

Panorama géologique des exploitations minières dans les Alpes françaises

Magali Rossi, Dominique Gasquet

Citer ce document / Cite this document :

Rossi Magali, Gasquet Dominique. Panorama géologique des exploitations minières dans les Alpes françaises. In: Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, numéro 17, 2014. Exploitations minières passées et présentes. Impacts environnementaux et sociétaux. pp. 23-40;

doi : <https://doi.org/10.3406/edyte.2014.1271>

https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2014_num_17_1_1271

Fichier pdf généré le 08/11/2019

Résumé

Les Alpes françaises recèlent un patrimoine minier exceptionnel. Bien que de faible tonnage, de très nombreux gisements ont été exploités dès l'Antiquité jusqu'au milieu du 20 e siècle. L'activité minière, qui a été importante dès le Moyen-Age, a connu son apogée au 19e siècle, avant de péricliter au 20e siècle (épuiement des gisements alpins et découverte de gisements de classe mondiale à l'étranger). Ainsi, il n'y a plus de mines en activité aujourd'hui dans les Alpes françaises. Bien que les exploitations minières concernaient essentiellement l'extraction du Fe, de Cu et du Pb-Zn, la nature des minéralisations des Alpes françaises est extrêmement variée (Ag, Au, U, Hg...). La plupart des minéralisations alpines sont de types filonien ou stratiforme et sont essentiellement associées aux Massifs Cristallins Externes et aux formations sédimentaires de la limite Permien-Trias. L'exploitation minière a fortement contribué à l'occupation humaine des Alpes et au développement de l'économie locale. In fine, plusieurs millions de tonnes de fer, 200 000 tonnes de plomb, 100 000 tonnes de zinc et 500 tonnes d'argent ont été extraites des mines alpines françaises. Les mines et les haldes, abandonnées, sont désormais soumises à l'altération par les eaux de pluie et les eaux d'infiltration, ainsi qu'aux effets du temps. Elles peuvent donc être à l'origine de pollutions des sols et des eaux en métaux lourds et peuvent également présenter, dans certains cas, des risques d'effondrement.

Abstract

The French Alps possess an exceptional mining heritage. Despite low tonnages, numerous small deposits have been mined from the Antiquity to the 20th century. This mining industry, which was significant since the Middle Age, reached a maximum in the 19 th century before collapsing during the 20 th century (end of stock, discovery of world-class deposits throughout the world). Therefore, there is no more present-day mining activity in the French Alps. Even though Fe, Cu, and Pb-Zn were mostly extracted, the ore deposits present a great variety of mineralisation (Ag, Au, U, Hg...). Vein-type and stratoïd mineralisations are the most frequent and are essentially hosted in the external crystalline massifs or in sediments, at the Permian-Trias transition. The mining industry was important and thus contributed to the anthropisation and the economic development of the French Alps. Several millions tons of iron, 200 000 tons of lead, 100 000 tons of zinc and 500 tons of silver were extracted through time from the French alpine mines. Now abandoned, these mines and their waste dumps are subjected to alteration and time degradation : they might be source of soil and water pollution, and might as well collapse.

PANORAMA GÉOLOGIQUE DES EXPLOITATIONS MINIÈRES DANS LES ALPES FRANÇAISES

GEOLOGICAL OVERVIEW OF MINING ACTIVITY IN THE FRENCH ALPS

MAGALI ROSSI, DOMINIQUE GASQUET

Université de Savoie-CNRS, Laboratoire EDYTEM, Campus scientifique de Technolac, 73370 Le Bourget du Lac, France.

Contact : magali.rossi@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

Les Alpes françaises recèlent un patrimoine minier exceptionnel. Bien que de faible tonnage, de très nombreux gisements ont été exploités dès l'Antiquité jusqu'au milieu du 20^e siècle. L'activité minière, qui a été importante dès le Moyen-Âge, a connu son apogée au 19^e siècle, avant de péricliter au 20^e siècle (épuisement des gisements alpins et découverte de gisements de classe mondiale à l'étranger). Ainsi, il n'y a plus de mines en activité aujourd'hui dans les Alpes françaises. Bien que les exploitations minières concernaient essentiellement l'extraction du Fe, de Cu et du Pb-Zn, la nature des minéralisations des Alpes françaises est extrêmement variée (Ag, Au, U, Hg...). La plupart des minéralisations alpines sont de types filonien ou stratiforme et sont essentiellement associées aux Massifs Cristallins Externes et aux formations sédimentaires de la limite Permien-Trias. L'exploitation minière a fortement contribué à l'occupation humaine des Alpes et au développement de l'économie locale. In fine, plusieurs millions de tonnes de fer, 200 000 tonnes de plomb, 100 000 tonnes de zinc et 500 tonnes d'argent ont été extraites des mines alpines françaises. Les mines et les haldes, abandonnées, sont désormais soumises à l'altération par les eaux de pluie et les eaux d'infiltration, ainsi qu'aux effets du temps. Elles peuvent donc être à l'origine de pollutions des sols et des eaux en métaux lourds et peuvent également présenter, dans certains cas, des risques d'effondrement.

MOTS-CLÉS : MINÉRAIS, GISEMENTS, IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX, ALPES EXTERNES FRANÇAISES.

ABSTRACT

The French Alps possess an exceptional mining heritage. Despite low tonnages, numerous small deposits have been mined from the Antiquity to the 20th century. This mining industry, which was significant since the Middle Age, reached a maximum in the 19th century before collapsing during the 20th century (end of stock, discovery of world-class deposits throughout the world). Therefore, there is no more present-day mining activity in the French Alps. Even though Fe, Cu, and Pb-Zn were mostly extracted, the ore deposits present a great variety of mineralisation (Ag, Au, U, Hg...). Vein-type and stratoid mineralisations are the most frequent and are essentially hosted in the external crystalline massifs or in sediments, at the Permian-Trias transition. The mining industry was important and thus contributed to the anthropisation and the economic development of the French Alps. Several millions tons of iron, 200 000 tons of lead, 100 000 tons of zinc and 500 tons of silver were extracted through time from the French alpine mines. Now abandoned, these mines and their waste dumps are subjected to alteration and time degradation: they might be source of soil and water pollution, and might as well collapse.

KEYWORDS: ORE DEPOSITS, ENVIRONMENTAL IMPACT, FRENCH EXTERNAL ALPS.

INTRODUCTION

Les Alpes ont connu une très forte activité minière comme le montre la présence de très nombreuses mines. Celles-ci, de taille le plus souvent réduite, ont parfois été exploitées dès l'Antiquité. On observe toutefois une forte activité minière au cours du Moyen-Âge, puis à la fin du 18^e siècle et au cours du 19^e siècle. Dès la fin du 19^e siècle, l'activité minière dans les Alpes est sur le déclin à cause de l'épuisement des gisements* (glossaire en fin d'article), et de la non-rentabilité (découverte de gisements de classe mondiale, conditions d'exploitation difficiles – haute altitude dans de nombreux cas – ou non rentables). S'il n'y a plus d'exploitations minières actuellement dans les Alpes françaises, l'abondance des gîtes* et des gisements métallifères, de nature très diverse (Fe, Cu, Pb-Zn-Ag, etc.) a très fortement influencé l'anthropisation des montagnes sur plus de 2000 ans.

La formation de ces gisements ne peut être comprise sans avoir connaissance de l'histoire géologique des Alpes depuis 300 Ma. En effet, depuis l'orogénèse hercynienne* et au cours de l'orogénèse alpine, de nombreux fluides minéralisateurs ont circulé dans la croûte continentale* et ont permis la formation de très nombreux petits gisements de métaux.

Cet article présentera dans un premier temps le contexte géologique et l'histoire de la formation de la chaîne alpine, ainsi qu'un panorama général des gisements et gîtes métallifères dans les Alpes françaises. La métallogénie des principaux types de gisements métallifères sera ensuite discutée. Enfin, les principales problématiques environnementales qui découlent de l'abondance de ces mines, désormais abandonnées, seront présentées.

I - GÉOLOGIE DES ALPES OCCIDENTALES

La structuration actuelle de la chaîne des Alpes découle de l'histoire tectonique depuis la fin de l'orogénèse hercynienne, il y a 300 Ma. Entre 450 et 300 Ma, deux continents se sont rapprochés et sont entrés en collision* pour former le supercontinent Pangée. Au cours de cette orogénèse, de nombreuses minéralisations dites hercyniennes se sont mises en place sous l'effet de la circulation de fluides hydrothermaux.

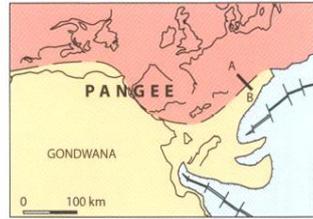
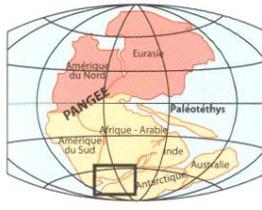
Vers 250 Ma, les reliefs de la chaîne hercynienne sont érodés, et la Pangée, soumise à des contraintes extensives s'amincit, marquant ainsi le début du cycle orogénique alpin. La croûte amincie va alors être envahie par la mer, puis progressivement, la croûte continentale va se briser initiant ainsi l'ouverture de l'Océan Téthys et de l'Océan Atlantique central vers 180 Ma (Figure 1). La Pangée se retrouve ainsi disloquée en deux supercontinents : la Laurasia au Nord (actuelles Amérique du Nord, Groenland, Europe, Russie et Asie) et le Gondwana au Sud (actuelles Amériques du Sud, Afrique, Arabie, Inde, Australie et Antarctique). Vers 100 Ma, l'ouverture de l'Atlantique Nord engendre la rotation du bloc Ibérique, ce qui se traduit à l'Ouest par l'ouverture du Golfe de Gascogne, et à l'Est par la fermeture progressive par subduction* de l'Océan Téthys et l'ouverture de la mer Valaisane sur la marge

européenne étirée (Figure 1). Le processus de raccourcissement se poursuit, entraînant la subduction du bloc Briançonnais (vers 60 Ma) puis la fermeture de la mer Valaisane, aboutissant alors à la collision *sens-stricto* entre la Laurasia et le Gondwana vers 40-35 Ma. Sous l'effet de contraintes compressives continues, le raccourcissement se traduit dans un premier temps par la mise en place de grands chevauchements à vergence* NW dans les Alpes occidentales et à vergence N dans les Alpes centrales qui permettent le déplacement des unités internes (ex-Gondwana) sur les unités externes (ex-Eurasie). Dans un second temps, cela se traduit par le plissement des différentes unités et l'exhumation depuis 15 Ma des roches profondes vers la surface (Figure 1).

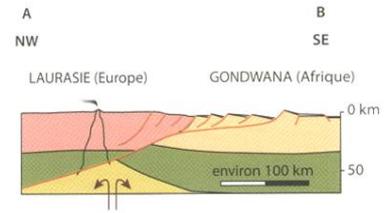
La structuration actuelle de la chaîne témoigne de cette histoire complexe (Figure 2) : les unités externes représentent ainsi l'ancienne marge Européenne, alors que les unités internes correspondent à l'ancienne marge apulienne. Les massifs cristallins internes et externes sont constitués de roches magmatiques et métamorphiques formées au cours de l'orogénèse hercynienne. Ils ont été exhumés au cours de la collision alpine, et extrudés dans leur couverture* sédimentaire mésozoïque.

