



La Terre est un système complexe qui évolue depuis près de 4,5 milliards d'années et dans lequel nous puisons notamment nos ressources minérales. Depuis toujours, l'eau joue un rôle majeur dans la genèse de ces ressources. Elle transporte des ions et des gaz, formant des fluides qui circulent à toutes les profondeurs de la croûte terrestre, sous des conditions de pression et de température plus ou moins élevées. Ces circulations de fluides sont à l'origine de concentrations hydrothermales qui procurent l'essentiel des ressources en Zn, Pb, Ag, Ge, U, Ba ou F, et plus de 50 % des ressources en Cu, Co, Au, Sn et W.

Inclusion fluide multiphasée dans du quartz montrant un cristal de halite et de calcite, une phase liquide et une bulle de vapeur. Gisement de talc de Trimouns (Ariège, Pyrénées). Taille de l'inclusion 30 µm.

A multiphase fluid inclusion in quartz displaying a halite and calcite crystal, a liquid phase and a vapour bubble. The Trimouns talc deposit (Ariège, French Pyrenees). Inclusion size 30 µm.

© M.-C. Boiron.

Fluides et genèse des concentrations minérales



Michel Cathelineau

DIRECTEUR DE RECHERCHE – UMR7566 – CNRS
GÉOLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES
MINÉRALES ET ÉNERGÉTIQUES
michel.cathelineau@g2r.uhp-nancy.fr

Marie-Christine Boiron

CHARGÉE DE RECHERCHE – UMR7566 – CNRS
GÉOLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES
MINÉRALES ET ÉNERGÉTIQUES
marie-christine.boiron@g2r.uhp-nancy.fr

Johann Tuduri

DIRECTEUR ADJOINT
ENAG – BRGM SCHOOL
j.tuduri@brgm.fr

Les gisements métalliques de la partie supérieure de la lithosphère, à l'exception de ceux strictement liés à la cristallisation d'un magma, sont pour la plupart associés à l'existence d'une phase fluide, qui a extrait les métaux à partir d'une roche source les a transportés puis déposés dans un piège. Les processus d'extraction, de transport et de dépôt sont particulièrement efficaces puisque les teneurs en métaux des gisements multiplient par des facteurs de 10^3 à 10^6 les concentrations initiales des roches sources (tableau 1).

Les concentrations minérales sont en général le résultat d'une longue histoire polyphasée. La reconstruction de cette histoire, souvent complexe, nécessite : i) de connaître les conditions physico-chimiques liées au transport et au dépôt des métaux, ii) d'évaluer les concentrations en métaux dans les fluides géologiques et iii) d'apprécier l'aptitude de ces fluides, issus de différents réservoirs, à transporter ces métaux.

“L'eau est un acteur majeur de la genèse des ressources minérales.”

Élément	Concentration moyenne dans la croûte terrestre	Teneur d'exploitation	Facteur d'enrichissement
Or	0,0003 g/t	1 à 30 g/t	3 000 à 100 000
Argent	0,1 g/t	100 à 600 g/t	1 000 à 6 000
Uranium	1 g/t	0,02 à 20 %	200 à 200 000
Plomb	16 g/t	8 %	5 000
Cuivre	50 g/t	0,5 à 5 %	100 à 1 000
Zinc	60 g/t	5 à 20 %	900 à 3 500
Baryum	400 g/t	30 à 80 %	800 à 2 000
Fer	50 000 g/t = 5 %	30 à 65 %	10

Tab. 1 : Illustration de l'importance des mécanismes d'enrichissement conduisant à la formation d'un gîte minéral : concentration moyenne dans la croûte terrestre et teneur d'exploitation de huit éléments métalliques.

Tab. 1: Illustration of the importance of the enrichment mechanisms that result in the formation of an ore deposit: mean concentration in the Earth's crust and grade in mined deposits for eight metallic substances.

Or, il ne reste plus de traces de ces phases fluides, à l'exception :
 - des perturbations créées lors de leur passage (filons, brèches, zones de dissolution) ;
 - des inclusions fluides dans les minéraux néoformés.

ainsi des objets de choix pour la reconstitution des paléocirculations et la compréhension des interactions physico-chimiques entre le fluide et la roche percolée à l'origine des concentrations métalliques. Des inclusions fluides aussi vieilles que 2 milliards d'années peuvent être ainsi préservées et constituer d'instimables témoins du passé.

