

Fig. 3-3. – Coupes géologiques au sein du dôme de Montredon-Labessonnié (tracé de la coupe A-B figure précédente). Les minéralisations reconnues comme les plus importantes se localisent dans les micaschistes situés au toit de l'orthogneiss. En encart, le zoom sur la minéralisation économique de La Frégère, montrant un minimum de trois morphologies de minéralisations (filons à quartz-wolframite dans les micaschistes, tourmalinites à scheelite-cassitérite dans les micaschistes au contact de l'orthogneiss, réseaux de veines à quartz-wolframite dans l'orthogneiss à proximité du contact avec les micaschistes). TB = travers-bancs.

Modifié d'après P. Béziat *et al.* (1990) et documents miniers. Noter la localisation des gîtes stratiformes de scheelite (L'Auriole et l'Hom-Haut, en pointillé rouge) de part et d'autre du dôme de Montredon.

2) Des nouveaux modèles de gisement aurifère

L'exploitation d'or sur le territoire français est très ancienne puisqu'elle s'est probablement initiée dès le Néolithique et très fortement développée grâce aux Ligures et aux Celtes au cours du dernier millénaire avant J.C. L'envolée des cours des années 1980 a permis une prospection avancée de ce métal, contemporaine de nombreuses mines en exploitation, notamment dans le Limousin, jusqu'à la fermeture des dernières mines au début des années 2000, notamment celle de Salsigne (Aude, 2004), gisement considéré de classe mondiale (115 tonnes d'or produites et 29 t de réserves encore en terre dans un minerai avec une teneur de 8 g/t).

La plupart des gisements d'or connus en France correspondent à des gisements mésothermaux mis en place dans des systèmes de cisaillement (modèles de shear-zones aurifères ou or orogénique de Groves *et al.*, 1998) à la fin de l'orogénèse varisque, vers 300 Ma (Bouchot *et al.*, 2005). Cet événement est à associer à des circulations hydrothermales à très grande échelle, depuis la croûte continentale inférieure, au sein de grands accidents crustaux. Ce modèle a aussi plus ou moins guidé les travaux d'exploration menés en France.

Ce type de minéralisation ne semble pas être associé à un quelconque magmatisme.

Or, un nouveau type de minéralisation aurifère associée à des intrusions granitiques dans les provinces à Sn-W dans des contextes orogéniques a émergé à la fin des années 1990 et au cours des années 2000 (Gloaguen, 2006 pour une synthèse récente). Les principales différences de ce nouveau type avec le modèle « classique » d'or orogénique résident dans des plus faibles teneurs en or dans les gisements associés aux intrusions (< 1 g/t) par rapport aux gisements d'or des zones de cisaillement (> 5-10 g/t), une position géodynamique relativement en arrière dans la chaîne, une association régionale avec des veines à tungstène et /ou étain, un contexte tardi-orogénique plus tranché que le type orogénique (régime extensif ou transtensif) et l'association avec un magmatisme reflétant potentiellement une contribution de magmas alcalins mafiques dérivés du manteau.

Ce type de gisement pourrait être représenté dans les Cévennes (Charonnat *et al.*, 1999 ; Bouchot *et al.*, 2005) et rien n'exclut sa présence dans d'autres massifs varisques.

Si l'on prend l'exemple du Canada, le modèle orogénique a constitué avec succès une base d'exploration jusqu'au début des années 2000. Par la suite, grâce à des cours très élevés permettant l'exploitation de plus faibles teneurs, le modèle associé aux intrusions granitiques a permis de nouvelles exploitations.

Un autre type nouveau de minéralisation aurifère n'a également jamais été prospecté. En effet, la présence d'or est avérée dans le minerai de fer oolithique de l'Ordovicien du domaine central armoricain (Gloaguen *et al.*, 2007). Ces observations ont été réalisées dans le gisement

de Saint-Aubin-des-Châteaux (Loire-Atlantique), localisé sur le flanc sud de l'anticlinal de Châteaubriant (fig. 3-4) et à 6 km environ de la branche nord du cisaillement sud-armoricain.