Figure 1 ci-contre - Cartes paléogéographiques et coupes géologiques montrant l'évolution tectonique de la formation de la chaîne alpine, depuis la fin du Carbonifère à aujourd'hui (redessiné d'après Marthaler, 2002).

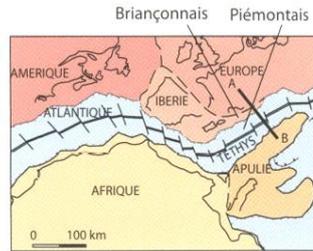
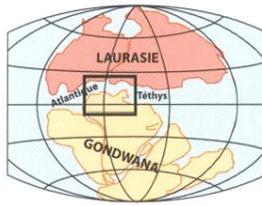
250 Ma



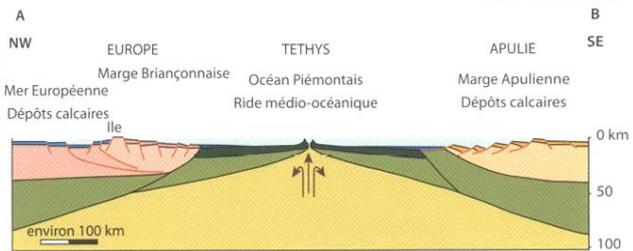
250 Ma



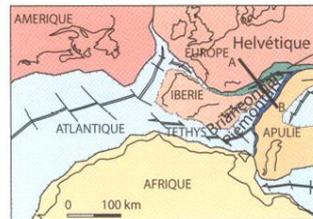
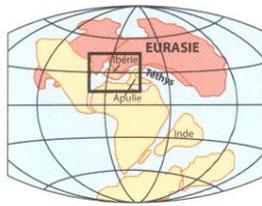
180-160 Ma



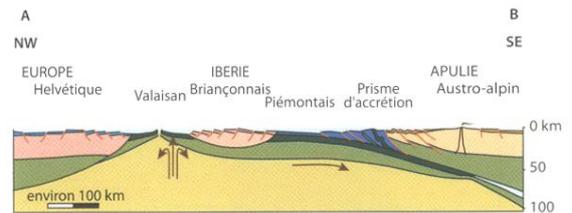
180-160 Ma



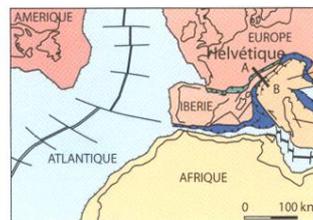
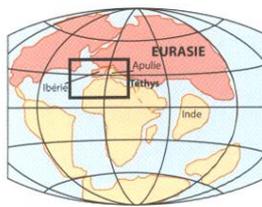
100 Ma



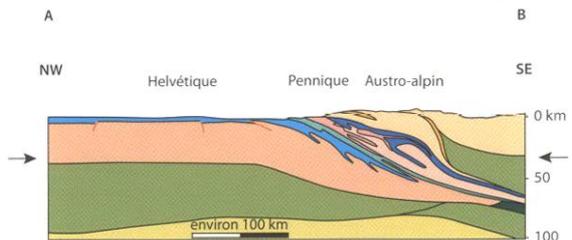
100 Ma



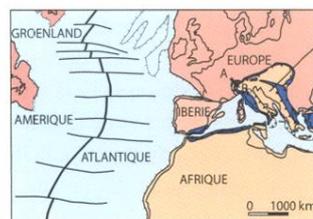
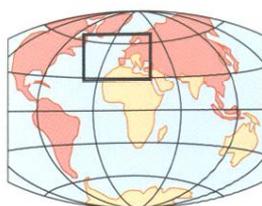
55-35 Ma



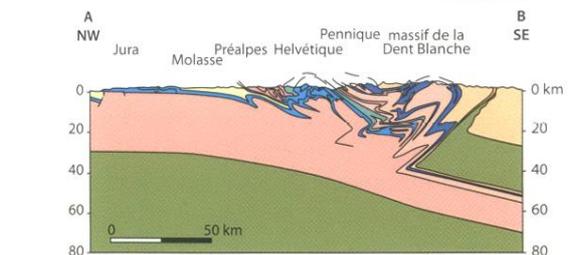
55-35 Ma



Actuel



Actuel



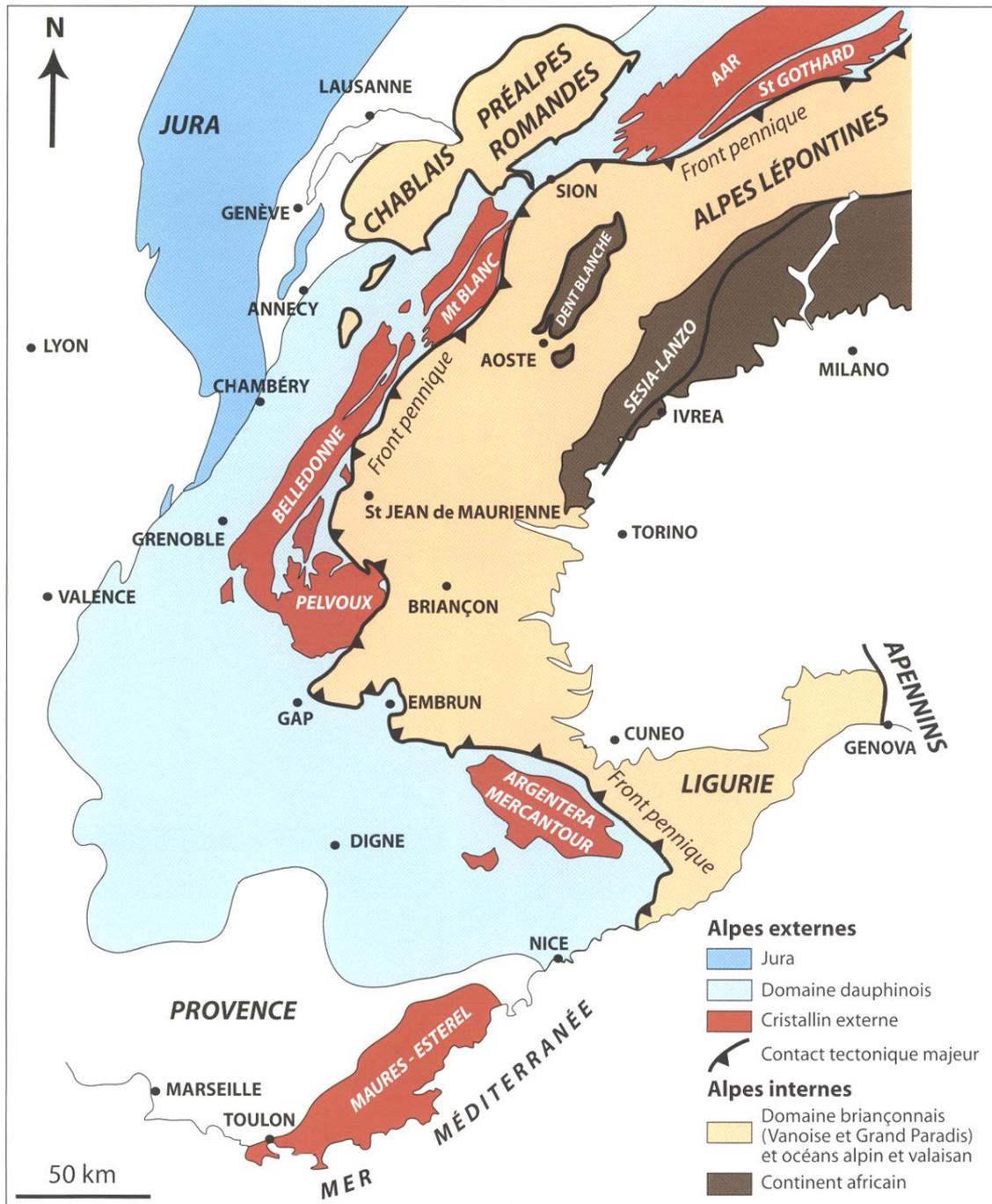


Figure 2 - Schéma structural des Alpes occidentales (Agard et Lemoine, 2003 ; modifié d'après Bertrand et Boullier, 2013).

II - LES MINES DANS LES ALPES FRANÇAISES

Dans les années 1970, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a effectué un inventaire des mines et gîtes métallifères dans les Alpes dans le but d'établir un état des lieux de la ressource minière, et notamment de l'état des réserves (Meloux, 1975). Si les gisements présents dans les Alpes françaises ne sont plus du tout concurrentiels à l'échelle internationale, de nombreuses mines ont été exploitées probablement dès l'Antiquité.

Plus de 250 mines ou gîtes ont été inventoriés par le BRGM dans les départements alpins (Figure 3, Tableau 1 ; Meloux, 1975). Il s'agit, pour l'essentiel, de gisements de fer et de métaux de base (Cu, Pb-Zn-Ag). Notons cependant que cet inventaire est incomplet et ne présente sans doute que les gîtes et gisements les plus importants. En effet, R. Durand (2014) a dénombré plus de 600 entrées de mines et 91 concessions minières en Savoie, et le seul district minier de Saint-