Les inclusions fluides (encadré ci-dessous) constituent

► DES TÉMOINS EXCEPTIONNELS DE LA CIRCULATION DES FLUIDES

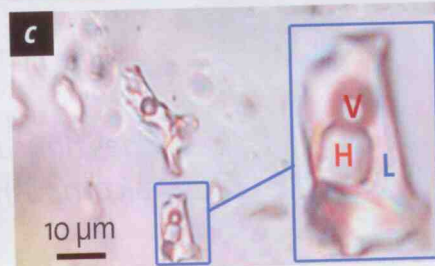
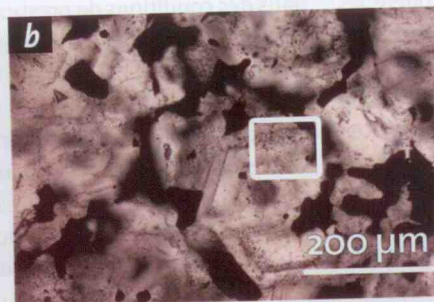
Les inclusions fluides sont des cavités intracristallines qui renferment une ou plusieurs phases fluides (liquide, gaz) et parfois des phases solides à température ambiante. La taille de ces inclusions est généralement comprise entre 2 et 20 µm, et peut atteindre exceptionnellement quelques centaines de micromètres.

Les inclusions fluides se forment au cours de la croissance du minéral hôte, souvent à la faveur de défauts cristallins. Elles peuvent également se former dans des microfissures, après la cristallisation du minéral. L'étude des inclusions fluides a connu un grand essor durant ces dernières décennies.

Leur caractérisation est possible grâce à des techniques comme la microthermométrie (observation des changements de phase sous microscope) ou par des techniques plus pointues de microanalyse. Les études d'inclusions fluides peuvent être réalisées sur la plupart des minéraux transparents sous lumière visible (quartz, fluorine, calcite, barytine, halite) et dans certains minéraux opaques (sphalérite, stibine, pyrite) sous infrarouge. La connaissance de la chimie des paléofluides permet d'obtenir des données quantifiées de concentrations en gaz et sels pour modéliser les réactions entre fluides et minéraux.

Elle permet également d'estimer les conditions de pression, de température et de profondeur de circulation des fluides. Enfin, le couplage entre études structurales et caractérisation des paléofluides permet de relier les événements de déformation avec les différents épisodes de percolation des fluides.

Les champs d'application sont divers et variés en Sciences de la Terre : pétrologie des roches magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires, formation des gisements de métaux, diagenèse des bassins et formation des réservoirs d'hydrocarbures. ■

