'excuser pour cette défaillance.

Je disais donc qu'en 1982 l'approbation de professionnels dans le bain me fit beaucoup de bien.

Car c'était un temps où les commissions du CNRS qui "évaluent" les équipes de recherche étaient, dans les sciences de la Terre, noyautées par des affidés ou des imitateurs de *Claude Allègre*, comme lui experts en démolition des concurrents, réels ou potentiels.

Que je vous dise : dans les années 1960 Allègre avait été l'un de mes assistants au labo de géologie appliquée de la Faculté des Sciences de Paris. Il avait été recruté par mon prédécesseur et ancien maître très respecté, Louis Barrabé (décédé en 1961) et j'en avais hérité. Néanmoins, certains collègues trouvèrent approprié de me tenir pour le mentor de ce jeune homme, certes prometteur, mais qui m'infligeait quelques tracas en dénigrant presque tous les géoscientifiques de France et de Navarre. Jusqu'au jour où je lui dis que je serais fort aise de le voir porter ses talents ailleurs. Ce jour-là, ce rodomont pleura dans mon bureau. Comme on dit, "on connaît la suite", qui ressemble à la "résistible ascension" d'un personnage du théâtre de Bertold Brecht.

Donc, après 1968 et ses séquelles, l'atmosphère avait bien changé. Peu encombrés par une déontologie, des néo-mandarins taillaient hardiment dans

ce qui ne les intéressait pas parce qu'ils ne s'en étaient pas instruits. C'est ainsi qu'un pétrologue ignorant en métallogénie pondit un rapport assassin sur ma petite équipe, intitulée "Provinces métallogéniques". En 1983 on demanda aussi son opinion à un professeur de l'université de Hobart, en Tasmanie. Songez donc, quand on enseigne dans un pays aussi richement minéralisé, on est forcément un expert ! Cet expert-là - qui m'avait connu à l'occasion de la session du Congrès géologique international en Australie (1976), et dont j'avais, par des comparaisons, animé l'excursion frisquette sous les 40 èmes rugissants - prétendit que mon équipe "n'avait pas assez décrit" les amas sulfurés du sud de l'Ibérie. Cet honnête kangourou faisait abstraction d'un gros mémoire du BRGM consacré à ce sujet, mémoire dont je lui avais adressé une première mouture, pour l'aider parce qu'il m'avait dit vouloir visiter l'Andalousie.

Alors, aujourd'hui, quand j'entends un député parler d'"évaluation" des équipes de recherche comme s'il s'agissait d'une nouveauté soudain devenue impérieuse, forcément je ricane. Car rien ne pourra changer tant que, dans l'Université et dans les organismes de recherche, on embauchera sans faire prêter serment aux candidats sur un code de déontologie. On devrait exiger la même chose des représentants du peuple et des aspirants à la nationalité française.

Il y aura toujours beaucoup d'hommes pour trahir leurs serments, d'accord, mais tout de même un engagement public solennel, bien gravé dans la mémoire, peut retenir sur la pente de la trahison.

A propos...j'avais prévu de vous conter en souriant comment, en 1979, un de mes amis, membre de l'Académie des Sciences, avait réussi, tout en plaidant pour moi devant cet aréopage, à m'empêcher d'y être élu. Dans son genre, c'était un artiste. Il a rendu son âme à Dieu. Alors, bravo l'artiste !

Au-delà de cette chute, comme disent les lettrés, on entrerait dans le "politiquement incorrect". Depuis mon départ de l'Université deux ans après mai 68, parce que je n'acceptais pas la loi d' "orientation" de l'enseignement supérieur concoctée par le très éphémère ministre de l'Education Nationale Edgar Faure, quelques-uns de mes amis savent qu'il m'arrive de m'aventurer sur ce genre de terrain accidenté. Mais ici ce n'est vraiment pas le lieu !

Dans les revues savantes anglophones on termine toujours un article par des...

Acknowledgments

Puisque cet article sera très probablement mon ultime écrit scientifique, je saisis avec plaisir l'occasion de dire ma gratitude envers des géologues, minéralogistes, ingénieurs des mines qui, à un stade ou un autre de ma trajectoire professionnelle ou de ma vie tout-court, m'ont accordé leur appui, ou leurs encouragements, ou un signe de compréhension. Entre autres...

- *Défunts* : Louis Barrabé, Fernand Blondel, Hubert Curien, François Foglierini, Claude Guillemin, Jean Lombard, Daniel Pajaud, Pierre Pruvost ;

- *Vivants* : Pierre Bariand, Claude Beaumont, François Boyer, Alexandre Delerm, Michel Durand-Delga, Jacques Geysant, Jean-Claude Limasset, Alexis Moissejev, Paolo Omenetto, Michel Rabinovitch, Gérard Sustrac, Michel Toyer, Gilbert Trolly ;

- plus mes dix compagnons co-fondateurs en 1965 de la "Société européenne de géologie appliquée aux gisements minéraux" (SGA) - que j'eus l'honneur de présider de 1977 à 1979 - et de la revue "Mineralium Deposita"; parmi ces pionniers de la vraie Europe - celle des coopérations professionnelles - Christian Amstutz et Pierre Evrard nous ont quittés cette année ;

- plus tous mes anciens élèves qui ont bien servi la profession géologique ;

- enfin, Colette

et deux aimables quadrupèdes qui, comme elle, ne m'ont jamais mesuré leur soutien : feue Topaze, bergère allemande distinguée, et Porthos, beagle joyeux luron.

A.M.I.S

Association des Amis

de la Collection de Minéraux de la Sorbonne.

4 Place Jussieu, Tour 46-0 au sous-sol

Entrée visiteurs : sur la dalle Jussieu, à droite.

4, place Jussieu, case 73

75252 PARIS Cedex 05