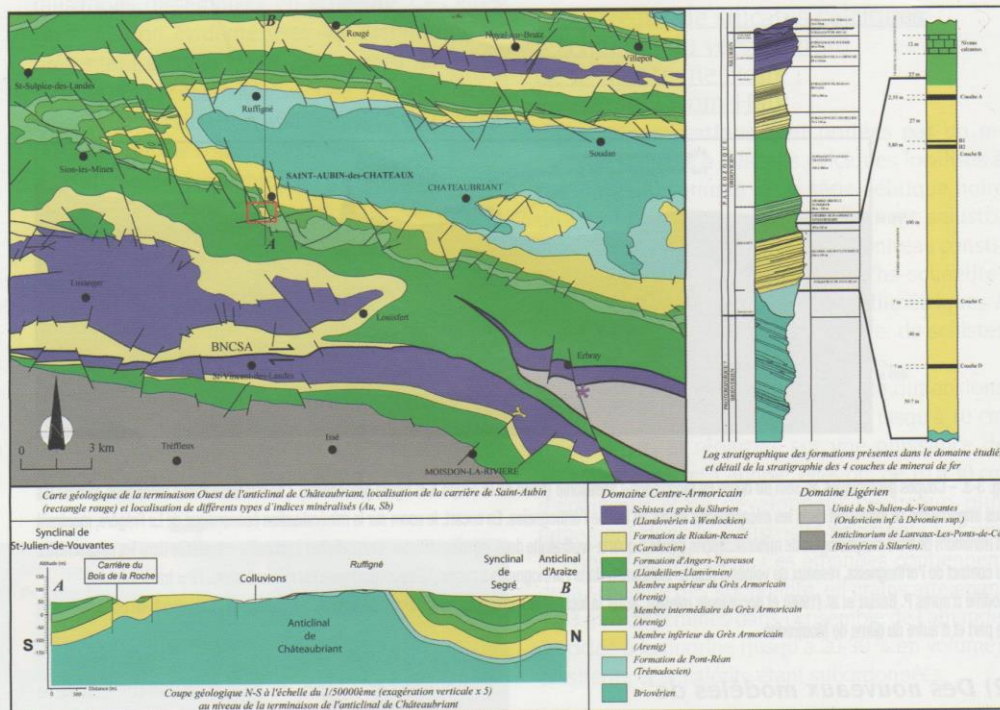


Fig. 3-4. – Cadre géologique du gisement de fer oolithique de Saint-Aubin-des-Châteaux, localisé sur le flanc sud de l'anticlinal de Châteaubriant. Modifié d'après les cartes géologiques à 1/50 000 de Bain-de-Bretagne, Châteaubriant et Nozay.

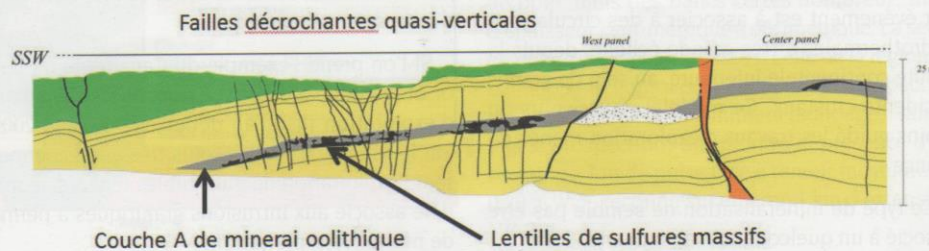
Le fer oolithique à l'affleurement à Saint-Aubin-des-Châteaux correspond à des niveaux ferrifères reconnus régionalement dans tout le domaine central armoricain depuis Crozon (Finistère) jusqu'à l'Anjou et la Normandie (Ballèvre, 2013 et références incluses). Quatre niveaux sont en effet connus dans le membre inférieur des Grès armoricains d'âge ordovicien inférieur (Arenig), qui se sont déposés dans un contexte de marge passive. Les paragenèses sont à magnétite dominante à l'est du bassin ferrifère (région d'Angers) alors qu'elles sont carbonatées (sidérite et chlorite) à l'ouest, comme à Saint-Aubin-des-Châteaux. Les niveaux ferrifères sont caractérisés par de très

