

Zeitschrift:	Cahiers d'archéologie romande
Herausgeber:	Bibliothèque Historique Vaudoise
Band:	61 (1993)
Artikel:	Archéométrie des scories de fer : recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale
Autor:	Serneels, Vincent
Kapitel:	2: Les minerais de fer
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-836182

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

2

LES MINERAIS DE FER

Le fer est un élément chimique très abondant dans la croûte terrestre (env. 7%). De nombreuses roches sont donc riches en fer. Mais elles ne constituent pas pour autant des minérais.

En effet, un minéral est une roche qui doit non seulement contenir la substance recherchée, mais également être exploitable du point de vue technique et économique. Les connaissances techniques et des conditions économiques évoluant en permanence, la notion de minéral change avec le temps. Pour les périodes anciennes, on ne peut pas définir les minéraux selon les critères utilisés actuellement. De même, il existe une différence d'échelle considérable entre les industries minières anciennes et modernes. Les tonnages traités aujourd'hui sont infiniment supérieurs à ce qu'ils furent par le passé.

La valeur d'un minéral dépend de sa teneur mais également de la nature et de la concentration des éléments qui accompagnent le fer. Les minéraux les plus riches ne sont donc pas forcément les plus intéressants.

La nomenclature des minéraux de fer est assez complexe. Les différentes classifications répondent chacune aux besoins de leurs utilisateurs. Pour le géologue, la classification est basée sur les conditions de formation du minéral. Ces critères génétiques sont ceux qui orienteront la prospection sur le terrain et qui aideront à prévoir l'extension du gisement. Pour le métallurgiste, c'est le comportement du minéral pendant le traitement qui est le critère essentiel de classification (Durrer 1957, 1-4).

D'autres approches sont encore possibles, en particulier, celle du mineur: le gisement est profond ou superficiel, en roche meuble ou dure, etc. Enfin, il faut souligner que la bibliographie est encombrée par les appellations anciennes et traditionnelles dont le sens est parfois devenu totalement obscur.

Les minéraux des minéraux de fer

Les minéraux de fer sont très abondants et très variés. Ils sont constitués de minéraux contenant le fer associés à d'autres constituants qui forment la gangue. Les gangues sont extrêmement variées et il ne peut être question ici d'en faire la liste. Il est par contre utile de rappeler brièvement les principaux minéraux ferrifères (fig. 28).

Le fer à l'état natif est très rare. Dans les roches terrestres basiques, on peut trouver de petits grains de fer métallique. Il ne forme que très rarement des masses métriques (île Disko, Groenland). Certaines météorites sont essentiellement constituées de métal (Buchwald 1975). Il s'agit d'alliages de fer et de nickel (kamacite et taenite).

Les oxydes, magnétite et hématite, ainsi que les hydroxydes de fer, goethite et limonite, jouent un rôle primordial dans les minéraux. Ce sont les minéraux les plus importants au point de vue économique. Parmi les carbonates de fer exploités, la sidérite et l'ankérite sont les principaux.

		% Fe
Ferrite	Fe	100
Kamacite	Fe,Ni	90-95
Taenite	Fe,Ni	65-25
Magnétite	Fe ₃ O ₄	72.4
Iilménite	FeTiO ₄	36.8
Hématite	Fe ₂ O ₃	69.9
Goethite	FeOOH	62.9
Limonite	FeOOH·nH ₂ O	±50
Sidérite	FeCO ₃	48.3
Ankérite	FeCa(CO ₃) ₂	22.59
Pyrite	FeS ₂	46.6
Pyrrhotine	Fe _{1-x} S	±57
Arsénopyrite	FeAsS	±33
Chamosite	Chlorite	±28

Fig. 28. Teneurs en fer des principaux minéraux des minéraux de fer.

Les minéraux de la famille des sulfures, bien que riches en fer et relativement abondants, ne forment pas des minéraux très recherchés à cause de la présence du soufre. Cet élément est difficile à éliminer totalement et gêne considérablement le travail du métallurgiste. La pyrite et la pyrrhotine sont les sulfures les plus riches en fer. Les silicates qui contiennent du fer sont très nombreux, mais soit le fer y est trop peu abondant soit il est difficilement récupérable ou ces minéraux sont rares. Les gisements sont donc assez exceptionnels. Les chlorites riches en fer (thuringite, chamosite, etc.) sont pratiquement les seuls silicates à jouer un rôle économique. Ce sont des minéraux fréquents dans les oolithes ferrugineuses (Déverin 1945, 29-33; Delaloye 1966). Exceptionnellement d'autres minéraux peuvent jouer un rôle (glauconie, vivianite, greenalite, etc.).

Classification des minérais de fer d'après les conditions de formation

Les classifications modernes se réfèrent à des concepts génétiques (conditions de formation et histoire des roches). Ce point de vue permet une classification en une dizaine de types et de nombreux sous-types (Zitzmann 1977, 13-35).

1. Les *minérais de fer magmatiques* résultent de l'accumulation de cristaux, essentiellement magnétite et ilménite, par séparation gravifique au cours des premiers stades de cristallisation d'un magma basique. Les gîtes sont lenticulaires ou en veines. Le contenu en titane est élevé (ex.: Taberg, S Suède).

2. Les *minérais de fer métasomatiques de contact* se forment lors de la transformation des roches calcaires au moment de la mise en place d'une intrusion granitique. A la fin de la cristallisation du magma, des solutions enrichies en fer et en éléments volatils se forment. Au contact avec les calcaires il se forme des skarns. Les gisements sont généralement massifs et irréguliers ou suivent les fissures et les plans de l'ancienne stratification. Le minéral essentiel est la magnétite qui peut être transformée en hématite. Les sulfures sont presque toujours présents (ex.: Magnitnaya, Oural, Russie).

3. Les *minérais de fer hydrothermaux* ont pour origine la cristallisation de solutions liées aux épisodes magmatiques tardi- ou post-orogéniques. Ces solutions se déposent le long de fissures. On distingue les veines à sidérite (ex.: Siegerland, Allemagne) et les veines à hématite (ex.: S Harz, Allemagne) avec une gangue de quartz, de calcite ou de barytine. Parfois, les solutions imprégnent de manière diffuse les roches encaissantes calcaires (ex.: Bilbao, Espagne) ou forment des gisements stratiformes non concordants (ex.: Erzberg, Autriche).