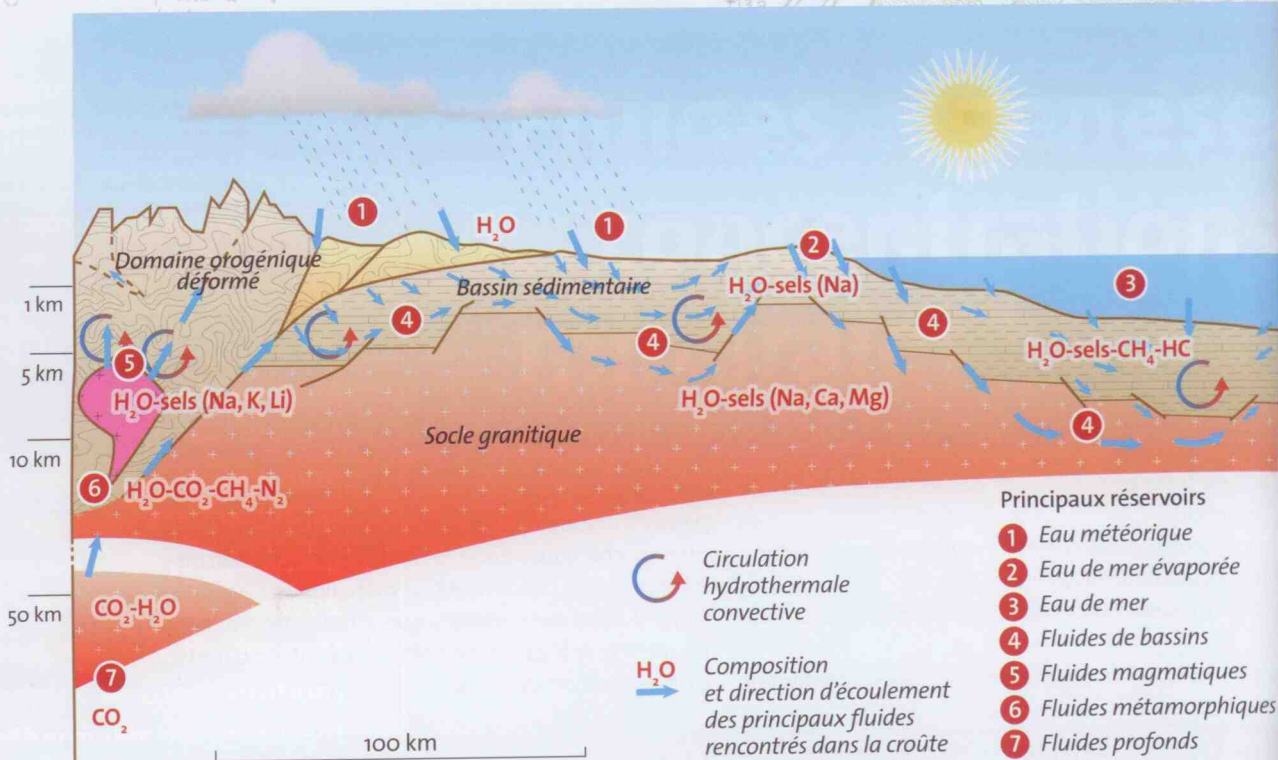


Inclusions fluides de la mine de cobalt, nickel, argent et or de Bou Azzer (2,5 Mt @ 1,27 % Co, 1 % Ni, 50 g/t Ag, 6 g/t Au) dans le sud du Maroc.

- A) Veine de calcite, quartz et arsénures de cobalt. © A. Chauvet.
- B) Bandes de croissance soulignées par des inclusions fluides et des arsénures opaques. © J. Tuduri.
- C) Inclusion fluide triphasée (Liquide-Vapeur-Halite). © M.-C. Boiron.

Fluid inclusions in the Bou Azzer cobalt, nickel, silver and gold mine (2.5 Mt @ 1.27% Co, 1% Ni, 50 g/t Ag, 6 g/t Au) in southern Morocco.

- A) A vein containing calcite, quartz and cobalt arsenides.
- B) Growth bands enhanced by fluid inclusions and opaque arsenides.
- C) Three-phase fluid inclusion (Liquid-Vapour-Halite).



Les grands réservoirs de fluides de la lithosphère

L'identification des réservoirs sources de fluides au moyen de leurs signatures géochimiques est essentielle pour mieux comprendre les processus de migration des fluides, leurs interactions avec les roches traversées et les mécanismes nécessaires à la genèse des concentrations minérales. Selon leur localisation dans la croûte, les fluides ont des compositions et des origines variées (figure 1).

Dans les tous premiers kilomètres de la lithosphère, les fluides dominants (1) sont des fluides de recharge qui percolent à partir de la surface (fluides météoriques). Ils sont relativement dilués, appartiennent au système H₂O-sels (Na dominant), avec de très faibles quantités de gaz (CO₂, CH₄). Ils sont piégés dans des conditions de pression de quelques dizaines à quelques centaines de bars et à des températures variant entre 50 et 350 °C. C'est le domaine des fluides des systèmes géothermiques actifs ou des systèmes hydrothermaux des provinces volcaniques auxquels sont associés les dépôts de métaux (Au, Ag, Cu...). Dans les niveaux superficiels, des processus d'ébullition peuvent être observés lorsque la température est élevée. L'ébullition a pour conséquence de libérer les gaz dissous dans la solution hydrothermale. Il aboutit à la précipitation des éléments restant en solution (Au, As, Sb, Ag).

Dans les bassins sédimentaires, les fluides (4) appartiennent au système H₂O-gaz-(hydrocarbures)-sels et dérivent en partie de l'eau de mer. Na, Ca et Mg sont les ions dominants de la phase liquide. La salinité est variable, car trois types de fluides peuvent interagir : i) l'eau de mer (3), ii) l'eau de recharge provenant des aquifères affleurant (1), et iii) les eaux issues de l'évaporation de l'eau de mer (2) ou des eaux piégées dans des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite, halite, sylvite, etc.). CO₂, CH₄, (± N₂) et hydrocarbures trouvent leur origine dans la maturation de la matière organique présente dans les sédiments. Ces fluides sont piégés dans des conditions de pression de l'ordre de quelques centaines de bars à des températures relativement basses (50-250 °C).