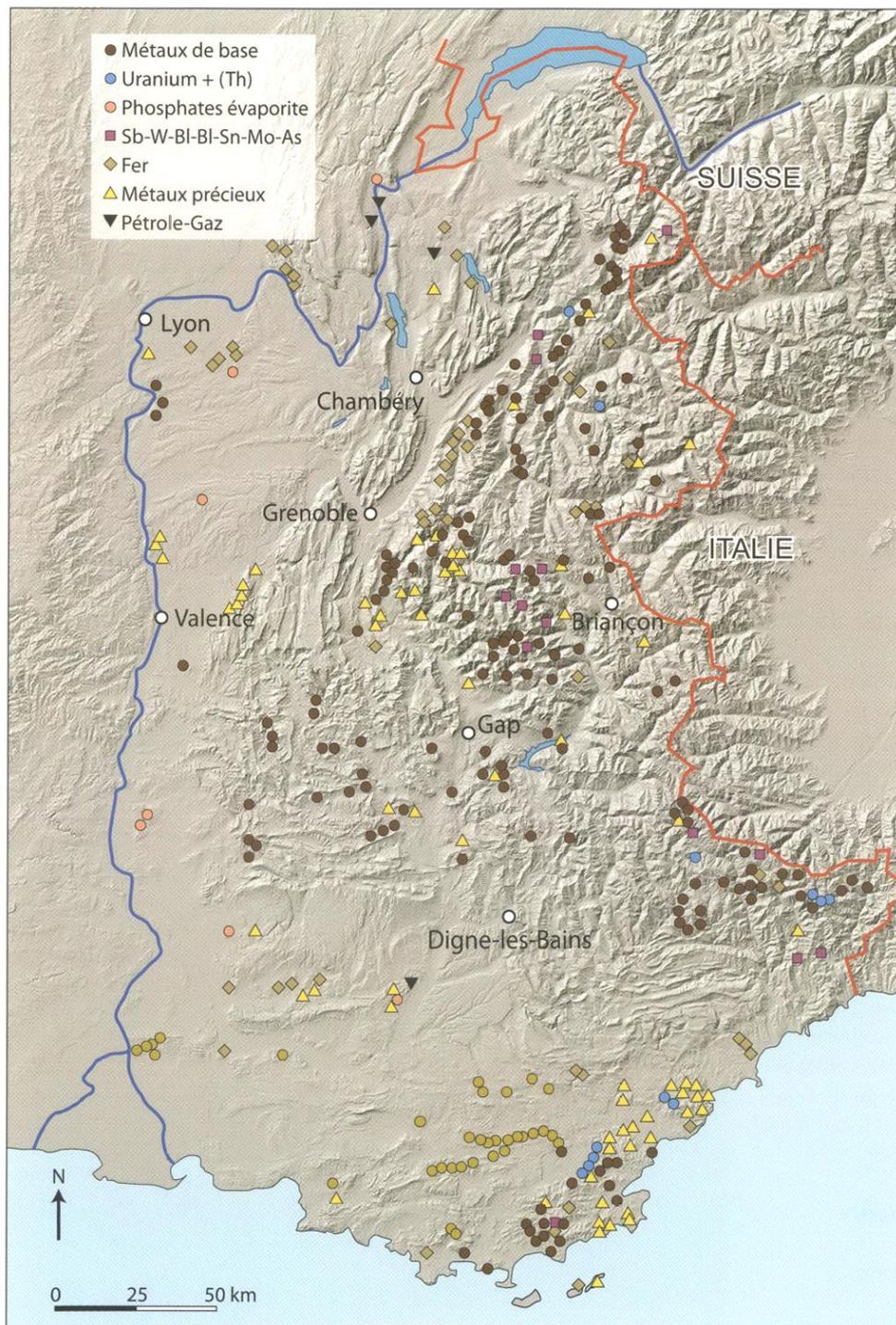


Figure 3 - Carte de localisation des gisements et gîtes métallifères dans les Alpes françaises (d'après : <http://sigminesfrance.brgm.fr>). Métaux précieux : Au, Ag, Pt. Métaux de base : Cu, Pb, Zn.

Georges d'Hurtières regroupe à lui seul 27 filons* et indices* minéralisés et 5 amas minéralisés (Figure 5). Par ailleurs, des mines connues (p. ex. mines de fer sidérolitique du massif des Bauges) ne sont pas présentes dans l'inventaire en ligne du BRGM.

Tableau 1 - Inventaire des gisements et gîtes métallifères dans les différents départements alpins ; (1) : tous métaux et toutes substances ; source BRGM : <http://sigminesfrance.brgm.fr>.

	Fe	Cu	Pb	Au	Tous ⁽¹⁾
Haute-Savoie	3	-	12	1	21
Savoie	12	8	21	-	54
Isère	22	3	12	2	62
Hautes-Alpes	1	11	16	1	52
Alpes de Haute Provence	-	-	4	-	10
Alpes-Maritimes	4	20	5	-	49
Total	42	42	70	4	248

La comparaison entre les cartes des Figures 2 et 3 indique que la localisation de ces différents gisements n'est pas du tout aléatoire, mais est très fortement dépendante des unités géologiques encaissantes. Les Alpes externes concentrent en effet la quasi-totalité des gisements métallifères : les gisements étant spa-

tialement associés aux massifs cristallins externes ou aux sédiments permo-triasiques. En outre, dans les Alpes internes, les rares gisements sont principalement présents dans la zone briançonnaise, au sein des formations de la zone houillère (sédiments carbonifères).

III - APERÇU DE LA MÉTALLOGÉNIE DES MÉTAUX DE BASE DANS LES ALPES FRANÇAISES

La Figure 3 montre que les Alpes présentent une très grande diversité de gisements métallifères. Bien que cet article ne s'intéresse qu'aux métaux de base (Fe, Pb-Zn, Cu), notons qu'outre ceux-ci, les Alpes françaises possèdent des indices, gîtes et gisements d'antimoine, d'étain, de tungstène, de fluorite, de mercure, de molybdène, de nickel, de cobalt, d'uranium, etc.

1 - Métallogénie du Fer

Une quarantaine de gîtes et gisements de fer ont été identifiés par le BRGM dans les Alpes (Figure 4) où deux types de gisements de fer ont été exploités au moins depuis le Moyen-Âge (Gasquet et Paillet, 2014 ; voir Rossi, 2014, pour une synthèse de la formation des gisements de fer) : (i) les gisements filoniens hydrothermaux, et (ii) les gisements de fer issus de l'altération (altérites), nommés localement fer sidérolithique.

a - Les gisements filoniens hydrothermaux

Les gisements filoniens hydrothermaux à sidérite sont particulièrement abondants dans le massif de Belledonne où plus d'une centaine d'indices, gîtes et gisements ont été identifiés (Cabrol, 1967 ; Court, 1971 ; Ducros, 1974). Le massif possède toutefois trois districts miniers répartis sur les communes d'Allevard et de Saint-Georges d'Hurtières, ainsi

qu'au Col de la Mine de Fer. La mine de Saint-Georges d'Hurtières ayant fait l'objet de nombreuses études, elle servira d'exemple pour illustrer la formation de fer filonien.

La mine de Saint-Georges d'Hurtières (Figures 4 et 5) a été exploitée dès le Moyen-Âge d'abord pour le cuivre et l'argent (au moins depuis la fin du 13^e siècle), puis pour le fer dès le 15^e siècle. L'exploitation atteint son apogée aux 18^e et 19^e siècles, mais ne pouvant faire face à la concurrence des mines de Lorraine, la mine de Saint-Georges d'Hurtières est définitivement

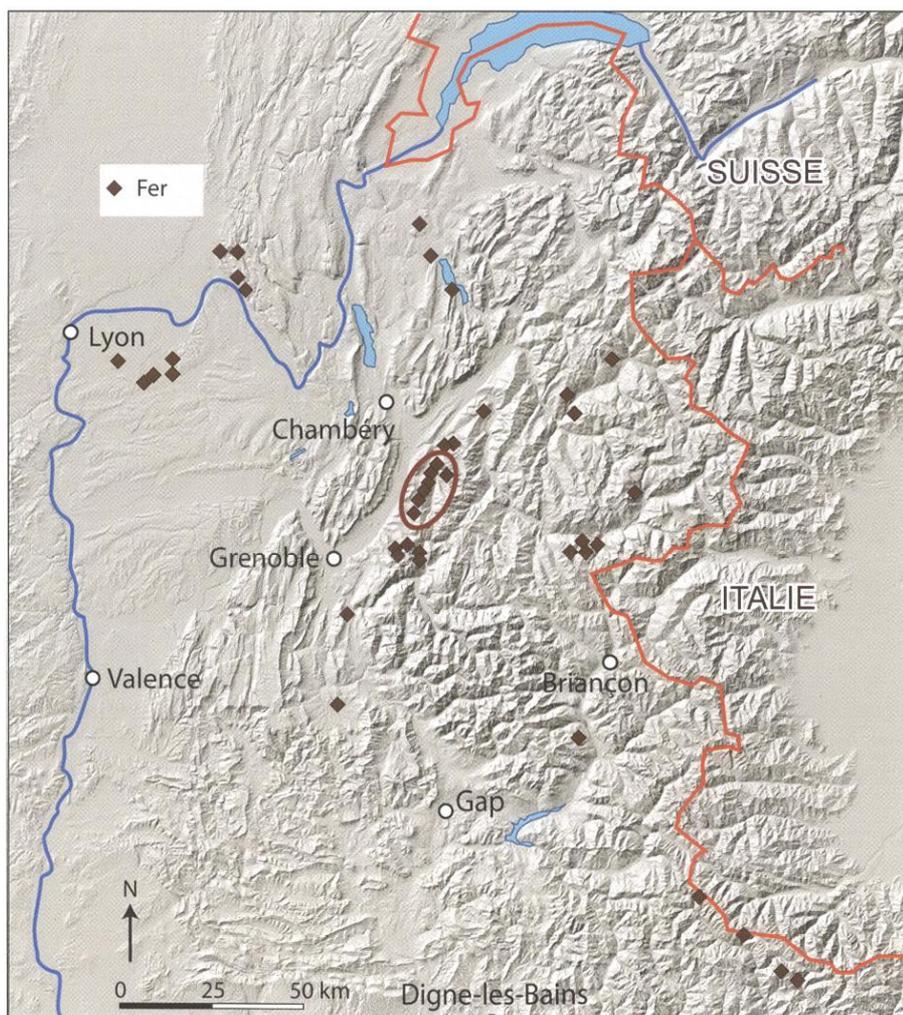


Figure 4 - Carte des gisements et gîtes de fer dans les Alpes françaises. Le cercle brun délimite les gisements filoniens du massif de Belledonne (d'après : <http://sigminesfrance.brgm.fr>).

abandonnée en 1931. L'exploitation, qui dura donc plus de 700 ans, aura permis le creusement de plus de 22 km de galeries souterraines, afin de suivre le filon minéralisé le long du versant, sur 522 m de dénivellée (Figure 5 et 6). *In fine*, ce sont plus de 1,5 millions de tonnes de sidérite (minerai de fer à 36% de Fe) qui ont

été extraites de la mine, ainsi que plusieurs dizaines de milliers de tonnes de chalcopyrrite (minerai de cuivre ; Figure 7).

Le filon de quartz + sidérite est plus ou moins parallèle au versant, d'orientation générale NW-SE, avec un pendage de 20 à 60° vers le SW et une puissance maxi-

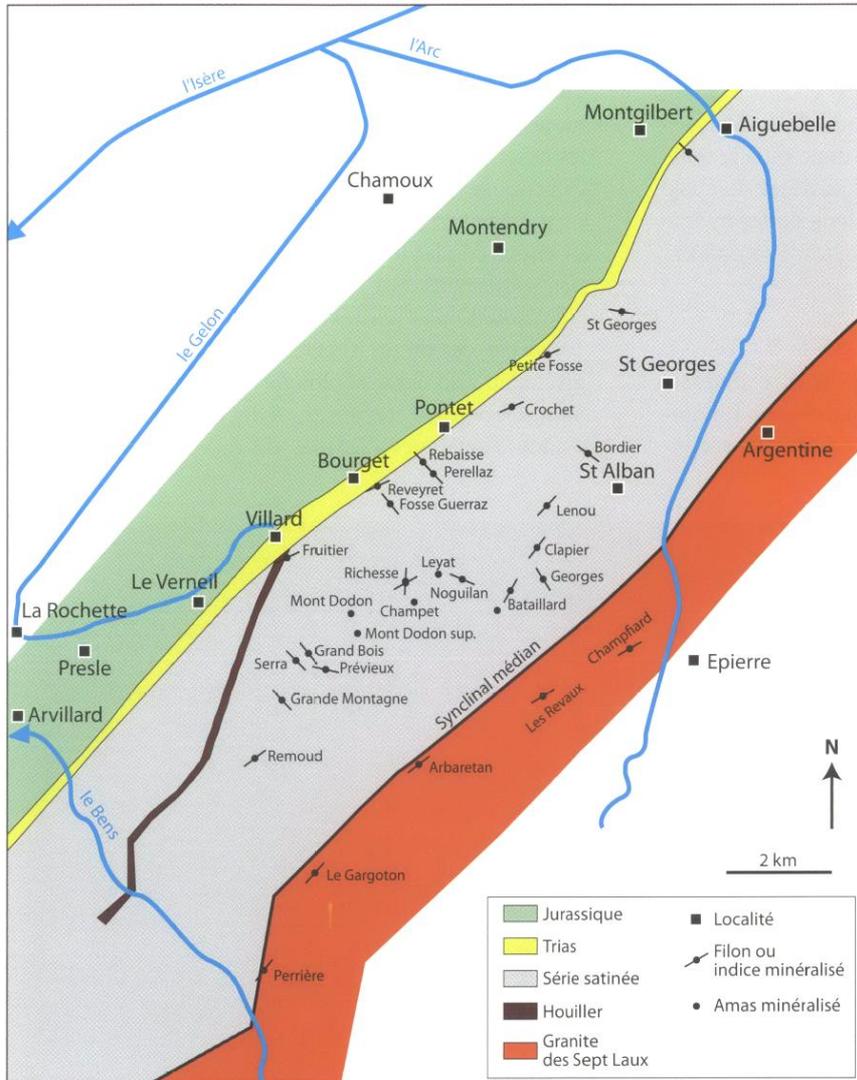


Figure 5 - Le district Fe-Cu de Saint-Georges d'Hurtières (Savoie) : un exemple de l'abondance de filons, indices et amas minéralisés à des échelles variables.

