

Zeitschrift: Minaria Helvetica : Zeitschrift der Schweizerischen Gesellschaft für historische Bergbauforschung = bulletin de la Société suisse des mines = bollettino della Società svizzera di storia delle miniere

Herausgeber: Schweizerische Gesellschaft für Historische Bergbauforschung

Band: - (1999)

Heft: 19b

Artikel: Les laitiers du haut fourneau de Carena TI : premiers résultats

Autor: Serneels, Vincent

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1089703>

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: 02.05.2026

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

Les laitiers du haut fourneau de Carena TI. Premiers résultats.

Résumé

Les laitiers récoltés à Carena TI sont issus de la réduction du minerai de fer local concentré et mélangé à un fondant calco-magnésien. Le charge du haut fourneau était constituée de 1 part de fondant pour 3 ou 4 parts de minerai. Le rendement de l'opération est proche de 100 % puisque les laitiers ne contiennent pratiquement pas de fer. La production de fer peut être estimée entre 250 et 500 kg de fer par tonne de minerai traité.

Des scories grises denses, très riches en fer, ont été retrouvée dans un bâtiment de stockage. Il s'agit probablement de scories issues de l'affinage d'une fonte phosphoreuse qui ont été récupérées pour être recyclées dans le haut fourneau de Carena. Un échantillon de laitier présente des particularités chimiques qui font penser qu'il dérive de la réduction de ces scories.

Riassunto

Le scorie vetrificate raccolte a Carena (Ticino) provengono dalla riduzione del minerale di ferro locale concentrato e mescolato a fondente calco-magnesico. La carica dell'alto forno era costituita da 1 parte di fondente per 3-4 parti di minerale. Il rendimento dell'operazione era prossimo al 100% poiché le scorie non contengono praticamente più ferro. La produzione può essere stimata in 250–500 kg di ferro per tonnellata di minerale trattato. Le scorie grige dense, molto ricche in ferro sono state trovate in un deposito. Si tratta probabilmente di scorie provenienti provenienti dalla lavorazione di una ghisa fosforosa, recuperate per essere riciclate nell'alto forno di Carena. Le particolari caratteristiche chimiche di un campione di laitiers potrebbero indicare la sua origine dalla riduzione di queste scorie. (PO).

Zusammenfassung

Die in Carena gesammelten Hochofenschlacken stammen von der Verhüttung des örtlich anstehenden Eisenerzes, das aufbereitet und mit einem Zuschlag aus Magnesiumkalk gemischt worden ist. Die Beschickung des Hochofens bestand aus drei bis vier Teilen Erz und einem Teil Zuschlag. Die Ausbeute muss beinahe 100 % betragen haben, denn die Hochofenschlacken enthalten praktisch kein Eisen. Die Produktion dürfte 250 bis 500 kg Eisen pro Tonne verhütetes Eisenerz betragen haben.

Graue, dichte, sehr eisenreiche Schlacken sind in einem Lagergebäude zum Vorschein gekommen. Es handelt sich dabei wahrscheinlich um Schlacken, die beim Frischen von phosphorhaltigem Gusseisen entstanden sind und anschliessend im Hinblick auf eine Wiederverwertung im Hochofen eingesammelt worden sind. Eine Hochofenschlackenprobe zeigt chemische Eigenheiten, die den Eindruck erwecken, als ob sie von der Reduktion der stark eisenhaltigen Schlacken stammen könnte. (VOS)

Introduction

L'étude des vestiges miniers et métallurgiques de Carena (Val Morobbia, Tessin, Suisse) est actuellement en cours. Elle est menée à bien grâce à la collaboration de divers chercheurs et institutions. En 1998, des échantillons de laitiers et autres déchets métallurgiques ont été prélevés sur le site en cours de fouille et ensuite étudiés au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne (H.-R. Pfeifer, directeur). Les premiers résultats sont présentés dans cet article (Fig.1), dans le cadre de l'Assemblée Générale de la Société Suisse d'Histoire des Mines. D'autres précisions et des références bibliographiques sur le site et son histoire peuvent être trouvées dans les autres contributions du même numéro de *Minaria Helvetica*.

1. Les laitiers du haut fourneau de Carena

1.1 Caractères généraux des laitiers

A l'aval des ruines de l'établissement sidérurgique du Maglio près de Carena, se trouve une importante accumulation de déchets métallurgiques. Ce sont principalement des laitiers, c'est-à-dire des matériaux plus ou moins vitreux résultants de la production de fonte par réduction de minerai de fer dans un haut fourneau (méthode indirecte). La quantité de déchets est considérable, mais les fouilles ne sont pas encore suffisamment avancées pour permettre une estimation précise. De plus, il est probable que la rivière a érodé une partie importante de cette accumulation.

Les laitiers de Carena sont facilement identifiables en raison de leurs coloris vifs et variés qui les distinguent des roches naturelles de la région. A Carena, on trouve des laitiers de différentes nuances de gris, de vert et de bleu (Fig. 2). Certaines pièces montrent des zones de coloration différentes juxtaposées de manière complexe. Dans l'ensemble, ces matériaux sont vitreux mais on observe aussi des zones cristallisées plus ou moins importantes (0 à 80% du matériau). Ces laitiers contiennent aussi des inclusions de roches non fondues en proportion très variable (0 à 30 %). On observe presque toujours des billes de fonte métallique microscopiques et parfois des nodules centimétriques. Parmi les nombreux fragments cassés, on peut voir des pièces dont la forme correspond au remplissage d'une cuvette de 50 cm de diamètre environ

et de 10 à 20 cm d'épaisseur. On reconnaît clairement la face inférieure convexe et la face supérieure horizontale et portant des traces de flux. Certaines pièces montrent la trace d'arrachement d'un canal d'alimentation. On observe aussi des fragments de plaque moins épaisse.

Il nous a été possible d'analyser chimiquement douze échantillons ramassés en surface et se distinguant par leur aspect extérieur. Dans la mesure du possible, deux échantillons de chaque catégorie ont été sélectionnés. L'échantillonnage offre donc un spectre des différents laitiers présents mais ne tient pas compte de l'abondance relative des différents types. Il n'est pas non plus possible d'attribuer une datation précise à ces pièces qui peuvent provenir des différentes phases d'activité du haut fourneau de Carena. Il est cependant vraisemblable que la période la plus récente soit la mieux représentée.