Les fluides hydrothermaux d'origine magmatique (5) sont issus de la séparation d'une phase fluide lors de la cristallisation de magmas. Ces fluides de moyenne à haute température (350 °C à plus de 600 °C) sont généralement enrichis en K et peuvent posséder des teneurs non négligeables en Li. Accumulés au toit des plutons,

Fig. 1 : Coupe présentant les principaux réservoirs fluides, les circulations des solutions hydrothermales et leurs compositions dans la croûte terrestre.

Fig. 1: A cross-section depicting the main fluid reservoirs, hydrothermal circulations and their compositions in the lithosphere. © M.-C. Boiron.

“ Les fluides dans les différents niveaux de la croûte ont des compositions et des origines variées. ”



Photo 1 : Mine de molybdène de Climax ($\approx 1\text{Gt}$ @ 0.4 % Mo) située à près de 3 500 m d'altitude au cœur des montagnes Rocheuses (Colorado, États-Unis). À l'aube du XXI^e siècle elle avait produit près de 60 % du Mo mondial.

Photo 1: The Climax molybdenum mine ($\approx 1\text{Gt}$ @ 0.4% Mo) situated at an altitude of almost 3500 m in the heart of the Rocky Mountains in the state of Colorado (United States). At the dawn of the 21st century, it had already yielded nearly 60% of the world's Mo.

© J. Tuduri.

leur libération s'effectue lorsque leur pression excède la pression de confinement, provoquant d'importantes fracturations, appelées stockworks une fois minéralisées. Ces gîtes comptent parmi les plus importants gisements au monde de Cu, Mo et Au (Chuquicamata au Chili, Climax aux États-Unis et Grasberg en Indonésie, photo 1).

À plus grande profondeur (5-15 km), les fluides (6) sont généralement en équilibre avec les roches encaissantes (métamorphiques ou granitiques). Les compositions chimiques sont dominées par H_2O , CO_2 , CH_4 et N_2 . Les fluides sont associés au métamorphisme prograde (fluides métamorphiques où l'eau est issue de processus de déshydratation) ou rétrograde (fluides pseudo-métamorphiques, équilibrés avec leurs encaissants). Les fluides sont piégés sous des pressions de l'ordre de 2 à 5 kbars et à des températures relativement élevées (300-500 °C). Les gîtes aurifères des cratons africains, canadiens ou australiens se sont mis en place dans ces conditions le long de grandes failles crustales (photo 2).

À quelques dizaines de kilomètres de profondeur (7), des fluides de forte densité à CO_2 ($\pm \text{H}_2\text{O}$) sont observés. Dans des conditions réputées anhydres et peu favorables à la mise en place de minéralisations économiques, la présence d'eau et les rapports $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ dans ces fluides font l'objet de débat.

Photo 2 : Or dans des échantillons de veines de quartz et carbonate de la mine d'or de Daisy Milano ($\approx 200\ 000\ \text{t}$ @ 40 g/t Au) située près de Kalgoorlie dans le craton du Yilgarn en Australie occidentale.

Photo 2: Gold in samples of quartz and carbonate veins from the Daisy Milano ($\approx 200\ 000\ \text{t}$ @ 40 g/t Au) gold mine located near Kalgoorlie in the Yilgarn craton, western Australia.

© A. Caté.



Du transfert des métaux par les fluides à leur précipitation

Fertilité des roches sources

La « fertilité » de certaines parties de la lithosphère augmente non seulement quand la concentration en métal augmente, mais aussi lorsque le porteur du métal est potentiellement soluble dans des conditions physico-chimiques qui rendent le métal facilement et naturellement extractible. Dans le cas de l'uranium, dont les roches sources sont parmi les mieux connues, la présence d'uraninite, très sensible aux conditions d'oxydo-réduction, est un facteur beaucoup plus important que la concentration elle-même du métal. À l'inverse, des roches fortement concentrées en uranium, du fait de la présence de thorite, ne constituent généralement pas une source fertile, car la phase renfermant le métal est très stable, à moins que ce minéral soit dans un état de déstabilisation avancée du fait du rayonnement alpha de l'uranium et du thorium.