4. Les *minérais de fer volcano-sédimentaires* se forment lors du dépôt syngénétique dans des sédiments marins de solutions exhalatives. Ce processus est lié au magmatisme

des stades précoce d'une ouverture géosynclinale. Les gisements sont stratifiés et les faciès sont sédimentaires. On observe l'intercalation de niveaux riches et de niveaux pauvres. La gangue est siliceuse, calcaire ou tufacée. L'hématite est le principal minéral, accompagnée de silicates de fer, de sidérite et de pyrite. (ex: Lahn-Dill, Allemagne).

5. Les *minérais de fer sédimentaires marins* les plus fréquents sont composés d'oolithes (corps ovoïde, diamètre 0,1-2 mm, à texture concentrique souvent centrée sur un claste détritique ou biogène) ferrugineuses (limonite, hématite, glauconie, sidérite, chamosite ou mélange de ces différents minéraux). La matrice est argileuse ou calcaire. L'origine du fer pourrait être continentale (réaction avec l'eau riche en acide humique, transport sous forme d'humates ou de bicarbonate de fer, décomposition à une certaine distance du rivage et formation d'hydrogels qui cristallisent en carapaces successives autour d'un germe). Ce mécanisme n'est pas le seul envisageable et on peut en proposer de purement marin. La minéralogie des roches sédimentaires riches en fer est contrôlée par les phénomènes diagénétiques. Ce type de minéral forme des couches de grande extension et d'épaisseur constante (ex.: minette de Lorraine, France). Des placers à magnétite se forment par tri mécanique des minéraux lourds par la mer à proximité de gisements primaires (sables noirs).

6. Les *minérais de fer sédimentaires continentaux* sont le plus souvent liés aux marais et tourbières. Le fer est dissous par l'eau riche en acide humique puis précipite lors de l'évaporation de l'eau ou de changements des conditions physico-chimiques (Eh et pH). Il se forme alors des encroûtements et des concrétions de limonite impure accompagnées fréquemment d'oxydes de manganèse (ex.: Lipetsk, URSS). Des gisements anciens ayant une origine comparable, sont liés aux bassins charbonniers (ex.: Ruhr, Allemagne).

7. *L'altération* par les eaux de surface est souvent un facteur d'enrichissement considérable. Des accumulations importantes de limonite peuvent se constituer lors de l'oxydation superficielle des filons de sulfures («chapeaux de fer», «gosan»).

Sous un climat tropical, les eaux de surface attaquent les roches cristallines ou sédimentaires, emportant les substances solubles alors que les hydroxydes d'aluminium et de fer s'accumulent sur place. Ces formations, les *latérites*, contiennent des nodules d'hématite et de goethite noyés dans une matrice argileuse. Elles ne sont généralement pas exploitable sauf si elles se développent sur des roches riches en fer (ex.: Lokris, Grèce). Un autre type de latérite ferrifère se développe par altération des calcaires. La dissolution des carbonates permet la concentration des hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse qui se déposeront dans le karst. Dans certains cas, on observe la formation de pisolithes et de concrétions ferrugineuses. Le remaniement par les eaux de ruissellement est un facteur d'enrichissement (ex.: Delémont, Suisse).

8. Les minérais de fer métamorphiques rubannés (BIF) semblent avoir été des sédiments d'origine chimique (dissolution / précipitation). Ces minérais se présentent sous forme de formations stratifiées de grande extension (1000 km) d'âge précamalien (> 500 mio a). Ils sont caractérisés par l'alternance de lits riches en fer ou en silice (ex.: taconites du Lake Superior District, USA; itabirites de Itabira, Brésil).

Enfin, certains gisements tels que les skarns de Dannemora (Suède) sont le résultat d'histoires géologiques tellement complexes qu'il est absurde de chercher à les intégrer à une classification génétique.

Les minérais de fer en Suisse

Le sous-sol suisse n'est pas riche en mines métalliques. Les gisements sont toujours relativement petits et les teneurs plutôt basses. La topographie, difficile dans les Alpes mais aussi dans le Jura, ne facilite pas l'industrie minière. Le fer

est le métal le plus répandu. Sans former de gisements très importants, les minéraux du pays ont permis le développement d'une industrie depuis les origines de la sidérurgie jusqu'au milieu de ce siècle.

Les minéraux de fer suisses ont fait l'objet de multiples études. La carte des gîtes de W. Epprecht est le document synthétique le plus complet (Epprecht 1957; fig. 30). A cette échelle, elle fournit une excellente image générale même si elle peut être complétée dans le détail.

Il faut souligner la division du territoire en trois grandes zones distinctes du point de vue métallogénique. Au nord, court la chaîne du Jura où les gisements sont abondants. Au centre, sur le Plateau molassique, il n'y a aucune formation susceptible de fournir du minerai. Enfin, les Alpes apparaissent comme un domaine complexe du point de vue métallogénique.

Deux types de minéraux sont prépondérants (fig. 29): les minéraux d'altération continentale (Sidérolithique), les minéraux oolithiques marins mésozoïques (oolithes ferrugineuses). Les autres sont moins importants (magnétites, hématites, sidérites, etc.).

Type de minéral	Localité	Composition chimique moyenne (%)									Volume exploité	Volume réservé
		Fe	Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	PAF		
SIDEROLITHIQUE												
Jura	Schaffhouse	SH	43.0	0.3	11.4	12.6	0.1	0.1	0.03	0.07	12.8	172 000
	Dünnerntal	SO	44.0		11.8	7.9	0.1	0.1	0.06		11.0	100 000
	Delémont	JU	44.0	0.3	11.5	11.0	0.1	0.1	0.02	0.10	13.5	1 530 000
	Goumoens-le-Jux	VD	12.5	0.3	50.0	18.7	0.4	0.1	0.04	0.30	8.0	
	Mormont	VD	41.0	0.2	21.5	10.5	1.6	0.3	0.30	0.25		
Alpes	Dents du Midi	VS	30.0	0.1	36.0	15.5	0.1	1.2	0.06	0.50	5.0	
OOLITHES FERRUGINEUSES												
Jura	Schaffhouse	SH	20.0	0.1	20.0	8.0	15.0	3.0	0.40	0.20	20.0	1 500 000
	Fricktal	AG	28.0	0.3	15.0	6.5	11.6	1.9	0.50	0.16	18.5	1 350 000
	Erlinsbach	AG-BE	25.0	0.3	14.0	11.0	15.0	1.0	0.30	0.20	21.0	875 000
Alpes	Scheulte	SO	25.0	0.2	10.6	3.6	25.9		0.39	0.11	25.0	
	Erzegg	BE	38.0	0.1	14.0	10.0	4.0	2.0	0.70	0.90	11.0	150 000
	Chamoson	VS	31.0	0.3	16.4	12.0	5.8	1.8	0.40	0.30	14.0	40 000
LIMONITE DU VALANGINIEN												
Jura	Auberson	VD	19.0		4.6	16.8	28.8	2.2	0.20	0.10	10.0	
MAGNETITES												
Alpes	Mont Chemin	VS	30.0		17.0	2.0	5.0	12.5	0.10	0.30		67 000
HEMATITES ET SIDERITES												
Alpes	Gonzen	SG	50.0	0.8	5.3	0.6	7.5	0.9	0.05	0.60	5.6	1 650 000
	Val Tisch	GR	51.5	1.3	12.7	3.7	3.6	0.6	0.02	1.20	2.0	2 200
	Val Ferrera	GR	30.0	21.0	12.0	0.2	6.2	1.5	0.10	0.20		1 500