Echant.	LAITIERS												
	GRIS				BLEU		VERT		MIXTE				
	TIC301	TIC302	TIC331	TIC341	TIC311	TIC312	TIC321	TIC322	TIC3511	TIC3512	TIC352	TIC361	TIC362
SiO ₂ %	56.35	56.62	55.55	57.03	65.15	71.89	56.64	65.43	66.26	68.99	68.36	65.68	62.16
TiO ₂ %	0.24	0.26	0.24	0.24	0.24	0.18	0.39	0.22	0.24	0.23	0.20	0.29	0.28
Al ₂ O ₃ %	6.76	5.62	6.50	5.06	5.22	3.78	10.73	7.68	5.21	4.88	4.13	5.83	5.84
Fe ₂ O ₃ %	0.00	0.00	0.25	0.73	0.00	0.00	0.09	0.00	0.32	0.24	0.27	0.00	0.22
FeO %	0.05	0.00	0.29	1.99	0.38	0.50	1.99	1.43	3.77	3.40	4.22	2.49	1.45
Fe m. %	0.56	0.47	0.04	0.00	0.78	0.23	0.53	0.53	0.00	0.68	0.44	1.30	0.16
MnO %	0.22	0.15	0.22	0.15	0.16	0.13	1.58	0.49	0.16	0.15	0.14	0.17	0.18
MgO %	11.55	12.56	11.31	12.59	9.48	7.36	6.25	4.77	7.13	6.60	7.50	7.82	10.08
CaO %	21.79	21.37	21.95	19.88	16.47	13.37	17.42	16.79	12.37	11.47	12.55	13.65	17.13
Na ₂ O %	0.29	0.63	0.25	0.86	0.60	0.43	0.41	0.49	0.65	0.63	0.57	1.03	0.96
K ₂ O %	1.72	1.26	1.71	0.86	1.17	0.87	2.11	1.65	1.18	1.13	0.94	1.20	1.33
P ₂ O ₅ %	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.11	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03
H ₂ O %	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂ %	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.44	0.33	0.14	0.00	0.00
C. org. %	0.00	0.05	0.00	0.12	0.23	0.10	0.13	0.11	1.02	1.12	0.12	0.13	0.13
Somme %	99.71	99.04	98.33	99.73	99.91	99.00	98.38	99.63	99.26	99.89	99.63	99.63	99.95
S %	< 0.1	0.20	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Zr ppm	50	57	50	49	46	31	145	49	46	43	33	55	56
Y ppm	209	88	208	83	107	94	190	169	84	85	91	95	96
Sr ppm	198	268	203	228	228	193	452	343	217	211	167	237	244
Rb ppm	81	76	83	62	67	53	101	86	64	65	56	74	75
Ba ppm	390	624	420	354	435	347	1106	534	347	363	218	451	473
V ppm	11	15	14	40	16	13	261	17	32	30	39	47	43
Sn ppm	4	6	6	7	8	14	5	7	13	12	10	9	8
Sb ppm	9	4	3	3	5	6	3	<3<	3	4	3	3	3
Ag ppm	2	1	2	2	1	3	2	<1<	3	3	2	1	1
As ppm	8	5	8	7	8	6	6	6	15	6	9	7	8
Pb ppm	35	31	36	44	38	48	32	49	60	54	48	50	42
Zn ppm	9	7	7	9	7	7	10	7	14	11	6	8	9
Cu ppm	23	23	20	31	20	16	18	26	43	32	31	27	22
Ni ppm	5	4	5	5	6	<2<	9	8	28	30	6	4	5
Cr ppm	13	25	13	36	19	23	136	16	80	76	46	31	48
Co ppm	22	21	22	82	30	28	25	32	61	47	39	36	23

Fig. 1 : Analyses chimiques de laitiers et matériaux associés provenant du Val Morobba (TI). Les analyses chimiques ont été réalisées au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne (H.-R. Pfeifer, directeur; J.-C. Lavanchy) selon les procédures mises au point dans le cadre des recherches de V. Serneels (Serneels 1993).

Du point de vue chimique, ces laitiers forment un groupe relativement cohérent. Le constituant principal est toujours la silice (SiO_2 : 55 à 72 %). Les laitiers contiennent une proportion importante de magnésium et de calcium ($\text{MgO} + \text{CaO}$: 20 à 35 %). Les autres éléments sont nettement moins abondants et en particulier, le fer ne dépasse jamais 5 %. Par leur chimie globale, ces matériaux sont donc nettement différents des scories de réduction des minerais de fer par la méthode directe (Fig. 3).

L'échantillonnage paraît trop restreint pour mettre clairement en relation la couleur macroscopique avec la composition chimique. Il semble néanmoins que les laitiers gris ou blanchâtres sont plutôt pauvres en silice et que ceux qui possèdent les couleurs les plus marquées sont au contraire riches en silice. Les laitiers verts sombre présentent des particularités chimiques qui seront discutées plus bas.