faibles teneurs en sulfures (< 2 % poids), mais riches en phosphore (0,3 à 4,8 % poids de P₂O₅). La puissance de certains niveaux peut dépasser les 2 mètres en moyenne.

Les grès et les niveaux ferrifères sont aussi recoupés par de très nombreuses failles décrochantes d'orientation N130°-N140° dont certaines sont d'échelle cartographique (fig. 3-4).

Au niveau de Saint-Aubin-des-Châteaux des lentilles massives de sulfures sont présentes dans le niveau de fer oolithique recoupé par la carrière (fig. 3-5). Au départ interprétés comme des dépôts stratiformes (Herouin *et al.*, 1989),

Fig. 3-5. – Coupe NNE-SSW au niveau de la carrière de Saint-Aubin-des-Châteaux (longueur : 145 m) (modifié d'après Gloaguen *et al.*, 2007).
Jaune : membre inférieur des grès armoricains.
Vert : membre intermédiaire des Grès armoricains.
Orange : faille décrochante dextre majeure.



la présence de ces minéralisations sont en fait associées à plusieurs événements de circulation de fluides hydrothermaux qui ont modifié et réagi chimiquement avec les carbonates constituant le minerai de fer. Le minerai oolithique (fig. 3-6) est progressivement transformé par chloritisation et sulfidation (apparition de pyrite autour des oolithes). La composition des sulfures massifs comprend la pyrite, l'arsénopyrite, la marcassite, la pyrrhotite, le graphite, le quartz, la chlorite, la sidérite, la fluoro-apatite, et des phosphates plus « exotiques » comme la prétilite (deuxième occurrence mondiale) et la lulzacite (localité type).



100µm

Fig. 3-6. – Minerai oolithique vu au microscope en lumière naturelle. Les oolithes sont constituées à 80 % de sidérite, 20 % de chlorite, dans une matrice de sidérite avec de la matière organique en abondance (graphite et graphitoïdes). Quelques nuclei correspondent à du zircon détritique et de l'apatite strontifère. La bordure noire autour des oolithes est constituée de marcassite et pyrite.

Le second événement est marqué par la présence de veines polymétalliques recoupant à la fois le minerai oolithique et les sulfures massifs (fig. 3-7). Elles sont composées de quartz, pyrite, pyrrhotite, galène, chalcopryrite, sphalérite, arsénopyrite, chlorite et apatite.

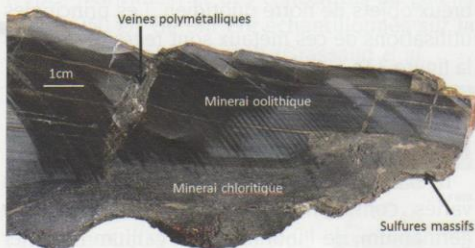


Fig. 3-7. – Échantillon macroscopique de minerai du gisement de Saint-Aubin-des-Châteaux montrant les veines polymétalliques associées au deuxième événement hydrothermal recoupant les minerais oolithiques et chloritiques ainsi que les sulfures massifs.

Le troisième événement est marqué par de nouvelles veines recoupant l'ensemble des lithologies précédentes à sulfosels et or. Elles sont composées de quartz, chalcopryrite, pyrite, spha-

lélite, galène, tétraédrite, bournonite, boulangérite, électrum, chlorite et tobelite (un très rare mica à ammonium, $(\text{NH}_4, \text{K})\text{Al}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), et pour lequel le gisement de Saint-Aubin-des-Châteaux constitue *a priori* les plus gros cristaux connus (centimétriques).