Fig. 29. Principaux minéraux de fer suisses. Modifié d'après Fehlmann et de Quervain 1952, tab. 6.

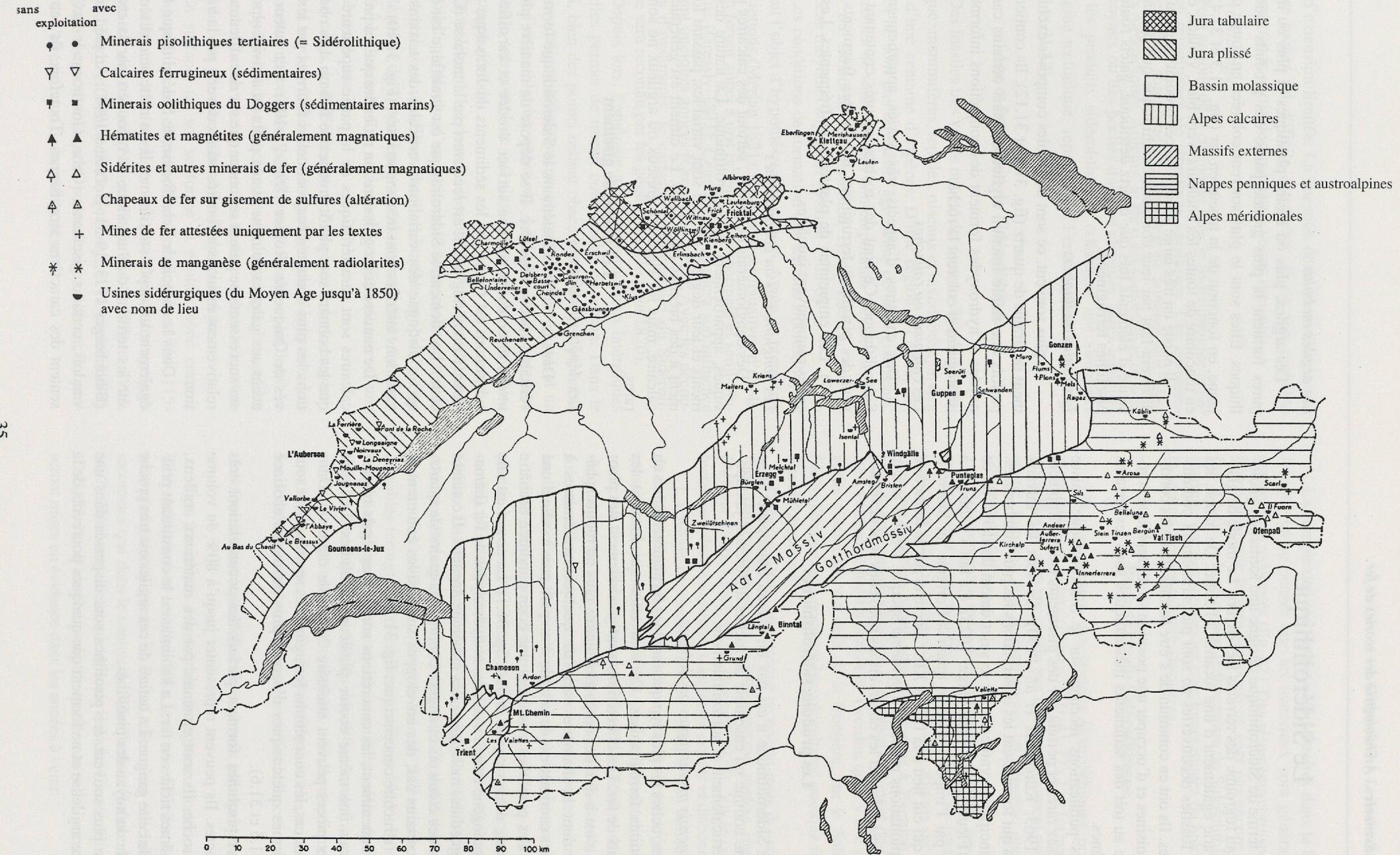


Fig. 30. Carte générale de la répartition des minéraux de fer de Suisse. D'après Epprecht 1957.

Le Sidérolithique

Le terme de Sidérolithique désigne une formation géologique qui regroupe des terrains très divers. Le mode de gisement varie également d'une localité à l'autre. De même, les faunes fossiles découvertes ne sont pas strictement contemporaines. Ils ont en commun de s'être formés dans des conditions voisines et d'occuper une position stratigraphique comparable au toit des sédiments mésozoïques sous les terrains oligocènes.

Les publications récentes sur le Sidérolithique suisse sont assez rares et portent sur des gisements isolés (Epprecht *et al.* 1963; Kürsteiner *et al.* 1990). Ce sont les travaux anciens qui fournissent les observations les plus nombreuses. Les principales synthèses sur le sujet datent du début de ce siècle (Fleury 1909, Baumberger 1923). Ce fait s'explique à la fois par l'important débat quant à l'origine du Sidérolithique qui eut lieu à la fin du XIX^e siècle et par la fermeture des exploitations minières à la même époque. Depuis lors le débat s'est calmé et les observations nouvelles sont devenues rares.

Les produits sidérolithiques

Le Sidérolithique n'est pas un niveau homogène. Il se présente comme un ensemble de roches différentes juxtaposées verticalement et horizontalement.