	MINERAI	SCORIES D'AFFINAGE				GNEISS	CALCAIRE
Echant.	TIC101	TIC001	TIC002	TIC081	TIC151	TIC071	TIC201
SiO ₂ %	73.75	7.19	4.21	5.06	4.25	65.55	1.13
TiO ₂ %	0.02	0.11	0.09	0.10	0.08	0.73	0.03
Al ₂ O ₃ %	0.33	1.96	1.37	1.65	1.32	14.34	0.63
Fe ₂ O ₃ %	7.54	26.36	35.72	30.35	56.22	1.90	0.55
FeO %	9.67	43.13	40.95	47.67	22.00	5.74	0.00
Fe m. %	0.00	6.09	8.45	7.78	0.47	0.00	0.00
MnO %	0.01	0.54	0.34	0.21	0.44	0.12	0.05
MgO %	0.00	1.13	0.90	1.00	1.23	2.46	15.31
CaO %	0.09	3.29	2.29	3.02	4.58	2.74	38.22
Na ₂ O %	0.00	0.25	0.10	0.09	0.19	2.22	0.00
K ₂ O %	0.01	0.63	0.31	0.32	0.97	2.75	0.03
P ₂ O ₅ %	0.01	8.81	5.57	1.50	7.43	0.34	0.04
H ₂ O %	8.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	1.85
CO ₂ %	0.22	0.28	0.00	0.55	0.19	0.28	41.57
C. org. %	0.10	0.00	0.00	0.13	0.08	0.00	0.00
Somme %	99.97	99.76	100.29	99.43	99.46	99.20	99.39
S %	10.00	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Zr ppm	6	22	20	21	20	265	5
Y ppm	5	6	5	5	6	33	4
Sr ppm	8	201	149	228	297	273	189
Rb ppm	11	2	<1<	<1<	5	94	17
Ba ppm	16	774	496	561	980	736	<9<
V ppm	6	829	602	133	656	99	49
Sn ppm	9	<4<	<4<	<4<	4	7	<4<
Sb ppm	<3<	8	6	3	3	3	<3<
Ag ppm	<1<	2	2	1	3	1	<1<
As ppm	6	4	6	6	<3<	23	3
Pb ppm	50	74	84	90	63	46	<2<
Zn ppm	10	9	11	12	32	72	12
Cu ppm	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	30	7
Ni ppm	124	<2<	5	<2<	6	37	<2<
Cr ppm	40	543	384	130	441	94	28
Co ppm	469	225	249	280	253	155	7

Fig. 1 suite : Analyses chimiques de laitiers et matériaux associés provenant du Val Morobba (TI). Les analyses chimiques ont été réalisées au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne (H.-R. Pfeifer, directeur; J.-C. Lavanchy) selon les procédures mises au point dans le cadre des recherches de V. Serneels (Serneels 1993).

La quantité de fer qui reste piégée dans le laitier est minime. Elle se trouve principalement sous forme de métal en inclusions microscopiques et plus rarement centimétriques. Ces inclusions de métal ne semblent pas avoir fait l'objet d'une récupération poussée qui aurait nécessité un concassage. La grande taille des fragments de laitier visibles sur le site indique que cela n'a pas été fait.



Fig. 2 : Les laitiers de Carena: a) sur le terrain. b) vue en coupe.

1.2 Comparaison entre le minerai et les laitiers

Le minerai prélevé dans la mine voisine est constitué principalement d'une gangue de quartz et de filonnets discontinus de sulfures de fer. Le sulfure principal est la pyrrhotine, accompagnée éventuellement par de la pyrite (Köppel 1966). Ces minéraux sont partiellement oxydés et on observe des placages rougeâtres, probablement des oxydes et hydroxydes de fer, dans les fissures de la roche. Le bloc analysé ne contient qu'une faible proportion de fer (TIC 101 : Fetot = 12.5 %, FeS = 20 %, poids = 15 % volume). Dans le minerai brut, la proportion de gangue par rapport aux sulfures est évidemment très variable et il est fort probable que les parties exploitées du gisement renfermaient des zones nettement plus riches, aujourd'hui disparues. La teneur mesurée sur l'échantillon TIC 101 n'a donc pas de signification réelle. Avant d'être mis dans le fourneau, ce minerai était très probablement concentré par concassage et tri ou lavage. Il subissait sans doute aussi un grillage qui élimine le soufre et fragilise la roche. Pour le moment, les recherches n'ont pas encore fourni d'indices permettant de mieux comprendre les traitements préliminaires appliqués au minerai de Carena.

L'analyse chimique permet de montrer que le filon ne contient pratiquement aucun élément mineur ou trace accompagnant le fer, si ce n'est un peu de nickel et de cobalt. Malheureusement, ces éléments métalliques possèdent une très forte affinité pour le fer et subissent certainement une réduction complète en même temps que le fer. Ils passent donc pratiquement complètement dans le métal et ne sont pas présents dans le déchet. Les analyses des laitiers de Carena, avec leurs très faibles teneurs en nickel et cobalt le montrent clairement. La seule substance apportée au laitier par le minerai proprement dit est donc la silice.

La composition chimique des laitiers indique clairement l'utilisation d'un fondant contenant à la fois du calcium et du magnésium. Ces éléments ne sont pas présents dans le minerai. L'utilisation d'un fondant calcique est une pratique qui se développe à partir du Moyen Age. On utilise très généralement des roches calcaires qui sont naturellement abondantes dans de nombreuses régions. Le point de fusion minimum d'un mélange de chaux et de silice se situe vers 1450°C, nettement au-dessous des 1700°C nécessaires pour fondre la silice plus ou moins pure. En présence d'alumine, de magnésie ou d'oxydes de fer, on peut obtenir des liquides à des températures

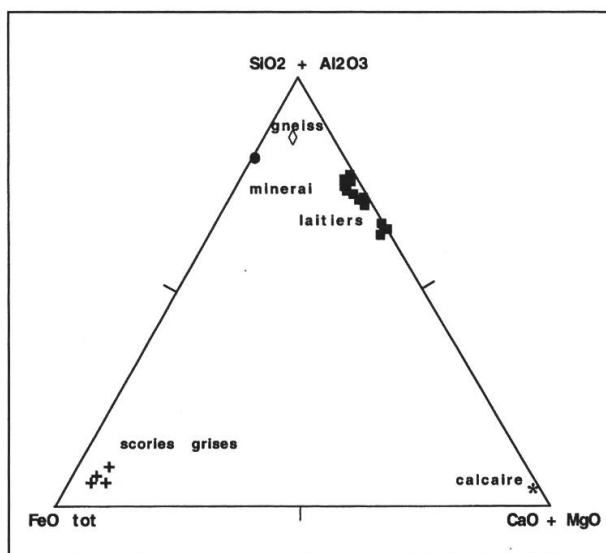


Fig. 3 : Triangle : FeO_{tot} - $SiO_2+Al_2O_3$ - $CaO+MgO$. Composition chimique globale des différents types de déchets métallurgiques et matériaux associés de Carena TI.

pouvant descendre jusqu'à 1200°C seulement. Evidemment, dans le cas de la métallurgie du fer, il n'est pas souhaitable de perdre une forte proportion de fer sous forme d'oxydes dans les déchets, ce qui est le cas pour la réduction du minerai de fer par la méthode directe. Dans le haut fourneau, on évite ce problème en réduisant la totalité du fer à l'état métallique. L'ajout d'une certaine quantité d'alumine ou de magnésie permet de travailler avec des liquides fusibles vers 1350°C.