Les roches sources des autres métaux, en revanche, sont bien souvent hypothétiques. Ceci est lié au fait que, leurs concentrations dans les roches sources sont très faibles, souvent inférieures aux limites de détection. Elles ne sont donc généralement pas analysables en routine.

Rôle des fluides

Les phases fluides issues des grands réservoirs ne jouent un rôle dans l'extraction des métaux que si leurs concentrations en ligands (soufre ou chlore, par exemple) permettent d'envisager un transport efficace du métal et si elles sont en déséquilibre avec les phases porteuses de métaux (extraction par déstabilisation, dissolution des porteurs primaires). Les concentrations les plus riches sont à mettre en relation avec des fluides soit de très forte salinité, soit de haute température, ces deux paramètres ayant un rôle positif sur la capacité des fluides à transporter les métaux (figure 2).

Le soufre est nécessaire à la précipitation des sulfures, porteurs de l'essentiel des métaux. Il peut être issu du dégazage des magmas ou, dans les environnements sédimentaires, de la sulfato-réduction bactérienne et de la réduction thermochimique. Le chlore peut être d'origine marine, concentré par évaporation (saumure dite primaire) ou issu de la dissolution d'évaporites (saumure dite secondaire) ; il peut aussi être d'origine magmatique.

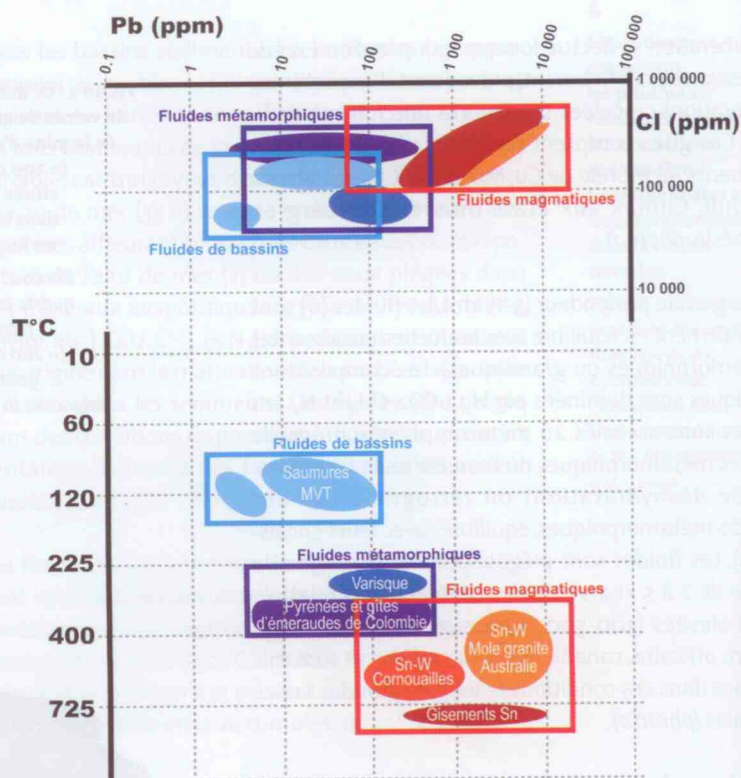
Le processus de dépôt

Le dépôt et la concentration d'un minéral dans un piège nécessitent une combinaison de facteurs favorables : durée du processus, efficacité du fractionnement... La précipitation des métaux à partir de la phase fluide est avant tout un processus thermodynamique ; la déstabilisation des porteurs de métaux en solution est favorisée par la modification de la phase fluide et par celle des conditions physico-chimiques externes (réactions avec les roches encaissantes, mélange de fluides, variation de température, pression, ébullition). Ainsi, des fluides en équilibre à relativement haute température et/ou faible pH peuvent engendrer des concentrations hydrothermales s'ils migrent dans des zones de plus faible température et/ou de pH plus élevé. Le dépôt peut également être favorisé par des processus de dilution à faible température lorsqu'elles favorisent la déstabilisation des complexes chlorurés.

Un nouvel exemple : les fluides sont à l'origine d'un gisement de classe mondiale : la mine d'argent d'Imiter (8 Mt @ 550 g/t Ag) située dans le sismocène marocain (Anti-Atlas oriental). Connue depuis le Moyen Âge, elle est la première mine productrice d'argent en Afrique.

Yet another example where hydrothermal fluids have created a world-class deposit: the Imiter silver mine (8 Mt @ 550 g/t Ag), located in southern Morocco (western Anti-Atlas). Known since medieval times, it is the foremost silver producing mine in Africa.