Les minérais pisolithiques ou Bohnerz

Les roches les plus typiques sont les formations riches en concrétions ferrugineuses. Ce sont elles qui forment les minéraux de fer. Les concrétions sont généralement des pisolithes, c'est-à-dire des corps globulaires plus ou moins sphériques dont le diamètre varie de quelques millimètres à quelques centimètres (de la taille d'un petit pois à celle d'une noix). Ces pisolithes possèdent une écorce indurée brunâtre constituée d'hydroxydes de fer (fig. 31.1). Le noyau est une pâte homogène riche en oxydes et hydroxydes de fer (hématite et goethite) mélangés à des minéraux argileux. Il contient parfois des éléments étrangers comme des grains de quartz. Dans certains cas, des enveloppes successives entourent le noyau (structure concentrique; fig. 31.2).

Fréquemment, les concrétions sont des agrégats réunissant sous une même écorce plusieurs pisolithes. Les plus grosses pièces peuvent atteindre 20 cm de diamètre. Dans bien des cas, les concrétions ferrugineuses se présentent sous des formes quelconques d'aspect plus ou moins scoriacé (fig. 31.5 et 31.6).

Les pisolithes forment parfois des accumulations très compactes. Ils peuvent représenter jusqu'à 80% du volume de la roche. Ils sont cimentés par des matériaux argileux, eux-mêmes riches en fer. La kaolinite est le constituant principal de cette gangue. La nature de ces argiles est très proche de celle du noyau des pisolithes.

Le plus souvent, les pisolithes sont dispersés dans une matrice argileuse et ne forment que quelques pourcents de la roche.

Les argiles ou bolus

Les argiles, plus ou moins plastiques et plus ou moins pures forment la plus grande partie des produits sidérolithiques. Elles sont le plus souvent colorées en rouge ou en jaune, en fonction de la teneur en fer (fig. 31.3 et 31.4). On en rencontre de toutes les couleurs: vert, bleu, violacé, etc.

Il existe un très large spectre de ces produits argileux qui diffèrent tant par leur composition chimique que par la présence d'éléments tels que quartz détritique, galets roulés ou pisolithes ferrugineux.

Les sables ou huppers

Le plus souvent, ce sont des sables composés exclusivement de grains de quartz (fig. 31.9 et 31.12). Ils contiennent parfois une faible fraction argileuse. Dans certains cas, les oxydes et hydroxydes forment des concrétions informes ou imprègnent et colorent la roche.

Les calcaires ou raitsches

Des calcaires d'aspects très variés appartiennent au Sidérolithique. Ce sont des roches impures contenant souvent des pisolithes ferrugineux et d'autres fragments (fig. 31.7). Les empreintes de plantes sont fréquentes. Les calcaires sont souvent jaunâtres.

Les conglomérats ou gompholithes

Des conglomérats de galets, surtout des calcaires jurassiques, appartiennent au Sidérolithique. La nature des éléments et leur degré d'arrondi sont variables, passant localement à des brèches (fig. 31.8). Le ciment est généralement calcaire, mais les éléments gréseux ou argileux ne sont pas rares.

Les modes de gisement

Les dépôts stratiformes

Dans la vallée de Delémont, le Sidérolithique forme une véritable couche régulière. Il se dépose de manière plus ou moins discordante sur une surface érodée et karstifiée. Le substratum est formé par les sédiments du Jurassique supérieur (Kimméridgien). Il est recouvert par la molasse (Oligocène). Localement, le Sidérolithique est stratifié, c'est-à-dire qu'on distingue des variations verticales des terrains. Les variations latérales sont très importantes. (Fig. 31.10).

De manière assez grossière, on retiendra que les produits calcaires sont caractéristiques de la partie supérieure alors que les bohnerz sont plutôt proches de la base. Les observations les plus documentées sont celles fournies par les relevés de Quiquerez (Rollier 1898, 75-101). Cet auteur a eu accès aux galeries de mine et aux puits en activité alors que ses successeurs ne purent se fonder que sur des affleurements relativement mauvais effondrés ou recouverts par la végétation.

Dans le canton de Schaffhouse, le Sidérolithique forme également un dépôt stratiforme. Il est nettement discordant sur les terrains du Jurassique et recouvert par la molasse (Baumberger 1923, 19-31; Hofmann 1991). Au pied du Jura vaudois, certains gisements (Orbe, Goumoens-le-Jux) présentent des caractères stratiformes. Toutefois, ils semblent

être d'extension limitée. La question de la formation *in situ* de ces roches est difficile à trancher. Il est fort probable qu'une grande partie des matériaux soient remaniés.

Les remplissages

Tout au long de la chaîne du Jura, le Sidérolithique apparaît en remplissage de structures karstiques. Ces dernières peuvent être superficielles, formées au sommet des sédiments mésozoïques. Ailleurs, le karst est souterrain et ce sont des boyaux ou des poches qui sont comblés. Dans quelques cas, les produits sidérolithiques colmatent des structures d'origine tectonique, reprises par l'érosion karstique. (Fig. 31.11 et 31.12).

Age et formation du Sidérolithique

Des fossiles très variés ont été découverts dans le Sidérolithique: mammifères, reptiles, oiseaux et invertébrés, en tout plus d'une centaine d'espèces. D'une région à l'autre, ces faunes ne sont pas du même âge. Dans certains gisements, les fossiles ne sont pas tous contemporains. Les dépôts sont datés du Lutétien, du Bartonien et du Ludien, soit de l'Eocène moyen et supérieur (Stehlin 1903-6).

Les conditions de formation des terrains sidérolithiques ont fait l'objet d'hypothèses très variées. Après les premières descriptions (Mérian 1821), les premières tentatives d'explication feront appel à une origine hydrothermale et semi-plutonique (Gressly 1841). Cette théorie gardera son influence pendant quelques années (Quiquerez 1852). Avec les découvertes d'ossements, le caractère sédimentaire du Sidérolithique sera reconnu par les géologues (Greppin 1870).

Depuis lors, l'analogie avec les formations latéritiques actuelles permet de mieux comprendre ce terrain. Dans le détail, bien des points restent obscurs et il est peu probable que les maigres affleurements encore visibles répondent un jour à l'ensemble des questions. Le Sidérolithique est une formation très complexe qui s'est constituée au cours d'une fort longue période.