Ces circulations sont associées à la présence de très nombreuses failles décrochantes, comme le montre la relation spatiale entre failles et lentilles de sulfures mise en évidence à Saint-Aubin-des-Châteaux (Gloaguen *et al.*, 2007). Ces événements s'étalent entre 410 et 300 Ma, c'est-à-dire contemporains de l'orogénèse varisque (Tartèse *et al.*, 2015). Cependant, l'événement entre 338 et 315 Ma serait celui ayant conduit à la transformation du minerai de fer carbonaté en sulfure massif.

Le dernier stade à sulfosels et or pourrait donc avoir permis le développement d'une minéralisation aurifère dont l'intérêt économique reste à démontrer. Ces connaissances proviennent de l'étude de la carrière de Saint-Aubin mais la géochimie de l'Inventaire semble montrer une enveloppe beaucoup plus importante, les anomalies géochimiques (Zn, Cu, Pb, Sb, As) débordant très largement.

Considérant l'extension régionale de ces niveaux de fer oolithique dans le Massif armoricain et les très nombreuses failles d'orientation N130°-N140° connues, le recoupement de ces deux types d'objets constitue de nouvelles cibles aurifères qui méritent d'être prospectées. En particulier, une première approche pourrait consister en une recherche de ces recoupements avec les zones de minerai carboné, qui peuvent être facilement mises en évidence par la géophysique. Il est aussi intéressant de noter que le district filonien à antimoine du Semnon (Ile-et-Vilaine) recoupe ces gisements de fer et que l'intersection entre le minerai de fer carbonaté situé à l'aplomb et ces minéralisations n'a pas été examinée alors qu'elle apparaît comme une très bonne cible.

Dans l'antiforme de Valongo au Portugal, des minerais oolithiques de formations contemporaines ont permis une exploitation aurifère, la découverte de la minéralisation oolithique étant postérieure à celle de l'or et à son exploitation (Couto et Moëlo, 2011).

3) Des nouvelles pistes pour l'antimoine ?

La stibine (Sb_2S_3), principal minerai d'antimoine est exploitée en France depuis le XVIII^e siècle. La France a ainsi occupé de 1890 à 1908 le rang de premier producteur mondial d'antimoine, principalement grâce au gisement à Sb-Au de La Lucette (Mayenne, 42 000 t de Sb et 8,35 t d' Au).

La plupart des gîtes d'antimoine français correspondent à des gisements de type filonien appartenant aux gîtes syn- à tardi-orogéniques et le « pic » serait synchrone de l'événement aurifère vers 300 Ma. Le Massif armoricain a constitué la

principale province avec les gisements de La Lucette, le district du Semnon (Ile-et-Vilaine), et le district vendéen (gisements de Rochetréjoux, La Ramée et Les Brouzils, ce dernier, découvert par l'Inventaire, a fait l'objet d'une exploitation au cours des années 1990).

Des études récentes proposent une relation spatiale entre ces minéralisations et la présence d'intrusions mafiques en profondeur qui constitueraient la source de ces métaux (Pochon *et al.*, 2016). Les corps mafiques cachés étant facilement identifiables en géophysique, une focalisation de la prospection sur la recherche de tels objets dans les districts à antimoine connus pourrait ainsi

permettre d'augmenter significativement les réserves. Dans cette optique, le bassin de Châteaulin présente un très fort potentiel. Par ailleurs, les plus gros gisements mondiaux correspondent à des gisements épigénétiques stratiformes (super gisement de Xikuangshan, Hunan, Chine).

Il se trouve qu'un gîte de ce type est connu dans cette zone, le gisement de Rosnoën dans le Finistère (environ 1 000 t Sb).