© BRGM Im@gé, J. Tud...

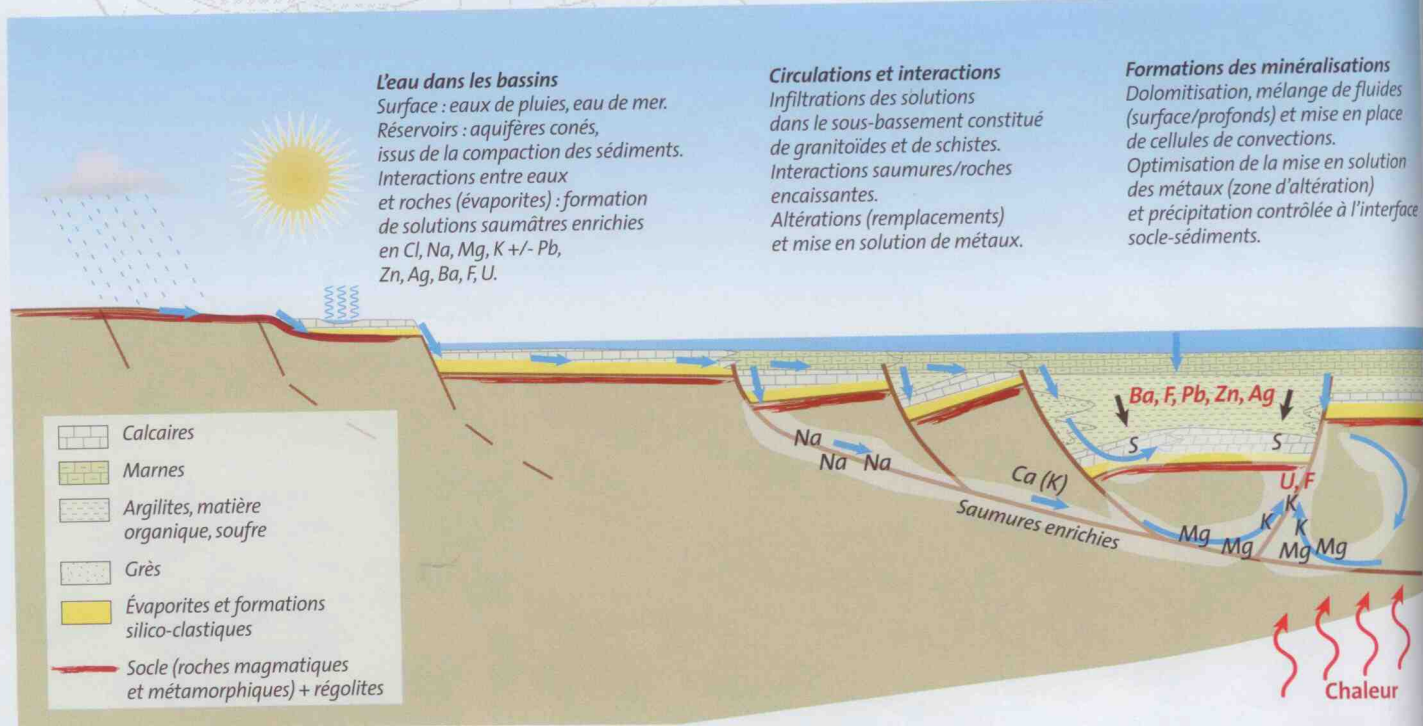


▲ Fig. 2 : Relations entre concentration en Cl, en métaux (Pb) et température des fluides de différents systèmes hydrothermaux (d'après Yardley, 2005).

Fig. 2: The relationships between Cl and metal (lead) concentrations and the temperature of fluids in various hydrothermal systems (from Yardley, 2005).

où
ine
sse
ent
Ag)
ud
las
uis
la
ice
ue.
ere
ed
sit:
ine
ed
co
vn
es,
er-
ca.
uri.





Les fluides à l'interface socle-couverture

L'action des fluides d'origine sédimentaire ne se limite pas exclusivement au bassin : elle peut affecter le socle sous-jacent à la faveur de fractures. C'est dans ce contexte que se forme une grande partie des minéralisations de Pb, Zn, Cu, Co, Ag, U de basse à moyenne température [Essarraj *et al.* (2005), Piqué *et al.* (2008), Richard *et al.* (2010)].