Globalement, les données disponibles font penser que le Sidérolithique résulte d'un processus sédimentaire en milieu continental sous un climat chaud et humide (tropical). Une grande partie du matériel provient du remaniement sur place ou à faible distance, d'un ancien sol ferrallitique, voire d'une véritable cuirasse.

Au cours du Paléocène et de l'Eocène, le Jura, en particulier la bordure S, subit une longue période d'émersion. Les sédiments crétacés sont partiellement érodés et un karst se développe sur et dans les calcaires du Jurassique. Les argiles de décalcification s'accumulent en surface et dans le karst au cours de cette période d'altération hydro-chimique.

En surface, un sol se forme et évolue, avec comme conséquence un enrichissement en fer (Segalen 1964, 115-7). Cela aboutit à la formation des pisolithes et des agrégats ferrugineux dans le sol (Nahon 1976, 36-40; 1986 et 1991, 154-62; Tardy et Nahon 1985; Boulange et Bocquier 1983). En même temps, l'érosion se poursuit, remobilisant les produits de l'altération et de la pédogenèse.

La complexité des figures sédimentaires dans le Sidérolithique laisse penser que les matériaux sont généralement remaniés et redéposés (fig. 32) Des gisements correspondant à une séquence formée sur place ne sont pas encore identifiés. La fin de la séquence sédimentaire du Sidérolithique est marquée par des formations conglomeratiques ou bréchiques et surtout par des calcaires lacustres.

Répartition du Sidérolithique

On peut trouver des terrains sidérolithiques pratiquement dans tout le Jura (Fleury 1909, 41-77). Les formations à pisolithes ne sont par contre pas systématiquement présentes et ne forment des accumulations importantes que dans quelques régions.

Grossièrement, entre Schaffhouse et Bièvre, les affleurements sont assez nombreux. Plus à l'O, ils se font beaucoup plus rares (chapitres 5 à 7). Ils sont absents sur le plateau des Franches-Montagnes. De Bièvre à Yverdon, on ne signale que quelques poches. C'est dans le secteur du pied du Jura vaudois, entre La Sarraz et Yverdon qu'il y a le plus de petits gisements. Au-delà de la frontière, sur le Salève, le Sidérolithique est à nouveau bien développé quoique fort différent (chapitre 4).

Dans les Alpes, on retrouve ce niveau mais il a subi une forte déformation et un métamorphisme parfois important (Arbenz 1910, Chaix 1923, Wieland 1979). Vu le contexte tectonique, les occurrences sont plutôt petites et discontinues.

L'épisode continental éocène marque une bonne partie du continent européen, depuis le massif de Bohème jusqu'au massif armoricain (Ziegler 1982, pl. 24). Ces conditions permettent à des roches comparables au Sidérolithique de se former dans cette large aire géographique. Elles ne sont toutefois pas strictement contemporaines ni identiques (variations locales du climat, de la topographie et du substratum).

Dans les régions limítrophes, les analogies sont frappantes. Les terrains éocènes du Jura souabe sont le prolongement à l'E du Sidérolithique suisse (Eichler 1961; Seeger 1963). En Franche-Comté, des roches semblables sont connues (Rosenthal 1990, 35-38). Au SO, des niveaux attribués au Sidérolithique affleurent bien au Salève sous forme de sables ferrugineux (Joukowski et Favre 1913). Ils se prolongent de manière discontinue jusqu'à la vallée du Rhône. Sur les bordures E et SE du Massif central français, on retrouve des séries comparables. Malheureusement, il n'existe pas encore de travail synthétique sur les minéraux de fer d'altération continentale éocènes à l'échelle européenne.

Les formations à pisolithes ferrugineux plio-quaternaires

Des formations à pisolithes ferrugineux postérieures au Sidérolithique sont connues. Elles sont très difficiles à distinguer pétrographiquement. En Suisse, elles n'ont été clairement reconnues que dans le canton de Schaffhouse (Hofmann 1991, 66-7). Elles sont mieux attestées en Franche-Comté (Rosenthal 1990, 38-41). Il est fort probable que de nouvelles occurrences seront mises en évidence dans les années à venir.