■ E. GLOAGUEN, J. MELLETON

BRGM, BP 36009, Orléans Cedex 02

Ge, Ga et In : des « petits métaux » aux applications multiples

Des métaux « high tech » sous-produits de métaux de base

Bien que leur production n'ait jamais cessé, l'intérêt récent pour le germanium (Ge), le gallium (Ga) et l'indium (In) est lié à leur implication dans des applications de haute technologie dont certaines liées à la filière des énergies renouvelables (« technologies vertes »).

L'utilisation du gallium a permis une miniaturisation des transistors utilisés dans tous les équipements informatiques (ordinateurs, téléphones...). De plus, l'arséniure de gallium (GaAs) peut aussi bien convertir de l'électricité en lumière (diode) que de la lumière en électricité. Transparent en couche mince, l'indium adhère fortement au verre. Dopé à l'étain (*indium tin oxyde*, ITO), il représente le matériau idéal pour réaliser les fines électrodes recouvrant les écrans plats à cristaux liquides ou LCD (téléviseurs, récepteurs GPS, appareils photos, smart phones...). Les cellules photovoltaïques à cuivre-indium-sélénium montrent une efficacité de conversion énergétique supérieure aux cellules à silicium seul. Les alliages à base de germanium et de phosphore, d'arsenic, de gallium et d'antimoine constituent de bons semi-conducteurs. Le germanium est ainsi utilisé dans les transistors et l'optoélectronique. Cet élément est employé en alliage avec le silicium pour la réalisation de circuits intégrés à haute performance.

L'une des particularités de ces métaux est qu'ils sont principalement des sous-produits de la métallurgie de métaux plus communs comme le zinc et l'aluminium. Ge et In sont principalement extraits des concentrés de sphalérite (ZnS) à des teneurs de quelques centaines de ppm. Le germanium est également extrait de certains gisements de charbon (Chine principalement). Bien qu'également rencontré dans le réseau de la sphalérite (fig. 3-8), le gallium est très largement extrait (> 90 %) du minerai d'aluminium, la bauxite, où les teneurs sont, en moyenne, de l'ordre de 60 à 80 ppm.

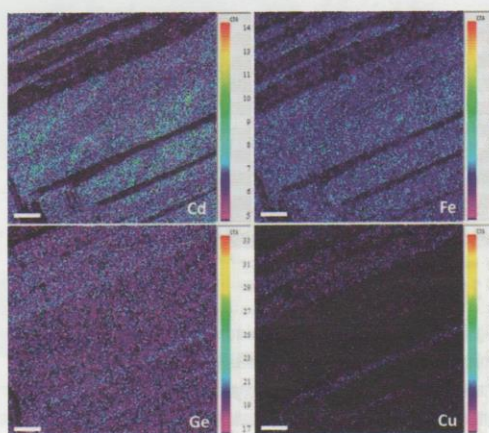


Fig. 3-8. – Cartographie à la microsonde électronique de la distribution du cadmium (Cd), du fer (Fe), du germanium (Ge) et du cuivre (Cu) dans un cristal de sphalérite de la mine d'Elmwood (Tennessee). Les bandes de croissance enrichies en Cd et Fe alternent avec les bandes enrichies en Ge et Cu (barre d'échelle : 200 µm).

Des applications de pointe

Ge, Ga et In sont impliqués, à l'état de composant principal, d'alliage ou de trace dans de nombreux objets de notre quotidien. Les principales utilisations de ces métaux sont regroupées dans la figure 3-9.

Principaux gisements et production

Il existe de nombreux gisements, de types variés, contenant, à des teneurs variables, du germanium, de l'indium et du gallium (Butcher et Brown, 2014 ; Melcher et Buchholz, 2014 ; Schwarz-Schampera, 2014). Cependant, les données concernant les producteurs actifs ou potentiels, les ressources, réserves et productions sont particulièrement difficiles à obtenir et à vérifier, ce qui est fréquemment le cas pour les sous-produits de la métallurgie. La production de Ge serait de l'ordre de 140 t/an (source : USGS 2012), dominée par la Chine, à partir de gisement Pb-Zn