Les circulations de fluides à l'interface socle-couverture sont un thème de recherche de première importance (figure 3). Deux types de fluides de composition contrastée sont fréquemment rencontrés dans ces environnements : des fluides dilués, correspondant à des fluides de recharge météorique, et des saumures, résultant de l'évaporation de l'eau de mer et expulsées durant des épisodes de compaction et/ou d'extension associés à des événements géodynamiques majeurs. Ces saumures montrent des potentialités à mobiliser, transporter puis déposer les métaux [Wilkinson *et al.* (2009)]. Les processus de dilution et/ou les variations des paramètres redox représentent ici les principaux mécanismes à l'origine des concentrations minérales. Ainsi, en Europe de l'Ouest, les minéralisations à Pb, Zn, et Ag ainsi que celles à F et Ba sont associées aux phases de rifting (ouverture de l'océan Atlantique, puis du golfe de Gascogne) [Boiron *et al.* (2010)]. Au Canada, les minéralisations à U des bassins d'âge Protérozoïque résultent de mécanismes similaires.

Étudier la chaîne « source, extraction, transport, piégeage, préservation » est un objectif majeur pour la compréhension de la genèse des ressources minérales. Cette démarche est la clé de la découverte de ressources nouvelles, situées à des profondeurs toujours plus grandes, aux teneurs plus faibles ou provenant de gisements encore mal connus du point de vue de leur mécanisme de genèse. L'étude de la phase fluide (eau, gaz, sels) est l'une des sources d'informations les plus riches, comme l'ont montré les pétroliers.

Il reste encore à déterminer, pour de nombreux métaux, leur source, la nature de leurs porteurs, et comment les concentrations en métaux ont été acquises par les fluides percolants. La collaboration étroite entre métallogénistes, géophysiciens et modélisateurs de l'évolution de la lithosphère est nécessaire pour comprendre le couplage entre géodynamique et mouvements des fluides. Il est pour cela essentiel de se situer dans un cadre lithosphérique, beaucoup de gisements étant décrits sans être replacés précisément dans la formation des orogènes ou des bassins. Progresser dans la datation des objets minéralisés eux-mêmes sera pour cela déterminant afin de connaître les relations entre la circulation des fluides minéralisateurs, la déformation de la lithosphère et la déformation localisée, source de formation des pièges structuraux. C'est le défi de ce XXI^e siècle : accomplir des progrès décisifs pour améliorer la prospection des gisements métalliques. ■

▲ Fig. 3 : Les circulations de fluides à l'interface entre socle et couverture.
Fig. 3: Fluid circulations at the interface between basement and cover.

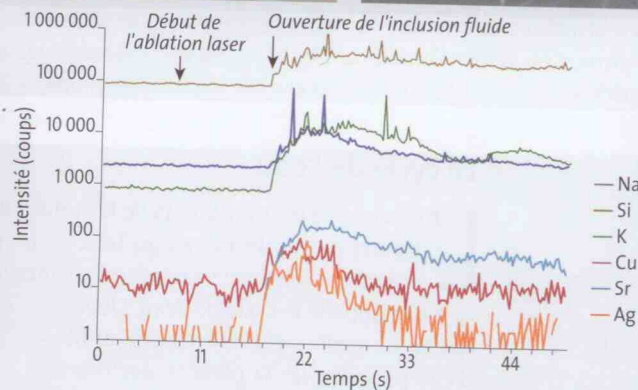
► L'HYDROGÉOCHIMIE À L'ÉCHELLE DE QUELQUES MICROMÈTRES CUBE

Durant la dernière décennie, le développement des techniques d'ablation laser (LA) et de rayonnement synchrotron a permis d'apporter des données quantifiées sur la composition chimique des fluides notamment pour les éléments majeurs et certains éléments en trace. Les premiers travaux ont porté sur l'analyse des métaux (notamment Cu) dans les inclusions magmatiques, puis sur les fluides associés aux gisements de type MVT. Enfin, des concentrations en uranium variant de la dizaine à plusieurs centaines de ppm ont pu être analysées par LA-ICPMS dans les saumures sodi-calciques des gisements d'uranium en Athabasca, au Canada [Richard *et al.* (2010)]. La compréhension des processus à l'origine du transport et du dépôt des métaux a ainsi été largement améliorée avec l'avènement de l'étude de la chimie des paléo-fluides. En effet, le couplage des études des paragenèses métalliques et des minéraux de gangue ou d'altération associé à la caractérisation de la chimie des fluides ayant circulé à différentes époques de l'histoire des

transferts d'éléments constitue un axe de recherche essentiel pour la compréhension des processus impliqués dans ces transferts.