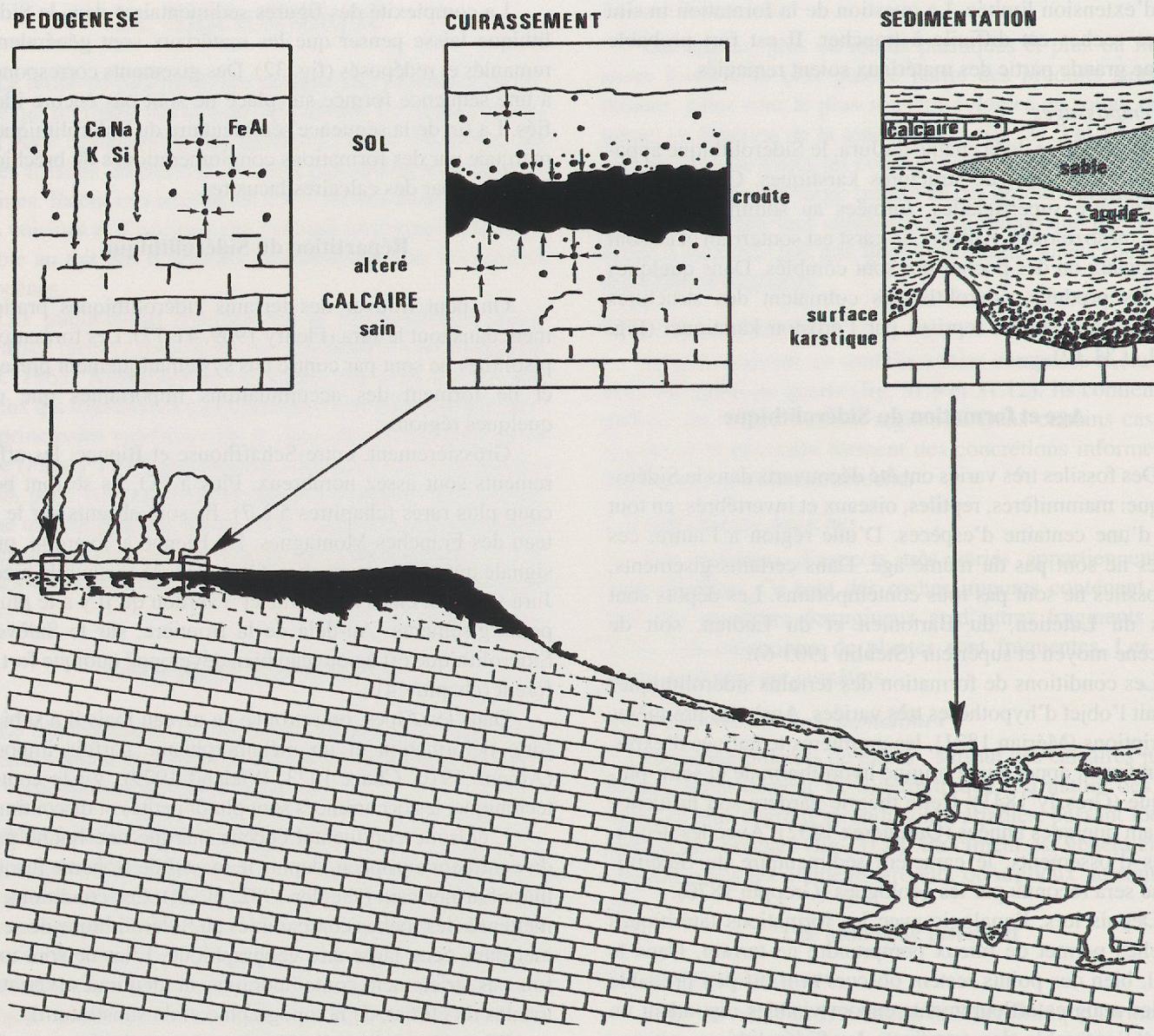


Fig. 32. Schéma de la formation du Sidérolithique suisse.

Fig. 31. Aspects du Sidérolithique. Echelle des échantillons: env. 1:2.

De gauche à droite, et de haut en bas:

Fig. 31.1. Pisolithes, Boécourt (JU).

Fig. 31.2: Pisolithes et agrégats, Boécourt (JU): Coupes (Eschenlohr et Serneels 1991, fig. 18).

Fig. 31.3. Formation argileuse rouge ou bolus, Goumoens-le-Jux (VD).

Fig. 31.4. Formation argileuse jaune ou bolus, Neunkirch (SH).

Fig. 31.5. Concrétion ferrugineuse amorphe, Les Molliets (Salève, France).

Fig. 31.6. Concrétion ferrugineuse amorphe, Lausen (BL).

Fig. 31.7. Calcaire ou raitsche, Boécourt (JU)

Fig. 31.8. Brèche de remplissage, Grande Gorge, (Salève, France)

Fig. 31.9. Sables blancs, carrière de Vovray en Bornes (Salève, France).

Fig. 31.10. Affleurement stratiforme complexe, Ferme des Lavois à Boécourt (JU): la zone riche en pisolithes apparaît en brun sombre dans les argiles rouges (Eschenlohr et Serneels 1991, 29-35).

Fig. 31.11. Affleurement de remplissage karstique argileux, carrière entre Courrendlin et Choindez (JU).

Fig. 31.12. Affleurement de remplissage sableux, carrière de Vovray en Bornes (Salève, France).



Il est possible qu'une partie des concrétions qu'elles contiennent proviennent du démantèlement du Sidérolithique. Plus vraisemblablement, elles attestent que les conditions de formation des pisolithes étaient encore réunies au cours du Plio-quaternaire dans certaines régions du Jura.

Caractères chimiques et aspects miniers

La composition chimique du Sidérolithique varie très fort en fonction des produits analysés. Les minéraux de fer, en particulier après lavage des pisolithes, présentent par contre les mêmes caractéristiques (fig. 29). C'est un minerai à gangue argileuse donc riche en alumine. La silice est assez variable. La teneur en fer est supérieure à 40%. Le manganèse est le seul élément mineur important. Si la teneur moyenne est basse, localement le minerai peut être enrichi. Certaines analyses donnent plus de 20% MnO. Le phosphore et le soufre sont très bas.

Les minéraux sidérolithiques sont généralement des roches meubles affleurantes. Par contre, la plupart des gisements ont une extension limitée et les zones riches sont discontinues. Seul le grand gisement de la vallée de Delémont est recouvert par une forte épaisseur de terrains plus jeunes. Au XIX^e siècle et sans doute avant, il a été exploité en puits et galeries.

Les minéraux oolithiques

Les oolithes

Les oolithes ferrugineuses sont de petites concrétions constituées de minces couches entourant un noyau détritique ou clastique. Elles présentent donc une structure concentrique typique. A l'intérieur de chaque couche, on peut parfois obser-

ver le développement d'une structure radiaire. Le diamètre est généralement inférieur à 1 mm. La composition minéralogique est très variable. Les oolithes ferrugineuses sont généralement centrées sur un débris clastique, grain de quartz ou bioclaste. Les écorces sont constituées d'oxydes (hématite, limonite), de carbonates (sidérite) ou de silicates de fer (chamosite et autres chlorites). Elles sont prises dans une gangue calcaire ou marneuse. La proportion d'oolithes dans la roche est extrêmement variable (de quelques % à plus de 90%) et sera donc un des facteurs essentiels de l'enrichissement du minerai.

Ce sont des sédiments marins de faible profondeur (haute énergie) déposés en couches continues et relativement épaisses. L'origine du fer qui se trouve piégé dans les sédiments reste discutée.

Des couches de ce type peuvent se développer sur de grandes surfaces, comme en Lorraine (minette). En Suisse, l'extension des zones riches est plus limitée.

Répartition stratigraphique et géographique

Au cours du Jurassique supérieur, plusieurs niveaux à oolithes ferrugineuses se sont formés (fig. 33). Le contenu en fer est extrêmement variable. Les principaux gisements se trouvent dans la partie orientale de la chaîne du Jura (fig. 30). Une série de pointements de moindre importance existent dans les Alpes (zone Helvétique).