L'aluminium est souvent contenu naturellement dans le minerai mais on a aussi rajouter volontairement des argiles comme fondant. Le magnésium, au contraire, n'est que très rarement associé au fer dans les minerais. Par contre, certaines roches carbonatées, les dolomies, contiennent une proportion importante de magnésium. A la surface de la terre, les dolomies sont relativement peu abondantes. Ce n'est qu'au cours du XXème siècle que les sidérurgistes ont compris l'intérêt de ce type particulier de roche et ont développé son utilisation. De nos jours, on fabrique artificiellement des composés riches en magnésium qui servent de fondant en sidérurgie. Cependant, les régions fortement métamorphiques comme les Alpes sont favorables à la formation de dolomies naturelles. Au Tessin, où les roches carbonatées sont relativement rares, on a pu, empiriquement découvrir précocement les avantages pratiques de ce fondant, avant que les chimistes et métallurgistes n'aient pu en expliquer la raison. La présence de magnésium dans les laitiers de Carena n'est donc pas forcément une preuve qu'ils sont très récents puisque cette matière première est, dans le cadre géologique régional, à peu près aussi faciles à trouver que des calcaires non magnésiens.

Si les teneurs en CaO et en MgO varient dans les différents échantillons analysés, on remarque que le rapport entre les deux oxydes est très proche dans 10 échantillons sur 12 (CaO : MgO = 1,75). Seuls les échantillons TIC 321 et 322 possèdent des rapports nettement plus élevés (voir plus loin). Cette cohérence des données indique clairement que, pour les dix échantillons, c'est toujours la même roche dolomitique qui a été ajoutée comme fondant. Aucun autre élément chimique n'est clairement corrélé avec CaO et MgO. La roche utilisée était donc pauvre en éléments mineurs et traces.

Un petit stock d'environ 20 kg de calcaire a été retrouvé dans un petit bâtiment du complexe sidérurgique du Maglio. L'échantillon analysé (TIC 201) est un calcaire dolomitique assez pur ne contenant que des traces de silice, d'alumine et d'oxydes de fer. Les éléments traces sont peu caractéristiques. Le rapport entre CaO et MgO est de 2,5. Il est nettement plus élevé que dans le groupe principal des laitiers. Il est donc exclu que cette roche soit le fondant utilisé pour fabriquer ces laitiers.

Les laitiers analysés contiennent d'autres substances, en particulier, un peu d'alumine et de potasse. On observe que ces deux oxydes sont clairement corrélés (Fig. 4). Le zirconium (Zr) et le rubidium (Rb) sont également liés à ces éléments de manière parfaitement claire. Le strontium (Sr) et le barium (Ba) se comportent de manière similaire. Ces substances proviennent donc en majeure partie d'une seule source qui ne peut être ni le minerai lui-même, ni le fondant calcaire. On peut penser à un apport lié à une mauvaise séparation entre le minerai et les roches encaissantes. Des fragments de roches gneissiques incomplètement fondus ont été observés directement dans certains laitiers. Leur participation à la réaction est donc certaine.

Les roches encaissantes n'ont pas été directement étudiées au cours de ce travail mais des analyses de gneiss de la zone de Ceneri ont été publiées précédemment (Rheinard 1964). Ces roches contiennent environ 15 % de Al_2O_3 et 3,5 % de K_2O . Le rapport entre ces deux éléments dans les laitiers de Carena est proche de 4,5, ce qui est compatible avec ces analyses.

Les échantillons TIC 301 et 331 possèdent des rapports Al_2O_3 : K_2O un peu plus bas que les autres et des spectres des éléments traces lithophiles (Zr, Y, Sr, Rb, Ba) qui les distinguent du reste du groupe.

Ces différences pourraient s'expliquer par le fait qu'il peut y avoir de légères variations dans la nature des roches encaissantes soit dans les différentes parties d'une même mine soit entre deux mines voisines. Plusieurs zones d'extractions sont connues dans les environs du haut fourneau. On ne dispose malheureusement pas d'analyses des éléments traces dans les gneiss de la région.

Un morceau de gneiss partiellement fondu provenant du local de stockage fouillé en 1998 a fait l'objet d'une analyse chimique (TIC 071). Il est évidemment impossible de prouver que ce fragment provient de la roche encaissante des filons de Carena mais il est probable qu'il soit de provenance locale. Ce gneiss possède des caractéristiques chimiques qui sont compatibles avec les laitiers. Outre l'alumine et la potasse, on observe une bonne relation pour les éléments traces également, par exemple une forte teneur en Rb.

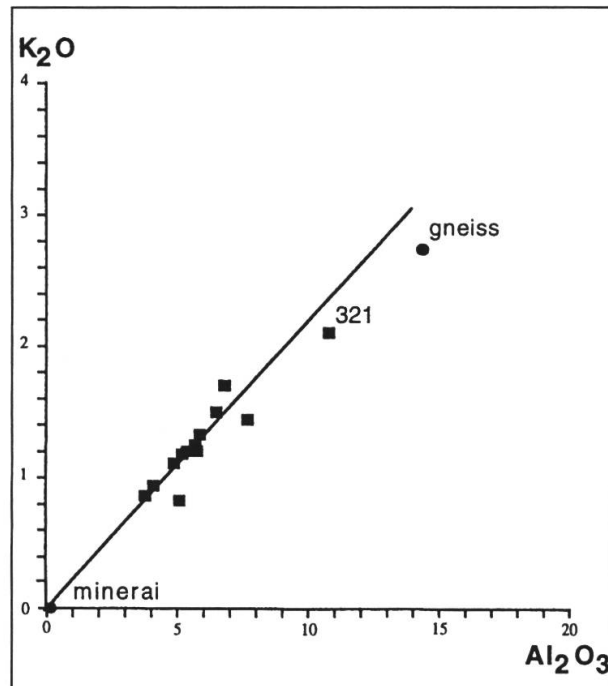


Fig. 4 : Diagramme de corrélation Al_2O_3 / K_2O pour les laitiers de Carena.