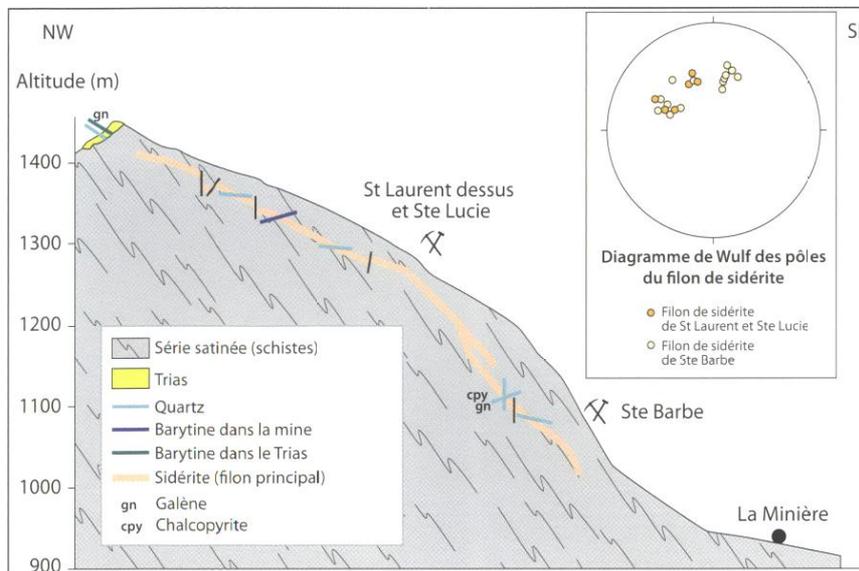


Figure 6 - Coupe NW-SE de la mine de Saint-Georges et diagramme de Wulff des pôles du filon de sidérite de Saint-Laurent du filon de sidérite (d'après Cabrol, 1967).

male de 10 m. Trois phases de minéralisations hydrothermales ont été identifiées dans le district (Beuchat, 1999 ; Beuchat et *al.* 1999 ; Gasquet et *al.*, 2001) : (i) filons de sidérite manganésifère + quartz, (ii) filons de quartz riche en sulfures (chalcopryrite, pyrite, galène, sphalérite, tétraédrite...) et en goethite, et (iii) filons de barytine à quartz + galène.

Les minéralisations des deux premières phases, sont uniquement localisées dans les micaschistes* du socle* ; leur âge est estimée entre 320 et 260 Ma (fin du Carbonifère - Permien). Les filons de la phase 3 recourent les grès triasiques et sont donc plus récents (fin du Trias - Lias) : ils sont associés au début du cycle alpin. Ainsi la minéralisation* des filons de fer hydrothermaux est polyphasée, avec une histoire complexe.

b - Le fer sidérolithique

L'origine du fer sidérolithique peut être diverse. Il s'agit soit (i) de concrétions ferrugineuses limonitiques (oxydes et hydroxydes de fer) déposées secon-

dairement par remaniement de dépôts ferrugineux du Dogger (Jurassique), et/ou (ii) de formations résiduelles liées à l'altération pédogénétique*, telle que la latérisation, des roches sous un climat tropical, ce qui aboutit à la concentration d'oxydes de fer (goethite, limonite, hématite) et d'aluminium suite au lessivage* des autres éléments chimiques plus mobiles. Dans le cas des Alpes, ces formations ferrallitiques* ont été remaniées par les eaux et accumulées au cours de l'ère Tertiaire (Eocène-Oligocène) dans les poches karstiques des calcaires urgoniens et le long de failles dans les massifs des Bauges (Sambuy, Semnoz, etc.) et de la Chartreuse (Figure 8 ; Deschamps, 1973).

Il s'agit principalement de nombreux, mais petits gisements de fer (quelques dizaines de mètres de galeries seulement), qui ont été exploités dès le Moyen-Âge, notamment par les Chartreux. Cependant, dès le 19^e siècle, ces mines ont été abandonnées au profit des gisements filoniens de plus fort tonnage (par exemple, Saint-Georges d'Hurtières, Allevard). Meloux (1975) estime à quelques dizaines de milliers de tonnes de

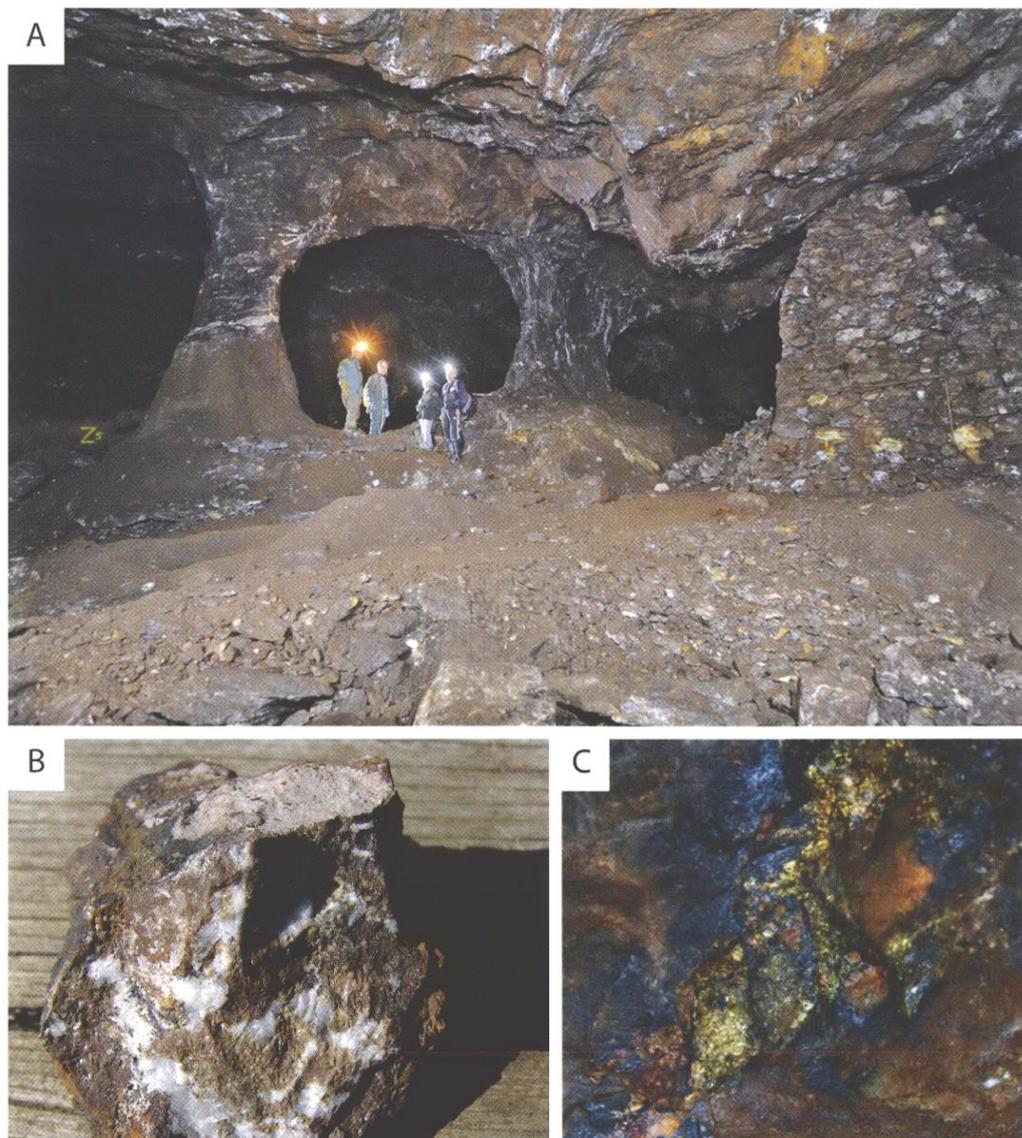


Figure 7 - Photos de la mine de fer filonien de Saint-Georges d'Hurtières (Savoie) et des minéralisations.

A) Les trois piliers, secteur Trinité.

B) Bloc de sidérite (minerai de fer).

C) Veine de chalcopryrite (minerai de cuivre).

Photos Robert Durand.

fer sidérolithique extraites pour l'ensemble des Alpes françaises.

2 - Métallogénie du Plomb-Zinc(-Argent)

Les gisements de Pb-Zn sont les plus abondants dans les Alpes : environ 70 gisements ont été inven-

torisés par le BRGM, dont la quasi-totalité est située dans les Alpes du Nord (Figure 9). Cependant, malgré la présence de très nombreux gîtes de Pb-Zn, les tonnages sont relativement faibles. Les gisements peuvent être distingués en trois catégories, associées à des modes de formation différents : (i) les gisements filoniens, (ii) les amas calaminaires, et (iii) les couches lenticulaires.

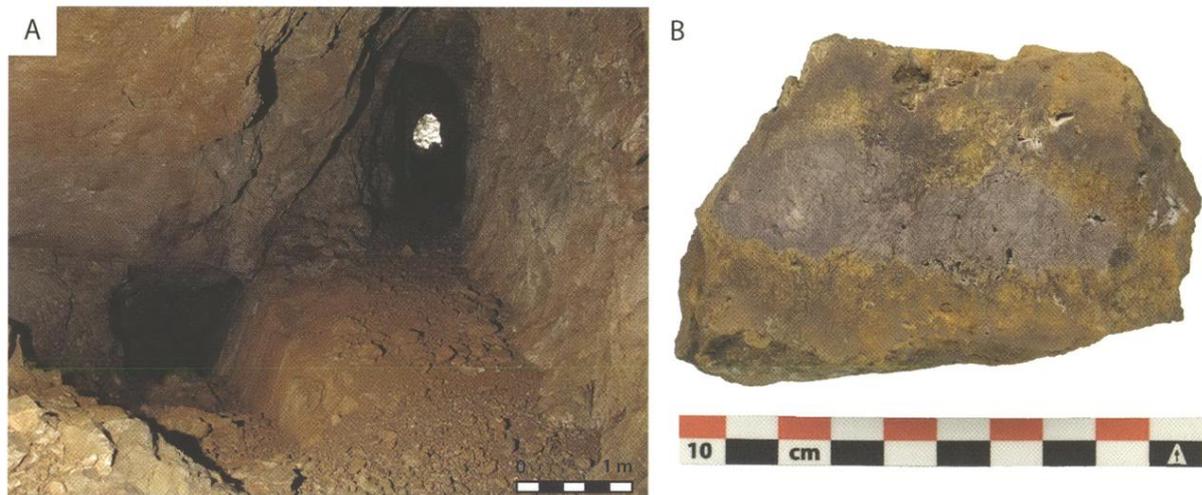


Figure 8 - Photos de la mine de fer sidérolithique de la Sambuy (massif des Bauges, Savoie). A) Galeries de mine (photo Robert Durand). B) Échantillon de minerai de fer : sidérite rosée au centre entourée d'oxydes et d'hydroxydes de fer (bruns à orangés).