Dans le Jura, le gisement principal se trouve dans le Callovien et l'Oxfordien du Fricktal, entre Herznach et Wölflinswil AG (Fehlmann et Rickenbach 1962, 13-34; Jeannet 1951; Frei 1952). D'autres occurrences, souvent plus petites et moins riches, se trouvent dans le sud du canton de Schaffhouse dans le Callovien inférieur et dans le Bajocien (Fehlmann et Rickenbach 1962, 45-49 et 53). Ces couches se prolongent en Allemagne. Enfin, l'Aalénien, le Toarcien et le Domérien sont parfois minéralisés (Wittnau AG; Fehlmann

Sous-Système	Etage	Horizon	Schaffhouse	Argovie	Autres
MALM	OXFORDIEN	Cordatus	x	x	
		Lamberti	x	xxx	x
DOGGER	CALLOVIEN	Anceps-Althea	x	xxx	x
		Macrocephalus	x	x	
	BARTHONIEN	Varians			
		Spathkalk		x	
		Hauprogenstein			
	BATHONIEN	Blagdeni			
		Humphresi	x		
		Sauzei-Sowerbyi	x	x	
	AALENIEN	Concavus-Murchisonae	x	x	x
		Opalinuston			
LIAS	TOARCIEN				?
	DOMERIEN				?

Fig. 33. Répartition stratigraphique des principaux niveaux à oolithes ferrugineuses du Jura suisse. D'après Fehlmann et Rickenbach 1962, tab. 1.

et Rickenbach 1962, 45). D'autres localités de moindre importance et surtout moins bien connues, existent le long de la chaîne du Jura, en particulier au N du plateau des Franches-Montagnes (Montfavergier JU).

Dans les Alpes, on retrouve les couches du Dogger, plissées et métamorphisées. De petits gisements s'échelonnent depuis la vallée du Rhône jusqu'à celle du Rhin (Fehlmann et Rickenbach 1962, 58-84).

Les minéraux alpins sont caractérisés par le développement de silicates de fer (chlorites) dans les oolithes en raison du métamorphisme qui affecte ces régions. Les gisements principaux sont ceux de Chamoson VS (Déverin 1945, 23-40; Fehlmann et Rickenbach 1962, 61-76; Delaloye 1966) et de l'Erzegg-Planplatte BE (Déverin 1945, 41-60; Tröhler 1966). D'autres occurrences existent, en particulier dans le Lauterbrunnental BE, dans l'Urbachtal BE, autour de la Windgäle UR et au Glärnisch GL.

Les caractères chimiques principaux et les aspects miniers

Les teneurs en fer de ces minéraux sont relativement basses (20-40%; fig. 29). La gangue est en général riche en carbonates dans les minéraux du Jura. Ces minéraux sont pauvres en manganèse. Le phosphore peut être assez élevé, il est toujours présent (0,5%).

Ce sont des couches d'extension assez importante et les zones minéralisées se suivent sur plusieurs kilomètres dans le Jura. Les roches ne sont pas très dures et relativement faciles à exploiter. Un chauffage préliminaire du minerai permet de détruire les carbonates et d'enrichir considérablement le concentré.

Dans les gîtes alpins, la géométrie est moins prévisible et l'extension des gisements plus limitée. La minéralogie rend le traitement plus difficile. La roche est plus dure et les conditions d'accès délicates.

Les autres minéraux en Suisse

La limonite du Valanginien

Au Crétacé, la sédimentation marine se poursuit dans le Jura. Aux calcaires de plate-forme du Malm succèdent des niveaux plus marneux. Au cours du Valanginien supérieur, se déposent des calcaires oolithiques, bioclastiques, de teinte ocre et renfermant quelques intercalations de marnes, c'est la formation des «Calcaires Roux» (Guillaume 1966, 138-9; Steinhäuser et Charollais 1971, 46-8). Ils atteignent 30 m d'épaisseur au maximum. La patine ocre est due à la présence d'hydroxydes de fer dans la roche. Dans la partie centrale du bassin, la limonite est un minéral constitutif. Le faciès de la «limonite de Métabief» se rencontre dans une aire géographique limitée entre le lac de Joux VD, Sainte-Croix VD, et Nozeroy, France (fig. 34).

Ce faciès est constitué de calcaires à oolithes et débris clastiques, eux aussi plus ou moins ferrugineux (Cayeux 1922, 844-863, fig. 71-72, 77-78). Il est interprété comme le

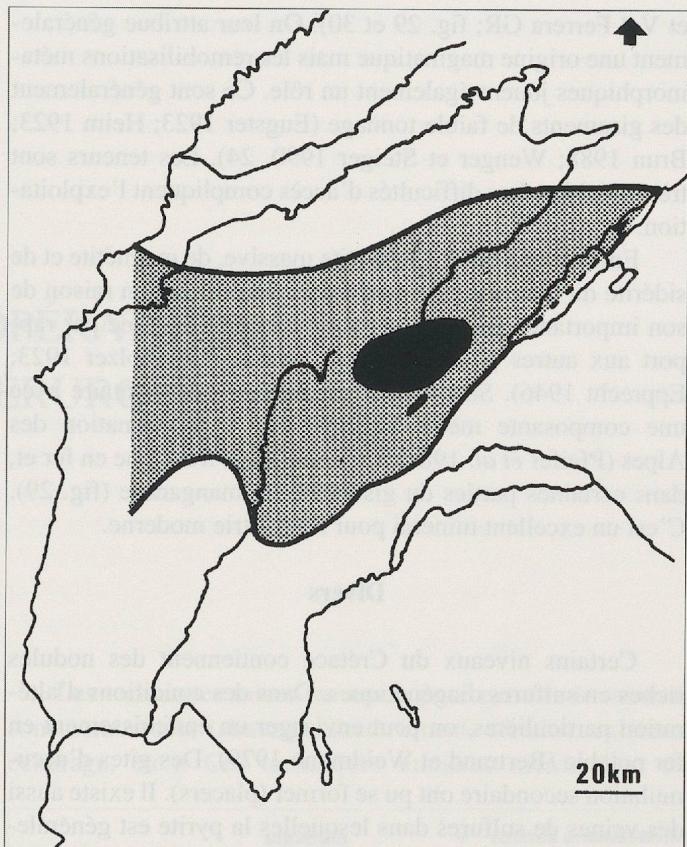


Fig. 34. Extension du faciès de la limonite du Valanginien (gris) et zone d'exploitation de la limonite de Métabief (noir).

résultat d'une sédimentation plutôt détritique ou tout au moins, témoignant d'un intense remaniement. C'est un minerai pauvre en fer et riche en calcium (fig. 29). Les données chimiques sont anciennes et peu nombreuses.

L'exploitation fut intense dans le Jura français au XIX^e siècle. Il n'existe que quelques descriptions anciennes de ces travaux (Rosenthal 1990, 33-4). Sur le versant suisse, ce minerai fut extrait dès le Moyen Age (Pelet 1983, 315-318).