Les laitiers de Carena portent des empreintes clairement identifiables de charbon de bois et en contiennent parfois encore des fragments identifiables. C'est donc ce combustible qui a été utilisé. Il a pu être fabriqué sur place ou tout au moins dans l'environnement proche du site alors qu'il aurait fallu importer du coke de régions beaucoup plus éloignées.

La cendre du charbon de bois contribue sans doute à la formation du laitier. Cet apport est difficile à chiffrer faute d'analyse et il n'est donc pas possible d'en tenir compte. On peut supposer que, comme c'est le cas généralement, les cendres de charbon apportent un peu de chaux et de potasse. Dans le cas du Tessin, où le substrat géologique est majoritairement constitué de roches siliceuses, il est probable que le charbon apporte aussi une certaine quantité de silice.

Les laitiers de Carena sont donc interprétables comme les résidus de la fusion d'une charge complexe. Le minerai à gangue de quartz apporte une partie de la silice. De la roche encaissante gneissique, mélangée avec le minerai, apporte l'alumine et la potasse. Le fondant dolomitique apporte la chaux et la magnésie. L'apport de la cendre de combustible ne peut pas être caractérisé. On suppose que la paroi du fourneau est suffisamment réfractaire pour ne pas apporter de contribution importante.

1.3 Remarques sur les conditions physico-chimiques de l'opération de réduction

Les températures atteintes dans le fourneau ne peuvent que difficilement être déterminées à l'aide des données thermodynamiques théoriques. Les compositions chimiques des laitiers sont relativement proches du système ternaire $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$. Si on effectue les projections dans ce système, on observe cependant que plusieurs échantillons se trouvent dans des domaines correspondants à des températures très élevées (plus de 1600°C) et certains sont même projetés dans un domaine instable qui devrait voir la coexistence de deux liquides dont un de composition hypersiliceuse. Il semble donc difficile d'utiliser ces résultats sans tenir compte de la présence d'alumine (Al_2O_3). L'effet de ce quatrième constituant est difficile à prévoir mais il abaisse probablement le point de fusion des liquides considérés. Il est cependant peu probable que ces matériaux soient fusibles à des températures inférieures à 1500°C .

On constate aussi que les éléments chimiques qui sont plus facilement réduits par le monoxyde de carbone que le fer, comme Ni et Co, sont presque complètement absents dans le laitier. Ces éléments sont présents en traces dans les sulfures du minerai. Ils passent donc entièrement dans la phase métallique. De même, des éléments un peu plus difficiles à réduire que le fer, comme le P, le Mn, le V et le Cr, sont eux aussi très bas dans les laitiers ce qui laisserait supposer que des conditions fortement réductrices sont atteintes pendant l'opération. Cependant, les teneurs dans le minerai étant aussi très basses, cet argument perd une partie de sa pertinence. Enfin, le fer présent dans les laitiers est généralement à l'état métallique ou à celui d'oxyde ferreux (FeO). La proportion d'oxyde ferrique (Fe_2O_3) est toujours très basse. Cette observation confirme une réduction presque complète.

1.4 La production de fer

La première constatation que l'on tire de l'examen des données analytiques est que le rendement du procédé dont sont issus ces laitiers est très élevé. Il n'y a presque aucune perte de fer dans les laitiers et ce peu de fer perdu est en bonne partie à l'état métallique. On peut donc conclure que le rendement est proche de 100 % et que presque tout le fer présent dans le minerai est réduit à l'état de métal. Pour un procédé indirect récent, ce n'est pas surprenant.

Il est plus difficile de calculer la production, c'est-à-dire la quantité de fer produite par rapport à la quantité de déchets ou bien par rapport à la quantité de minerai utilisée. En effet, avec un rendement proche de 100%, la production est directement

proportionnelle à la teneur en fer du minerai ou plus exactement du minerai concentré tel qu'il est mis dans le fourneau. A Carena, cette donnée nous échappe presque complètement. Le seul minerai connu est celui que l'on peut récolter brut dans la mine. Il n'a certainement pas été utilisé tel quel mais on ne sait rien de la préparation qu'il a subi avant son enfournement (concassage, tri, lavage et sans doute grillage). Sans cette donnée, il n'est pas possible de calculer directement la production. Il est cependant possible de tenter une approche par une voie détournée.

Le rapport en CaO et MgO étant constant dans les laitiers. Ceci démontre que le calcaire dolomitique utilisé comme fondant est toujours le même. On peut aussi penser que les artisans ont toujours chargé le fourneau de la même manière, sans doute en utilisant un rapport simple, soit 1 unité de fondant pour 2, 3, 4 ou 10 unités de minerai par exemple. En posant ces deux hypothèses, on peut développer un calcul de production. En confrontant les résultats de ce calcul aux observations, on pourra apprécier la vraisemblance des chiffres proposés.

Si ces deux conditions sont réunies, on devrait toujours avoir le même rapport entre les éléments apportés par le fondant (Mg et Ca) et ceux apportés par la gangue du minerai (Si, Al, K). Ce n'est pas le cas à Carena où ce rapport varie de 1 : 2 à 1 : 4, en passant par des valeurs intermédiaires. On peut en déduire que la teneur du minerai en fer (respectivement en gangue) est extrêmement variable. Il faut rappeler que le minerai, qui provient de plusieurs mines, subit certainement un enrichissement par le biais d'un processus de préparation. Aux variations liées à la nature du minerai se rajoute des variations qui peuvent être liées à une maîtrise imparfaite des traitements de concentration. Les variations de la teneur en fer du minerai de Carena ne sont donc pas surprenantes.

Lorsque l'on traite un minerai pauvre en fer donc riche en gangue, on produit un laitier riche en silice donc pauvre en chaux et magnésie (Fig. 5 et 6). On observe la situation inverse pour un minerai riche en fer.