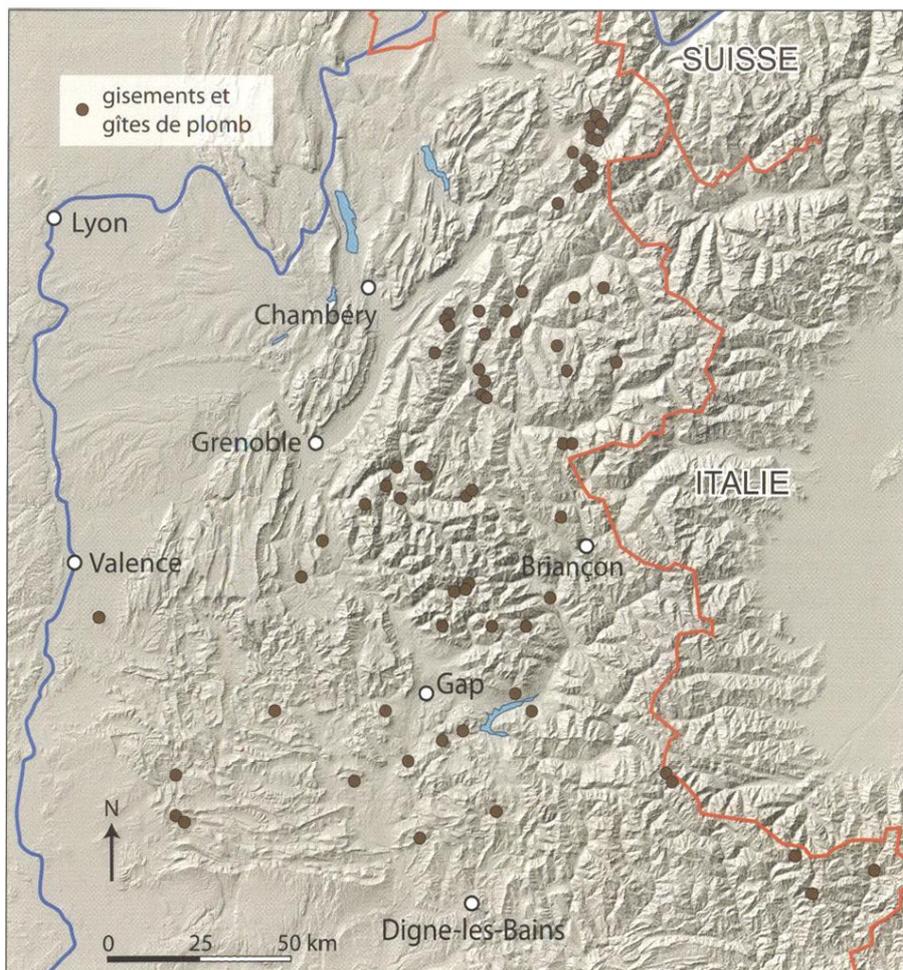


Figure 9 - Carte des gisements et gîtes de plomb dans les Alpes françaises (d'après : <http://sigminesfrance.brgm.fr>).

a - Les gisements filoniens à galène + sphalérite + pyrite + chalcoppyrite

Les gisements filoniens à galène + sphalérite + pyrite + chalcoppyrite sont les plus fréquents. Ils sont essentiellement localisés dans les Massifs Crystallins Externes (p. ex. Rocheray) et dans la zone Briançonnaise (p. ex., Mine des Sarrasins), et s'accompagnent souvent de cuivre gris et de mispickel (Caby, 1963 ; Ochoa, 1979).

La nature des minéraux de gangue qui accompagnent la minéralisation varie d'un massif à l'autre : la gangue est fluorée dans le massif du Rocheray, à sidérite dans la région de Belledonne (Alleverd) et la zone Briançonnaise, à barytine dans les massifs du Mont Blanc, des Grandes Rousses, du Pelvoux et parfois également dans le massif du Rocheray (Meloux, 1975).

b - Les amas calaminaires

Les amas de calamine (mélange de smithsonite, d'hémimorphite et de zincite) sont associés à de grands accidents NE-SW qui recoupent les séries subalpines méridionales et qui se prolongent jusqu'au Pyrénées centrales en passant par les Cévennes et la Montagne Noire. Ainsi, dans les Alpes, les amas calaminaires sont essentiellement concentrés dans le Diois, au sein des roches du Jurassique supérieur. Ces gisements ont été essentiellement exploités à la fin du 19^e siècle, entre les années 1880 et 1910. Le gisement le plus important est celui de Menglon (Drôme) : il a fourni 80 000 tonnes de smithsonite, à partir d'une lentille de 800 x 100 m et d'un mètre de puissance. Les autres gisements ne fourniront chacun que quelques milliers de tonnes de minerai (Meloux, 1975).

c - Les couches lenticulaires

Dans les séries du Permo-Trias de la zone Briançonnaise se trouvent des gisements de plomb-zinc sous forme de couches lenticulaires, qui représentent les plus gros gisements de Pb-Zn des Alpes (mines de La Plagne, Peisey, L'Argentière-La Bessée), considérés comme épuisés (Meloux, 1975).

La *mine de La Plagne* (Savoie) est sans doute la plus grande mine de Pb-Zn de Savoie. Bien que des indices témoignent de fouilles et d'une possible exploitation ancienne (15^e siècle au moins, voire dès l'époque romaine), la mine a été redécouverte en 1807 et fut exploitée jusqu'en 1971 (Meloux, 1975 ; Durand, 2005). Avec ces 150 600 tonnes de plomb et 350 tonnes d'argent extraites au 20^e siècle, elle a été la troisième plus grande mine de plomb en France. Le gisement a été exploité sur un volume de 900 x 500 x 160 m, à travers un réseau d'environ 30 km de galeries situées entre 1 767 m et 1 960 m d'altitude (Figure 10 ; Durand, 2005). La minéralisation se présente sous forme de lentilles de galène en remplissage de fractures, sous forme filonienne et disséminée dans les quartzites triasiques.

La *mine de Peisey* (Savoie), d'un tonnage plus modeste (22 000 tonnes de plomb et 53 tonnes d'argent) est située à quelques kilomètres de la mine de La Plagne, dans un contexte similaire. Si le gisement de plomb-argentifère, situé vers 1 600 m d'altitude a été exploité dès l'époque romaine, la mine a été redécouverte en 1714 et exploitée jusqu'en 1865 (21 000 tonnes de Pb + 53 tonnes d'Ag extraites ; Meloux, 1975). Entre 1802 et 1813, l'École Pratique des Mines, qui fut fondée à Moutiers profita de la proximité de la mine de Peisey pour former une trentaine d'ingénieurs des mines via des stages pratiques et des travaux sur le terrain.

Comme en Savoie, la *mine de L'Argentière-La Bessée* (Hautes-Alpes), aussi appelée mine du Fournel, a été exploitée au moins dès le 12^e siècle, avec une exploitation intensive au cours du 19^e siècle, jusqu'en 1908, année de fermeture définitive de la mine. La minéralisation Pb-Zn est essentiellement localisée le long d'un filon NW-SE de 500 x 180 m et de puissance variable (0-8 m) mais généralement inférieure à 1,50 m, encaissé dans les quartzites triasiques. La minéralisation est discontinue dans le filon, formant des lentilles massives décamétriques à métrique de galène argentifère, alternant avec des zones de minerai plus diffus et des zones stériles (gangue de quartz ou de barytine ; Py, 2009). La minéralisation se serait mise en place à l'Eocène-Oligocène, entre 36 et 39 Ma, le long de failles normales dextres (Maignac et al., 2000 ; Feybesse et al., 2004). Environ 30 000 tonnes de minerai à 40 % de plomb ont été extraites, soit environ 12 000 tonnes de plomb et une quantité non négligeable d'argent (env. 1350 g/t d'Ag ; Meloux, 1975).

3 - Métallogénie du Cuivre

Une quarantaine de mines et de gîtes de cuivre ont été inventoriés par le BRGM (Figure 11), dont la moitié se situe dans les Alpes-Maritimes. Deux types de gisements ont été identifiés : les gisements filoniens et les gisements associés à des roches ophiolitiques.

Les gisements filoniens sont le plus souvent encaissés dans le socle des massifs cristallins externes. L'exploitation de cuivre filonien la plus importante est celle de Saint-Georges d'Hurtières, qui a été exploitée au moins dès le Moyen-Âge. D'après Cabrol (1967) 430 tonnes de cuivre ont été extraites des 22 km de galeries. Ces gisements sont essentiellement associés aux sulfures de Pb-Zn. Ils sont constitués d'un assemblage de cuivre gris et de bournonite.

Dans les Alpes du Sud, on trouve de nombreuses petites mines de cuivre autour du Dôme de Barrot, ainsi que dans le massif de l'Argentera-Mercantour. Les gisements stratiformes diagénétiques-épigénétiques situés au contact Permo-Trias (2 à 50 cm de puissance) ont été les plus exploités. La minéralisation triasique à chalcocite + digénite + covellite a ensuite été remobilisée par des fluides hydrothermaux au