Le Mont Chemin et les amas de magnétite

Dans les Alpes suisses, plusieurs gisements sont constitués par des amas de skarns riches en magnétite massive. Les paragenèses associées sont fort complexes. L'origine de ces gîtes est soit magmatique soit liée au métamorphisme de contact. Ce sont des minéraux très riches en fer (> 60% Fe; fig. 29). Les sulfures présents en diminuent la qualité.

Le gisement du Mont Chemin VS, près de Martigny, est le plus important (Hugi *et al.* 1948, 9-68; Wutzler 1983; Marschall, en prép.). D'autres se situent dans la région du Simplon VS (Hugi *et al.* 1948, 109-13) et dans le Val d'Aoste (Dousset et Tollardo 1981, 51-6).

Le Gonzen et les minéraux à hématite et sidérite

Des veines de sidérite et/ou d'hématite existent dans les Alpes en Valais, au Tessin et dans les Grisons (Val Tisch GR

et Val Ferrera GR; fig. 29 et 30). On leur attribue généralement une origine magmatique mais les remobilisations métamorphiques jouent également un rôle. Ce sont généralement des gisements de faible tonnage (Eugster 1923; Heim 1923; Brun 1988; Wenger et Steiger 1990, 24). Les teneurs sont très variables. Les difficultés d'accès compliquent l'exploitation.

Enfin le gisement d'hématite massive, de magnétite et de sidérite du Gonzen SG occupe une place à part en raison de son importance exceptionnelle en terme de volume par rapport aux autres gîtes des Alpes suisses (Oberholzer 1923; Epprecht 1946). Son origine est volcano-sédimentaire avec une composante métamorphique liée à la formation des Alpes (Pfeifer *et al.* 1988). Ce minerai est très riche en fer et, dans certaines parties du gisement, en manganèse (fig. 29). C'est un excellent minerai pour l'industrie moderne.

Divers

Certains niveaux du Crétacé contiennent des nodules riches en sulfures diagénétiques. Dans des conditions d'altération particulières, on peut envisager un enrichissement en fer notable (Bertrand et Weidmann 1979). Des gîtes d'accumulation secondaire ont pu se former (placers). Il existe aussi des veines de sulfures dans lesquelles la pyrite est généralement un constituant important (Della Valle 1992). L'altération par les agents atmosphériques a pu mener à la constitution de faibles volumes d'oxydes et d'hydroxydes de fer (chapeaux de fer). Il faut noter que compte tenu de la présence des glaciers dans les Alpes et des dimensions restreintes des gisements primaires, ce phénomène n'a pas pu avoir une grande ampleur. De petits placers de magnétite ont pu se former localement dans les régions où les roches basiques comme les ophiolites sont abondantes (moraine de Praeflouri VS: Hubacher W., communication personnelle). Le développement de minerai de fer liée aux marais ou aux tourbières est peu vraisemblable mais pas impossible dans certaines parties du Jura mal drainées.

Si ce genre de formation n'a qu'un intérêt anecdotique pour le métallogéniste, à l'échelle de l'exploitation antique, ce sont autant de sources possibles.

Archéologie minière et histoire de l'exploitation des minerais suisses

L'histoire de l'exploitation des mines de fer suisses est presque entièrement tributaire des sources écrites (Fehlmann 1932; Fehlmann et Rickenbach 1962, 85-116). L'archéologie minière n'apporte que des éléments extrêmement ténus et isolés.

Pour la période de l'âge du Fer jusqu'au XVe siècle, ce sont les données archéologiques concernant les ateliers métallurgiques qui sont la source d'information principale.

Les rares découvertes archéologiques minières

A la Bossena (Ferreyres VD), une petite exploitation minière est directement liée à un atelier de réduction du VII^e siècle ap. J.-C. (Pelet 1993, pp. 87-88; p. 98). Aux Boulies (Boécourt JU), les traces d'extraction sont mal définies et il n'est pas possible de les rattacher stratigraphiquement au site. Elles peuvent lui être largement postérieures (Eschenlohr et Serneels 1991, 27-47).

Ailleurs, c'est seulement par l'association spatiale d'amas de scories et de structures d'extraction (puits, minières) que l'on peut postuler une relation. A. Quiquerez mentionne que les galeries de mines de la vallée de Delémont ont, à plusieurs occasions, recoupé des travaux anciens souterrains (Quiquerez 1866, 5-7). Il les attribue aux Romains mais les éléments de datation font défaut. Au Gonzen (Sargans SG), c'est encore aux Romains que l'on attribue les travaux à ciel ouvert mais sans aucune base scientifique. Il en va de même dans la plupart des autres cas mentionnés par la tradition (Mont Chemin VS, etc.).

Les données archéologiques sur les mines sont donc quasiment inexistantes pour les périodes anciennes. Les travaux les plus anciens sont généralement détruits par l'avancement de l'exploitation. Il y a peu d'espoir d'obtenir de nouvelles données car seule une exploitation minière moderne serait à même de recouper des anciens travaux inconnus. Or celle-ci est complètement arrêtée en Suisse depuis une trentaine d'années.

Des travaux de surface des XVI^e-XIX^e siècles sont encore visibles dans certaines régions (Birchmeier 1986; Hofmann 1991 et 1992; Doswald 1992). Rares sont les mines de fer où des galeries anciennes sont accessibles (Mont Chemin VS).

Les mines de fer historiques

Ce n'est qu'à partir du XVI^e siècle que la documentation historique permet de cerner l'activité minière, essentiellement sur la base de demandes de concessions et grâce aux comptes des entreprises métallurgiques (Fehlmann 1932). A cette période, le tableau est éloquent: pratiquement tous les types de minerai et toutes les régions sont exploités.

La production va augmenter lentement pendant les deux siècles suivants. La première moitié du XIX^e siècle, est la période d'activité la plus intense. Par la suite, les minerais suisses seront lentement remplacés par des matières premières importées. Pendant les deux guerres mondiales, les ressources locales seront à nouveau mises à contribution (Gonzen, Herznach, Mont Chemin). La mine du Gonzen cesse son activité en 1966 (Epprecht 1991, 78-79).

Il semble que le XVI^e siècle corresponde à une véritable période de développement mais les prémisses sont déjà perceptibles au siècle précédent dans plusieurs régions. Les documents historiques ne permettent guère de remonter plus haut dans le temps.