En connaissant la quantité de fondant nécessaire pour produire une unité de laitier siliceux (respectivement calcique), il est possible de calculer la quantité de gangue silico-alumineuse nécessaire. Sachant que cette gangue est accompagnée par une certaine quantité de minéraux riches en fer, on peut procéder à des estimations pour les différents rapports de charge envisageables.

Si on traite un "minerai" ne contenant pas du tout de fer, pour produire 1 kilo de laitier siliceux il faut environ 400 gr de calcaire dolomitique et 800 gr de gangue (mélange de gneiss et de quartz), soit un rapport fondant : gangue proche de 1 : 2. Avec un rapport inférieur, il est impossible de former ne fût que le laitier. Evidemment, comme dans ce cas la production de fer est nulle, il est certain que les sidérurgistes de Carena n'ont jamais procédé ainsi sinon ils auraient été rapidement acculés à la faillite. Avec un minerai de mauvaise qualité, pour obtenir une production minimum, il faut donc que le poids du minerai enfourné soit au moins le triple de celui du fondant. Si on utilise ce rapport fondant : minerai de 1 : 3, on peut s'attendre à une production de fer de 280 gr pour 1 kg de laitier. Dans ce cas, le minerai grillé doit

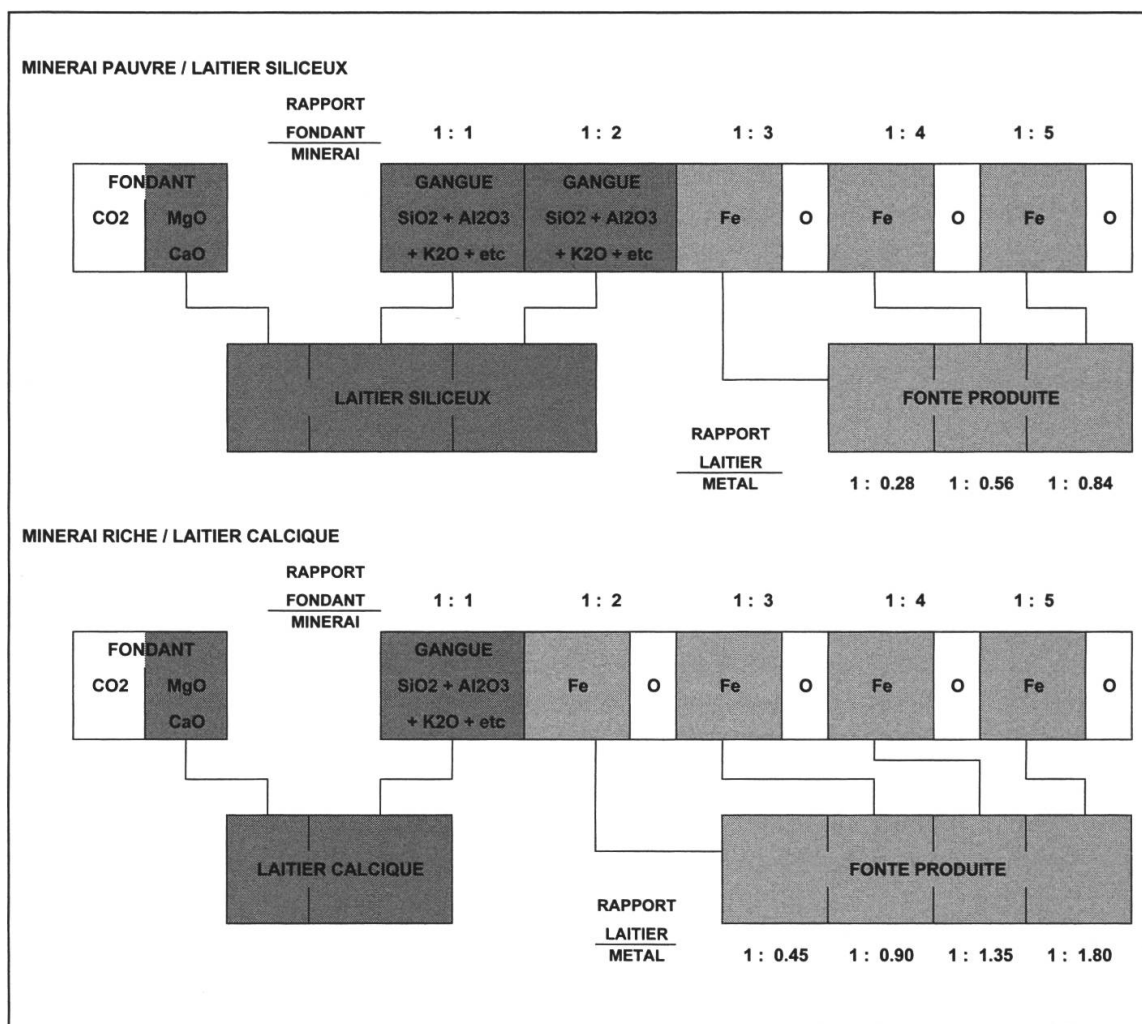


Fig. 5 : Schéma expliquant la relation entre minerai riche en fer (respectivement pauvre) et laitiers calciques (respectivement siliceux).

	CHARGE			PRODUITS		RAPPORT DE LA CHARGE	TENEUR DU MINERAI	PRODUCTION		
	FONDANT	MINERAI CONCENTRE	Fe ₂ O ₃ tot	LAITIER	METAL			Fe ₂ O ₃ tot %	Métal / 1 Laitier	Métal / 1 Minerai
	MgO + CaO + CO ₂ g	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + K ₂ O + etc g		SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + K ₂ O + CaO + MgO + etc g	Fe g					
LAITIER SILICEUX	-	-	-	-	-	1 : 1	-	-	-	
ET MINERAI PAUVRE	400	800	0	1000	0	1 : 2	0	0	0	
	400	800	400	1000	280	1 : 3	33	0.28	0.23	
	400	800	800	1000	560	1 : 4	50	0.56	0.35	
	400	800	1200	1000	840	1 : 5	60	0.84	0.42	
LAITIER CALCIQUE	650	650	0	1000	0	1 : 1	0	0	0	
ET MINERAI RICHE	650	650	650	1000	450	1 : 2	50	0.45	0.34	
	650	650	1300	1000	900	1 : 3	66	0.90	0.46	
	650	650	1950	1000	1350	1 : 4	75	1.35	0.51	
	650	650	2600	1000	1800	1 : 5	80	1.80	0.69	

Fig. 6 : Tableau des estimations de production pour les minerais riches et pauvres selon les différents rapports de charge. Seuls les rapport 1 : 3 et 1 : 4 paraissent vraisemblables.

avoir une teneur de l'ordre de 30 % $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{tot}$. Si on utilise un rapport de 1 : 4, il faut un minerai avec une teneur de 50 % $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{tot}$ et on parvient à produire 560 gr de fer pour 1 kg de laitier.