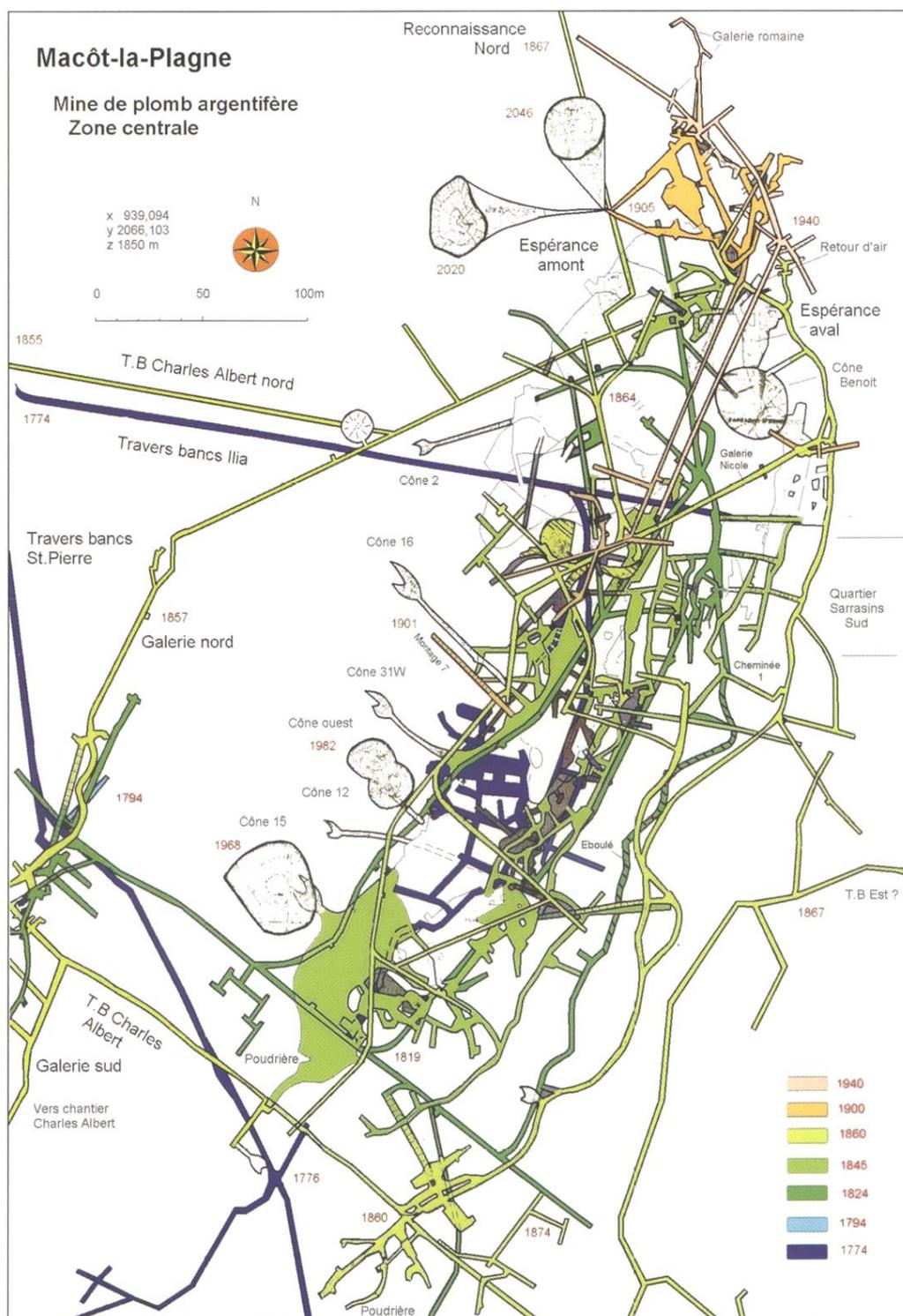


Figure 10 - Réseau de galeries de la mine de Pb-Ag de La Plagne (Savoie). Archives personnelles, R. Durand.

cours de l'orogénèse alpine, pour former des filons minéralisés (Cu natif + cuprite + arséniures de cuivre + Ag natif ± Au natif) encaissés dans les pélites permianes et les grès triasiques (Vinchon, 1984). Bien que 2500 tonnes de cuivre aient été extraites entre 1880 et 1886 de la mine du Cerisier, ces gisements n'avaient que peu d'importance économique (Mari, 1992).

A Saint-Véran (Hautes-Alpes), le cuivre se trouve sous forme de bornite, de chalcopryrite, de cuivre natif et de chalcocite, au contact entre les schistes lustrés et les serpentinites de la Zone Piémontaise. La mine, située à 2500 m d'altitude, n'a connu que deux phases d'exploitation : l'une, ancienne, débutée avant le 13^e siècle ; et l'autre au début du 20^e siècle, qui a donné plus de 1 000 tonnes de cuivre.

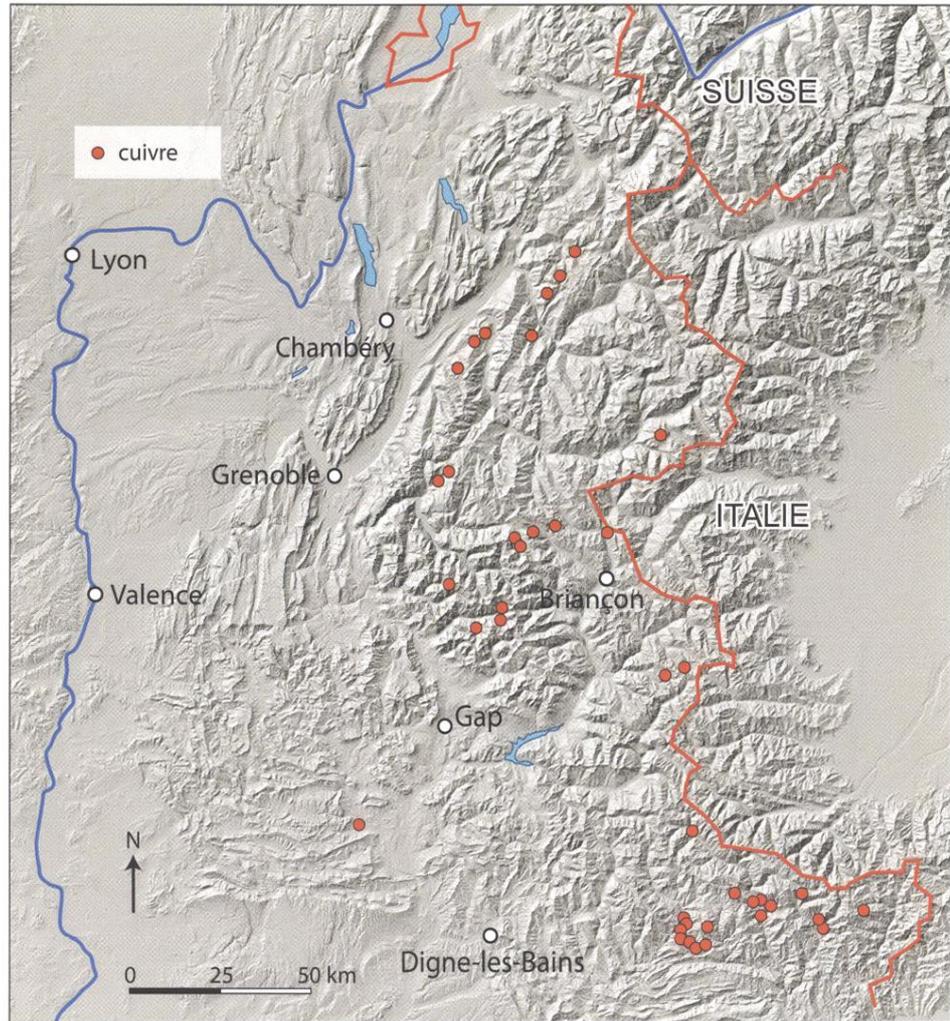


Figure 11 - Carte des gisements et gîtes de cuivre dans les Alpes françaises (d'après <http://sigmines-france.brgm.fr>).

IV - MÉTALLOGÉNIE DE L'OR ET DE L'ARSENIC

Seuls quelques gîtes et gisements d'or et d'arsenic ont été inventoriés par le BRGM dans les Alpes. Il s'agit (i) soit de gisements filoniens, (ii) soit de placers alluvionnaires.

a - Les gisements filoniens

Dans le massif de Belledonne, on trouve des filons à mispickel et pyrite qui ont été exploités dans la mine de Saint-Paul-sur-Isère (Savoie). La minéralisation se concentre dans une zone broyée au sein des micaschistes de la Série Satinée (anciennes roches sédimentaires deltaïques, d'âge Paléozoïque inférieur probable) entre 455 m et 640 m d'altitude. Elle est caractérisée par une forte concentration de mispickel aurifère associé à une gangue de quartz. Environ 600 tonnes de minerai à 50% d'As, 3 à 38 g/t d'Au et 8 à 27 g/t d'Ag ont été extraites entre 1910 et 1944 le long des 725 m de galeries, pour une production finale de seulement 10 kg d'Au (Meloux, 1975 ; Durand, 2005).

De manière plus générale, dans les massifs cristallins externes, on trouve des filons à brannérite +

or natif et/ou à annabergite + cuivre gris + galène + sphalérite, minéraux dans lesquels l'or est présent sous forme d'inclusions. La mine de La Gardette (Isère), encaissée dans le socle hercynien en périphérie du massif du Pelvoux, est la plus connue. La recherche d'or y aurait débutée en 1733, mais l'exploitation réelle n'aura été qu'intermittente, entre le début et la fin du 19^e siècle (Poty, 1967). La minéralisation à Au-As s'associe à des filons de quartz très purs (la mine de La Gardette a été essentiellement exploitée pour le quartz) d'orientation ESE-WNW et incliné vers le SSW de 70-80°. Les teneurs en or y sont toutefois très faibles : seuls quelques kilogrammes d'or ont été extraits, à partir d'un filon de 500 m de long et de 0,5 à 1 m de puissance (Meloux, 1975).

b - Les placers alluvionnaires

Bien que l'or soit présent en de faibles quantités dans de nombreux filons, il est relativement fréquent dans les gisements alluvionnaires (placers) : les orpailleurs trouvent de l'or dans toutes les vallées alpines (Figure 12). Si un filon ou une roche conte-



Figure 12 - A) Orpillage dans la vallée du Chéran. B) Fond de batée. C) Pépites d'or.

nant de l'or est altéré et que les produits d'altération sont transportés par les eaux de ruissellement, l'or, qui est très dense, va s'accumuler sur le fond des rivières dans des pièges divers, alors que les particules moins denses seront transportées au loin et évacuées. Ces zones d'accumulation de minéraux lourds (dont l'or) sont appelées des placers. Dès les années 1970, des travaux de prospection ont été menés par le BRGM sur les alluvions aurifères du Chéran (Savoie ; Jacqueson et Meloux, 1971). La question de l'origine primaire de l'or du Chéran n'a cependant été abordée que récemment (Allignol et Gasquet, 2014). Le bassin versant du

Chéran ne contenant pas de roches cristallines, mais uniquement des roches sédimentaires cénozoïques, une origine filonienne semble exclue. D'après Allignol et Gasquet (2014), l'or du Chéran pourrait provenir (i) de la remobilisation de paléo-placers contenus dans les molasses oligo-miocènes, ou (ii) de la remobilisation d'or contenu dans les alluvions et/ou tills quaternaires. Dans ce cas, l'or serait initialement issu de la désagrégation des roches cristallines aurifères des Massifs Cristallins Externes des Alpes, alors que dans le premier cas, le plus probable, il pourrait également provenir du Massif Central (Beck *et al.*, 1998).

IV - IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MINES ABANDONNÉES

Les Alpes françaises possèdent de très nombreuses mines qui ont toutes fermé au cours du 20^e siècle (la dernière mine – La Plagne – a fermé en 1971) et qui depuis ont été laissées en l'état (seuls les accès ont été sécurisés). Or, si le BRGM a recensé plus de 250 gîtes ou gisements dans les Alpes, ce recensement regroupe parfois plusieurs indices ou gîtes en un scul, si bien que le nombre exact d'indices, de gîtes et de gisements est en réalité fortement sous-estimé. L'existence d'une multitude de mines abandonnées, éparpillées sur tout le territoire alpin, à toutes altitudes, et non inventoriées pour certaines, constitue un véritable enjeu socio-environnemental.