L'ablation laser couplée à l'ICPMS est devenue une technique reconnue et efficace pour analyser les éléments mineurs et traces dans les minéraux et dans les solutions piégées sous forme d'inclusions fluides. En combinant la forte résolution spatiale des lasers avec la sensibilité des systèmes d'analyses multi-élémentaires des ICPMS, elle est un outil absolument indispensable pour accéder à la chimie détaillée des paléofluides.

Le système d'analyse élémentaire localisée (échelle de quelques micromètres à 200 micromètres) est constitué de deux équipements couplés : i) un laser d'ablation équipé d'une optique de focalisation et de traitement du faisceau et d'une chambre d'ablation et de collection de la matière ablatée ; ii) un spectromètre ICPMS quadrupolaire utilisant un dispositif de collision-réaction. ■



▲ Photographie de l'équipement d'ablation laser couplée à l'ICPMS (LA-ICPMS) installé au laboratoire GzR, Nancy. Photographie de l'inclusion fluide avant et après ablation. Spectre de masse obtenu après ablation laser et analyse d'une inclusion fluide.

Photo of the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry equipment (LA-ICPMS) installed in the GzR laboratory in Nancy. Photo of the fluid inclusions before and after laser ablation. Mass spectrum obtained after fluid inclusion laser ablation and analysis.

© M.-C. Boiron.



Fluids in ore forming processes

Water-gas-salt fluids are the most common metal carriers and cause of metal enrichments in the crust, being the main agent in extracting ore metals from source rocks, transporting them in drainage zones, and finally precipitating them in chemical and structural traps. Meteoric waters, seawater and basinal brines, as well as magmatic and metamorphic fluids in deeper structural levels, may predominate in several distinct fluid reservoirs, but may interact at depth with host rocks and mix when geologic processes favour mass and heat transfer via thermal gradients. While high-temperature (350-650°C) magmatic hydrothermal systems may provide considerable amounts of precious and base metal stocks and are frequently considered to be one of the main factors favouring economic concentrations, other widely varied processes occur at lower temperatures (100-250°C), particularly in domains along faults, at the interface between the basement and the sedimentary cover.

Ore-forming fluids are now better known thanks to a nearly complete reconstruction of the fluid chemistry of inclusion fluids, with pH, ligand (chlorine, sulphide) concentration, temperature and redox processes being important agents in the transport and deposition of ore minerals. Processes that may change one or more of these parameters are of crucial importance for the metal deposition, this encouraging more accurate micro-analysis and thermodynamic modelling. Moreover, research today should also focus on the links between ore systems, fluid flow and geodynamics, and must take advantage of new non-conventional dating techniques for fluid-rock interactions to fully reconstruct ore systems at the scale of crustal provinces.

Bibliographie : Boiron M.-C., Cathelineau M., Richard A. (2010) – Fluid flows and metal deposition near basement / cover unconformity: Lessons and analogies from Pb-Zn-F-Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits. *Geofluids*, 10, 270-292. Essarraj S., Boiron M.-C., Cathelineau M., Banks D.-A., Benaharref M. (2005) – Penetration of surface – evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou Azzer (Morocco): Evidence from fluid inclusions. *Journal of African Earth Sciences*, 41, 25-39. Piqué A., Canals A., Grandia F., Banks D.-A. (2008) – Mesozoic fluorite in NE Spain record regional base metal-rich brine circulation through basin and basements during extensional events. *Chemical Geology*, 257, 139-152. Richard A., Pettke T., Cathelineau M., Boiron M.-C., Mercadier J., Cuney M., Derome D. (2010) – Brine-rock interaction in the Athabasca basement (McArthur River U deposit, Canada): consequences for fluid chemistry and uranium uptake. *Terra Nova*, 22, 303-308. Wilkinson J.-J., Stoffell B., Wilkinson C.-C., Jeffries T.-E., Appold M.-S. (2009) – Anomalously metal-rich fluids form hydrothermal ore deposits. *Science*, 323, 764-767. Yardley B.-W.-D. (2005) – Metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation. *Economic Geology*, 100, 613-632.