A l'opposé, pour produire 1 kilo de laitier calcique, il faut enfourner un peu plus de 650 gr de fondant et un poids équivalent de gangue (rapport 1 : 1). Pour un rapport fondant : minerai de 1 : 2, il faut déjà un minerai ayant une teneur de 50 % $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{tot}$ et l'on obtient une production de 450 gr de fer pour 1 kg de laitier. On a vu que le rapport de 1 : 2 est improbable car il ne permettrait pas d'obtenir une quantité minimale de fer avec les minerais les plus pauvres. Cette hypothèse n'est donc pas vraisemblable. Pour un rapport de 1 : 3, il faudrait un minerai avec une teneur de 66 % de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{tot}$ ce qui est acceptable. Par contre, avec un rapport de 1 : 4, l'enrichissement du minerai devrait être excellent (teneur de 75 % $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{tot}$), or on constate dans les laitiers la présence de nombreux fragments de roches non fondus, observation qui n'est pas compatible avec un enrichissement extrêmement poussé du minerai. Des rapports plus faibles entre le fondant et le minerai paraissent donc devoir être exclus pour cette raison.

D'après ce calcul, on peut donc admettre que la charge du haut fourneau de Carena était probablement constituée de 1 part de fondant pour 3 ou 4 parts de minerai. Ce minerai était un concentré dont la teneur était variable (de 30 à 75 % $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{tot}$), en raison soit de la variabilité naturelle de la minéralisation soit à cause de procédés de concentration imparfaits. Dans l'hypothèse la plus basse, la production est de 280 gr par kg de laitier siliceux (ce qui est équivalent à 230 gr de fer pour 1 kg de minerai pauvre). Dans l'hypothèse optimiste, la production de fer est de 1360 gr pour 1 kg de laitier calcique (525 gr de fer pour 1 kg de minerai riche). La variabilité de la composition des laitiers reflète cette irrégularité de la production. Il n'est pas possible pour le moment d'évaluer la proportion de laitiers calciques par rapport aux laitiers siliceux sur le site ni de montrer une éventuelle évolution au cours du temps.

Le progrès des recherches sur le site permettra sans doute de parfaire cette approche. Il faut espérer que les fouilles mettront au jour du minerai de fer préparé ou des installations destinées à ces opérations préliminaires. Il faut aussi essayer de chiffrer avec plus de précision le volume des déchets présents et estimer la fréquence des laitiers siliceux et calciques. Des échantillons prélevés dans des contextes stratifiés seront aussi utiles pour mettre en évidence d'éventuels changements dans les procédés techniques au cours du temps.

2. Le stock de scories denses destinées au recyclage

La fouille de juillet 1998, a permis de dégager les fondements d'un petit bâtiment faisant partie du complexe sidérurgique du Maglio. Au-dessus du sol en galets de ce bâtiment, on a découvert une couche constituée principalement de scories grises et denses (TIC 001 et 002). Ces matériaux avaient été concassés en fragments de moins de 5 centimètres d'arête (Fig. 7). Ces scories étaient accompagnées de quelques débris riches en fer (TIC 081), y compris de petits blocs de fonte et d'agglomérats

friables d'oxydes de fer (TIC 151). Enfin, dans l'un des angles, est apparu une concentration de petits blocs de calcaire dolomitique (TIC 201).

Les scories sont de couleur gris sombre. Elles ont une faible porosité et une densité apparente élevée. Elles réagissent à l'aimant. L'observation macroscopique et microscopique montre que la matière est complètement cristallisée sous forme de wüstite (FeO) et de fayalite (Fe_2SiO_4). Ces scories contiennent aussi des particules microscopiques de fer métallique. La fragmentation intense rend impossible la reconnaissance de la forme de ces scories. La plupart des surfaces montrent des structures de flux qui font penser que ces scories ont été écouleées en plaque peu épaisse (4 / 5 cm au maximum) ou en cordons.

Par leur aspect, ces scories ressemblent très fort aux scories provenant de la réduction d'un minerai de fer dans un bas fourneau (méthode directe). Par contre, l'analyse chimique de ces échantillons fait apparaître des teneurs en fer extrêmement élevées ($\text{Fetot} = 58$ et 65%) qui rendent cette identification incertaine. Ces scories pourraient plus facilement être interprétées comme des résidus résultants de l'affinage de la fonte dans un foyer. Cela expliquerait mieux la forte teneur en fer ainsi que la présence d'une forte proportion de Fe_2O_3 . De même, les teneurs en CaO et MgO , relativement élevées sont plus faciles à comprendre dans des scories d'affinage. On soulignera aussi que ces scories possèdent des teneurs élevées en phosphore (P_2O_5), en manganèse (MnO), en chrome (Cr) et vanadium (V). Ces quatre éléments accompagnent souvent le fer dans ses minerais. Au cours de la réduction par la méthode directe au bas fourneau, ils ne subissent que peu ou même pas du tout de réduction et passent



Fig.7 : Les scories grises denses (affinage ?) de Carena.

dans la scorie. Mais dans les conditions du haut fourneau, ces mêmes éléments subissent une réduction au moins partielle et s'allient au fer. Lors de l'affinage, ils ont une plus forte tendance à s'oxyder que le fer. Logiquement donc, ces éléments se retrouvent aussi dans les scories d'affinage de la fonte. Malheureusement, très peu de travaux scientifiques récents ont porté sur ce type de déchets métallurgiques issus des procédés récents et les comparaisons ne sont pas possibles.