Le risque d'effondrement des galeries souterraines représente l'un des principaux dangers de ces mines abandonnées. En effet, selon la nature de l'encaissant, et la taille des galeries, le toit et les parements de celles-ci peuvent avoir tendance à s'affaisser, jusqu'à atteindre un seuil de rupture. Dans de nombreuses mines, de tels affaissements s'observent à travers le démantèlement des boiseries d'étayage (Figure 13 A), et les chutes de blocs. Si dans certains cas, les galeries ou les salles ont été consolidées par des étayages ou des murs de pierres sèches (Figure 13 B), ce n'est pas le cas partout et cela demeure parfois insuffisant. Par ailleurs, l'effondrement de galeries ou de parties

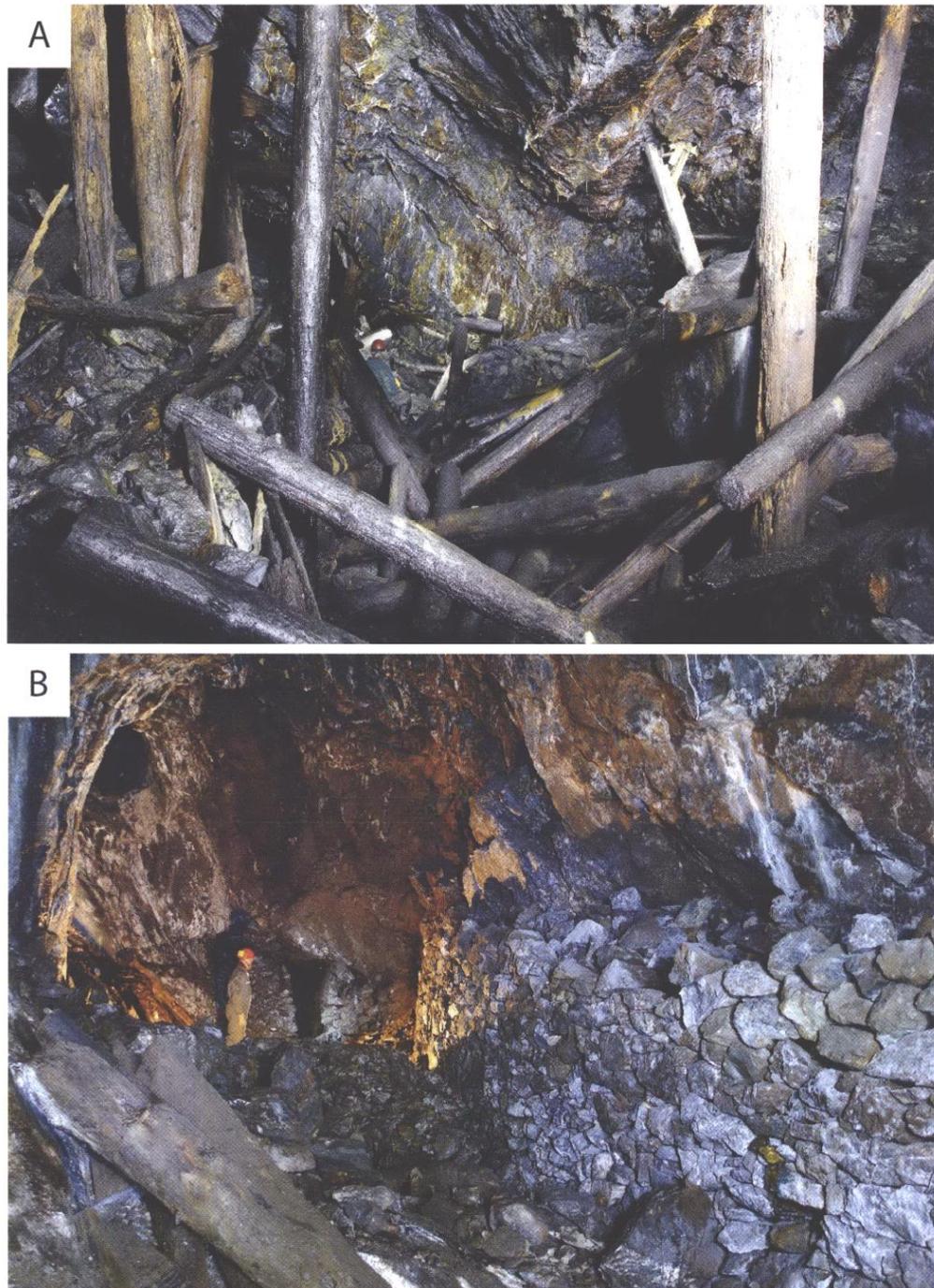


Figure 13 -

A) Affaissement du toit dans une galerie des mines d'Arêches (Savoie). Noter les bois d'étayage disposés en mikado.

B) Murs de soutènements en pierres sèches dans la mine de Saint-Georges d'Hurtières (Savoie). Photos R. Durand.

entières de mines, peut se répercuter à la surface (affaissement ou effondrement du sol), entraînant des conséquences catastrophiques dans le cas où les galeries sont désormais situées sous des zones anthropisées, comme c'est le cas pour une partie des 30 km de galeries de la mine de La Plagne. Si de nombreuses entrées de mines ont été obstruées (dynamitage, mise en place de portes verrouillées), la plupart des entrées de galeries sont laissées à l'abandon pour le plus grand plaisir des spéléologues et des minéralogistes amateurs. Cependant, une telle pratique doit être considérée avec une très grande vigilance, compte tenu des

risques d'effondrement potentiels et de l'ennoyage de certaines galeries.

L'autre enjeu concerne la pollution des eaux (souterraines ou de surface) et des sols en métaux. En effet, les minéraux métalliques s'oxydent et s'altèrent facilement au contact de l'air ou de l'eau. Les produits d'altération sont généralement solubles et sont ainsi plus aisément transportés par les eaux de pluie et les eaux d'infiltration. Par exemple, au contact de l'air humide, la chalcopirite (CuFeS_2) et la galène s'altèrent en sulfates complexes de Cu comme la linarite ($\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$) qui est soluble, et en oxydes et

hydroxydes de fer (Figure 14). De manière générale, l'oxydation des sulfures en sulfates libère du SO_2 , ce qui contribue à acidifier les sols, les eaux d'infiltration, les eaux de surface situées en aval, et à les enrichir en métaux. Les haldes*, qui sont essentiellement constituées de roches stériles mais qui contiennent également une quantité variable de minerai résiduel, sont généralement stockées à l'extérieur, à proximité de l'entrée des mines. Ces haldes sont par conséquent soumises aux intempéries et au contact de l'air, et vont donc être particulièrement sensibles à l'oxydation et à l'altération. Elles constituent ainsi des sources potentielles de pollution. Cette pollution est particulièrement sensible aux crues, annuelles, décennales ou centennales, car ces crues peuvent arracher les minéraux sulfurés des haldes et les transporter dans les lits des rivières, où ils seront ensuite altérés (Egal et al., 2006). Ainsi, en dispersant les minéraux métalliques, les crues favorisent la dispersion des sources de pollution. Une question scientifique encore mal connue concerne le temps de rémanence des métaux dans les sols et dans les eaux, qui peut être très long : les sédiments des rivières Tinto et Odiel, qui traversent

la Ceinture Ibérique Pyriteuse en Espagne, présentent des traces de pollution en métaux depuis plus de 4 800 ans, soit dès les premières exploitations préhistoriques de cuivre et de fer (Davis et al., 2000). Compte tenu de la multitude d'indices et de sites miniers présents dans les Alpes, et du contexte hydrologique (crues fréquentes), ce sont des centaines de haldes disséminées sur tout le territoire qui sont sources potentielles de pollution, et dont la localisation exacte est désormais souvent inconnue. Si toutes les Alpes ne sont pas nécessairement polluées par les métaux, la pollution est diffuse, et concentrée sur certains sites. Des études réalisées en 2004 ont indiqué que les teneurs en arsenic de certaines sources du massif de la Lauzière (Savoie ; 4,4-104 $\mu\text{g/l}$) dépassaient parfois largement le seuil de potabilité (10 $\mu\text{g/l}$, World Health Organization, 2011; EDYTEM, 2004 ; Sonney et al., 2005 ; Tisserand et al., 2014). Des mesures ont depuis été prises pour faire diminuer la teneur en arsenic de ces eaux. Cependant, le nombre important de gisements métallifères et leur dispersion sur l'ensemble du territoire alpin, font qu'il est très difficile de traiter la pollution sur l'ensemble des sites.



Figure 14 - A) Traces d'arsenic sur les parois de la mine de Saint-Paul sur Isère. B) Galeries emoyées dans la mine de Saint-Paul sur Isère. C) Traces de linarite probable, sulfate très soluble formé par l'altération de sulfures peu solubles, dans la mine de Saint-Georges d'Hurtières. Photos Robert Durand et Dominique Gasquet.

CONCLUSION

Les Alpes possèdent un patrimoine minier tout à fait exceptionnel, caractérisé par de très nombreux gisements métallifères, disséminés sur tout le territoire, mais de petits tonnages. Quelques « gros » gisements ont été exploités ; ceux-ci sont généralement de types hydrothermaux : filons encaissés dans les massifs cristallins externes ou amas dans les formations du Permo-Trias. Si l'exploitation des métaux dans les Alpes remonte à l'Antiquité, la principale période d'exploitation se situe aux 19^e et au début du 20^e siècle. Les faibles tonnages de la plupart des mines alpines font que certains gisements ont été rapidement épuisés. Dans un contexte (i) de découverte de gisements de classe mondiale et (ii) de mise au point de nouveaux procédés de traitement du minerai permettant d'exploiter et de valoriser du minerai issu de gisements plus faciles à atteindre que dans les Alpes (p. ex., fer de Lorraine) ; les gisements alpins ont donc fini par ne plus être rentables. Ainsi, les mines alpines ont progressivement fermé à partir de la fin du 19^e siècle. L'exploitation passée des mines alpines n'est

cependant pas négligeable. En effet, ce sont plusieurs millions de tonnes de fer, 200 000 tonnes de plomb, 100 000 tonnes de zinc et 500 tonnes d'argent qui ont été extraites des mines alpines (Meloux, 1975).

Aujourd'hui toutes les mines alpines sont fermées et abandonnées aux aléas du temps et du climat. Ainsi, l'absence d'entretien des sites miniers conduit à un risque d'effondrement et de pollution des eaux et des sols aux alentours de certaines mines. Cependant, compte tenu de la multitude de mines, d'indices et de haldes abandonnés, dont les localisations sont en partie tombées dans l'oubli, il est actuellement inenvisageable que l'État, les régions ou les communes s'emparent de la totalité de ces problèmes. En effet, les coûts pour (i) inventorier l'ensemble des sites, indices et haldes miniers, et (ii) éviter les risques de pollution et d'effondrement seraient beaucoup trop élevés. Il faut donc éventuellement se concentrer uniquement sur les sites connus les plus problématiques, et attendre que le temps fasse son œuvre pour les autres sites.

GLOSSAIRE

Collision : confrontation de plaques lithosphériques liée à la tectonique des plaques.

Couverture : ensemble de terrains sédimentaires (ou volcaniques) reposant sur des formations plissées souvent métamorphiques et granitiques (appelées socle) et érodées avant le dépôt des roches de couverture.

Croûte continentale / océanique : partie la plus externe des enveloppes internes de la Terre.

Diagenèse : ensemble de processus physico-chimiques qui participent à la transformation d'un sédiment meuble en roche sédimentaire consolidée.

Diagénétiques-épigénétiques : on entend par diagénétiques les minéralisations formées pendant la diagenèse et par épigénétiques les minéralisations formées postérieurement aux roches qui les portent (filons par exemple).

Ferralitisation : processus d'altération caractérisé par la dégradation de tous les minéraux et la concentration sur place de l'aluminium et du fer sous forme d'oxydes.

Filon : correspond au remplissage d'une fracture par des minéraux déposés à partir de fluides aqueux chauds.

Gangue : ensemble de roches ou de minéraux sans intérêt pratique ni économique, englobant des minéralisations.

Gisement : site de concentration d'un ou plusieurs éléments qui peuvent être exploités avec profit.

Gîte : cf. gisement mais non économiquement exploitable.

Halde : accumulation de blocs extraits de la mine et stockés à l'entrée des mines car pauvres en minéralisation (roche encaissante + minéraux de gangue + minéralisation non rentable).

Hercynien (ou varisque) : cycle orogénique débutant au Dévonien et se terminant au Permien Il est responsable de la formation de la chaîne de montagne hercynienne, qui est une chaîne ancienne (450-300 Ma) dont on retrouve des témoins dans le Massif Armoricain, le Massif Central, les Vosges et les massifs cristallins externes des Alpes françaises (Aiguilles Rouges, Mont Blanc, Lauzière, Belledonne, Grandes Rousses, Pelvoux, Argentera).

Indice : traces d'une substance en un lieu donné permettant d'envisager un gisement à proximité. Les indices servent de guides pour la découverte de gisements.

Lessivage : on entend ici par lessivage l'entraînement de cations issus de processus de dissolution ou d'hydrolyse, par les eaux d'infiltration. Il s'agit ici d'un abus de langage : en effet, en pédologie (étude des sols) on parlera ici de lixiviation, alors que le terme de lessivage sera réservé au transport d'argiles en suspension.

Micaschiste : roche métamorphique commune à grain moyen, riche en lamelles de micas.

Minéralisation : concentration locale de substances métalliques.

Pédogénèse/pédogénétique : ensemble de processus d'altération des roches aboutissant à la formation d'un sol.

Socle : ensemble des formations plissées, le plus souvent d'origines métamorphiques et granitiques, qui ont été érodées, et sur lesquelles reposent des formations sédimentaires ou volcaniques (appelées couverture).

Subduction : enfouissement de la lithosphère océanique ou continentale dans le manteau.

Vergence : sens de déplacement de l'unité supérieure au cours d'un chevauchement.

MINÉRALOGIE

Minéral	Formule chimique	Classe minérale
Annabergite	$Ni_3(AsO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$	Arséniure
Barytine	$BaSO_4$	Sulfate
Bornite	Cu_3FeS_4	Sulfure
Brannérite	$(U,Ca,Ce)(Ti,Fe)_2O_6$	Oxyde
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	Sulfure
Chalcocite	Cu_2S	Sulfure
Covellite	CuS	Sulfure
Cuprite	Cu_2O	Oxyde
Digénite	Cu_9S_5	Sulfure
Galène	PbS	Sulfure
Goethite	$FeO.OH$	Oxyde
Hématite	Fe_2O_3	Oxyde
Hémimorphite	$Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot (H_2O)$	Silicate
Limonite	$FeO.OH, nH_2O$	Oxyde
Linarite	$PbCuSO_4(OH)_2$	Sulfate
Miscpickel	$FeAsS$	Arséniosulfure
Pyrite	FeS_2	Sulfure
Quartz	SiO_2	Silicate
Sidérite	$FeCO_3$	Carbonate
Smithsonite	$ZnCO_3$	Carbonate
Sphalérite	ZnS	Sulfure
Tennandrite	$(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$	Arséniosulfure
Tétraédrite	$(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$	Antimoniosulfure
Zincite	$(Zn, Mn)O$	Oxyde

BIBLIOGRAPHIE

- AGARD P., LEMOINE M., 2003. Visage des Alpes : structure et évolution géodynamique. Commission de la Carte Géologique du Monde, Paris, 49 p.
- ALLIGNOL F., GASQUET D., 2014. L'or du Chéran. *In* Le Chéran, son karst et ses grottes. Actes de la 23^{ème} rencontre d'octobre, le Chatelard, Spéléo-Club de Paris, 6 p. (*sous presse*).
- BECK C., DEVILLE E., BLANC E., PHILIPPE Y., TARDY M., 1998. Horizontal shortening control of Middle Miocene marine siliciclastic sedimentation in the southern termination of the Savoy Molasse Basin (northwestern Alps/southern Jura): combined surface and subsurface data. *In* Mascle A., Puigdefabregas C., Lutherbacher H.P., Fernandez M. (eds), Cenozoic Foreland Basins of Western Europe. *Special Publication of the Geological Society of London*, 134, 263-278.
- BERTRAND J.-M., BOULLIER A.-M., 2013. Randonnées géologiques autour du gîte d'étape du Nant Brun. Vallée des Belleville, Tarentaise. Petit guide géologique pour randonneur curieux. Club Alpin Français. 13 p.
- BEUCHAT S., 1999. Le gisement polymétallique de St-Georges d'Hurtières, Savoie, France : le télescope de plusieurs événements hydrothermaux. Diplôme de l'Université de Genève, 96 p.
- BEUCHAT S., MORITZ R., CHIARADIA M., FONTIGNIE D., GASQUET D., HUNZIKER J., 1999. The sulfide-siderite St-Georges d'Hurtières deposit, external Crystalline Massifs of the French Alps: a result of overprinting hydrothermal events? *In*: C.J. Stanley et al. (eds.), Mineral deposits: processes to processing. Proceedings of the 5th biennial SGA meeting, London, England, 22-25 August 1999. Balkema Rotterdam, 1247-1250.
- CABROL B., 1967. Etude géologique et minière du massif des Hurtières : chaîne de Belledonne (Savoie). Thèse de 3^e cycle. Université de Grenoble, 134 p.
- CABY R., 1963. Etude géologique et métallogénique du bord interne de la zone houillère et de la bordure des schistes lustrés entre Modane et la vallée étroite (Savoie, Haut Val de Susa). Thèse de 3^e cycle, Université de Paris, 204 p.
- COURT P., 1971. Etude géologique et métallogénique de la Basse Maurienne. Thèse de 3^e cycle, Université de Grenoble, 179 p.

- DAVIES JR R.A., WELTY A.T., BORREGO J., MORALES J.A., PENDON J.G., RYAN J.G., 2000. Rio Tinto estuary (Spain): 5000 years of pollution. *Environmental Geology*, 39 (10), 1107-1116.
- DESCHAMPS M., 1973. Étude géologique du Sidérolithique du Nord-Est du Centre du Massif Central français et des terrains qui lui sont associés. Thèse d'Etat, Université de Paris VI, 1270 p.
- DUCROS J.-B., 1974. Étude géologique et géologique du massif d'Allevard : chaîne de Belledonne (Savoie). Thèse de 3^e cycle, Université de Grenoble, 189 p.
- DURAND R., 2005. Anciennes mines et carrières souterraines de Savoie. Hier et Aujourd'hui. Éd. Cléopas, 303 p.
- DURAND R., 2014. Les mines des Alpes du Nord, hier et aujourd'hui. In GASQUET D., ROSSI M. (dir.), Exploitations minières passées et présentes : impacts environnementaux et sociétaux. Actes du colloque Jacques Cartier, 26-27 novembre 2013, Université de Savoie, Le Bourget-du-Lac. *Collection EDYTEM*, 17, 13-22.
- EDYTEM, 2004. Suivi chimique qualitatif des nappes de l'Arc et de l'Isère. Rapport réalisé pour le Conseil Général de la Savoie, 26 p.
- EGAL M., CASIOT C., BRUNEEI O., SARMIENTO A., NIETO J.M., ELBAZ-POULICHET F., 2006. Large scale mine-related pollution: The Tinto and Idiel Rivers case study (SW Spain). Difpolmine Conference, 12-16 décembre 2006, Le Corum, Montpellier, France.
- FEYBESSE J.-L., BAILLY-MAÎTRE M.-C. & FERAUD J., 2004. La mine médiévale d'argent du Pontet, une fente alpine contemporaine de la surrection des massifs cristallins ? *C.R.A.S. Geosciences*, 336, 1254-1264.
- GASQUET D., BEUCHAT S., MORITZ R., BERTRAND J.-M., 2001. Origine, évolution et âge de la formation géologique concernant les minéralisations des Hurlières (Série Satinée de Belledonne). In Le fer dans les Alpes du Moyen-Âge au XIX^e Siècle. Actes du colloque international de Saint-Georges d'Hurlières du 22-25 octobre 1998. Éd. Monique Mergoïl, 9-17.
- GASQUET D., PAILLET A., à paraître. Les gisements de fer dans les Alpes externes françaises. Actes du Colloque « Les Chemin du Fer en Belledonne » des 22-23 mai 2013. Éd. d'Arbarétan.
- JACQUESON R., MELOUX J., 1971. Prospection des alluvions aurifères du Chéran. (Savoie et Haute Savoie). Rapport BRGM inédit, 9 p.
- MARI G., 1992. Les anciennes mines de cuivre du Dôme de Barrot (Alpes-Maritimes). Éd. Serre, 111 p.
- MARIGNAC C., CATHELINÉAU M., BANKS D., BOIRON M.C., AYT OUGOUGDAL M., ARGOUARC'H Y., POTY B., 2000. Alpine fault sealing at the contact between a crystalline basement and its sedimentary cover: La Gardette (French Alps). Proceedings of the XIVth European Current Research on Fluid Inclusions (ECROFI), Nancy, France, 194-195.
- MARTHALER M., 2002. Le Cervin est-il africain ? Une histoire géologique entre les Alpes et notre planète. Éd. Loisirs et Pédagogie, Lausanne, 96 p.
- MELOUX J., 1975. Alpes - Nord : Bilan synthétique de dix années de prospection. Rapport du BRGM n°75, RME 023 FE, 104 p.
- POTY B., 1967. La croissance des cristaux de quartz dans les filons sur l'exemple du filon de La Gardette (Bourg d'Oisans) et des filons du massif du Mont-Blanc. Thèse de 3^e cycle, Université de Nancy, 161 p.
- OCHOA ALENCASTRE A., 1979. Etude géologique des minéralisations fluorées du massif du Rocheray, Savoie (Alpes françaises externes). Thèse de 3^e cycle, Université Claude Bernard, Lyon, 132 p.
- PY V., 2009. Mine, bois et forêt dans les Alpes du Sud au Moyen-Âge - Approches archéologique, bioarchéologique et historique. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille I, 1332 p.
- ROSSI M., à paraître. Les gisements de fer dans le monde. Actes du Colloque « Les Chemin du Fer en Belledonne » des 22-23 Mai 2013. Éd. d'Arbarétan.
- SONNEY R., BLUM A., CHERY L., 2005. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin du Rhône - Méditerranée et Corse. Rapport du BRGM, BRGM/RP-54031-FR, 135 p.
- TISSERAND, D., PILL, E., HELLMANN, R., BOULLIER, A.-M., CHARLET, L., 2014. Geogenic arsenic in groundwaters in the Western Alps. *Journal of Hydrology*, 518, 317-325.
- VINCHON C., 1984. Sédimentogénèse et métallogénèse du Permien du Dôme de Barrot (Alpes-Maritimes). Thèse d'Etat, BRGM, 70, 445 p.