Les particularités chimiques qui viennent d'être évoquées permettent aussi d'écarter certaines hypothèses, en particulier en relation avec le minerai de Carena. Il est clairement impossible que ces scories résultent de la réduction par la méthode directe du minerai de fer de Carena. Ni le minerai, ni les roches encaissantes ne contiennent de P, Mn, V ou Cr. Leur présence dans les scories est donc une preuve suffisante pour abandonner cette hypothèse. Mais de la même manière, ces scories ne peuvent pas résulter de l'affinage d'une fonte produite à Carena en utilisant le minerai local. Si ce sont bien des scories d'affinage d'une fonte, il est évident que celle-ci était riche en phosphore et donc produite à partir d'un minerai contenant cet élément. Les minerais de fer phosphoreux sont relativement peu nombreux en Suisse et dans les Alpes en général. Dans cette aire géographique, seuls les gisements de minerai oolithique mésozoïques contiennent un peu de phosphore, en général moins de 2 %. Il existe quelques pointements dans les Alpes calcaires (Chamoson VS, Erzegg BE-OW, etc) mais les principaux gisements se trouvent dans la chaîne du Jura (Herznach AG, etc). L'exploitation s'est poursuivie depuis le Moyen Age jusqu'au XXème siècle. Dans les pays d'Europe centrale et du nord, de nombreux gisements de minerai phosphoreux existent, le plus célèbre d'entre eux étant la minette de Lorraine. La fonte produite avec ces minerais phosphoreux a largement circulé en Europe aux Temps Modernes et l'affinage a pu être effectué sur le lieu de consommation plutôt que dans la région de production. Il reste cependant difficile d'expliquer comment des scories d'affinage de fonte phosphoreuse ont pu arriver sur le site de Carena...

Ces scories ont-elles été produites sur place lors d'opération d'affinage de gueuses de fonte importées ? L'atelier de Carena est effectivement équipé pour mener à bien cette opération mais on peut penser qu'il était d'abord destiné à la transformation de la fonte produite localement.

Ces scories ont-elles été importées à Carena en provenance d'un autre établissement sidérurgique voisin pratiquant l'affinage d'une fonte phosphoreuse importée ? Quel pourrait être cet établissement ?

Cette seconde hypothèse est certainement la plus séduisante. Dans ce cas, ces scories d'affinage auraient été importées comme minerai ou comme ajout destiné à la réduction dans le haut fourneau. Les constats faits sur le terrain et au laboratoire rendent cette hypothèse crédible sans toutefois en avoir apporté la preuve définitive.

Manifestement, les scories ont été placées volontairement dans le petit bâtiment où on les a retrouvées. Elles formaient une couche dense et homogène ne contenant que quelques pourcents de sédiment charbonneux. On peut penser que cette terre s'est en bonne partie infiltrée après l'abandon du site et qu'à l'origine les scories étaient propres. Les rares autres substances trouvées au milieu des scories sont des déchets

ferreux qui pourraient facilement être recyclés en même temps que les scories. Le fait que les scories ont été concassées de manière assez uniforme donne aussi l'impression d'une matière première préparée avec soin et stockée volontairement. Enfin, un petit tas de blocs de calcaire dolomitique utilisable comme fondant a été retrouvé dans un angle du même local.

Du point de vue chimique, vu leurs teneurs en fer élevées, ces scories constituent effectivement un bon minerai. Dans les conditions du haut fourneau, ces matériaux sont relativement faciles à fondre. La pratique du recyclage des anciennes scories d'affinage ou des scories de réduction par la méthode directe est bien attestée dans de nombreuses régions (Berthier 1822).

Pour finir, il faut encore mentionner l'analyse d'un échantillon de laitier récolté à Carena dont la composition est sensiblement différente des autres (TIC 321). C'est un laitier qui comme les autres est le résultat de la fusion d'un minerai siliceux associé à un fondant calco-magnésien mais dans ce cas, le minerai est nettement plus alumineux et le fondant nettement plus calcique (Fig.4). Les matières premières ne sont donc certainement pas les mêmes que pour les autres laitiers du site. En fait, on constate que TIC 321 contient des traces notables de Cr, de V, de MnO et de P₂O₅ qui sont justement les éléments abondants dans les scories grises denses. Le barium est aussi anormalement élevé mais ce fait est plus difficile à interpréter. Il faut remarquer que l'échantillon TIC 322, un autre fragment de laitier vert sombre, possède une composition chimique intermédiaire entre celle de TIC 321 et celles des autres laitiers du site. Il semble donc que dans les déchets de réduction de Carena, on puisse trouver des laitiers qui résultent du recyclage de scories d'affinage de fonte phosphoreuse. Cette constatation reste cependant basée sur une seule analyse pertinente et demande donc des recherches complémentaires.

Conclusion

L'étude des déchets sidérurgiques et matériaux associés provenant du Val Morobbia n'en est qu'à ses débuts. A plusieurs points de vue, elle est novatrice car jusqu'à maintenant les spécialistes ont souvent préféré travailler sur des périodes beaucoup plus anciennes. Les procédés sidérurgiques récents restent donc bien souvent très mal documentés, en particulier en ce qui concerne les vestiges matériels. C'est un paradoxe car ceux-ci abondent au contraire et ont été disséminés partout comme balast pour les routes ou les chemin de fer, entre autres. Il serait donc souhaitable de disposer de données permettant d'attribuer clairement ces matériaux à des procédés techniques reconnus de manière à éviter toute confusion avec des vestiges beaucoup plus anciens. Pour le moment, les spécialistes en sont en général réduits à apprécier grossièrement des critères visuels et souvent assez subjectifs pour poser un diagnostic. Il peut s'en suivre de regrettables erreurs.

Il peut sembler superflu d'essayer de comprendre ces procédés récents au vu de l'importance de la littérature technique de l'époque qui décrit ces méthodes de production. Mais en fait, cette littérature ne traite pas systématiquement tous les cas. Par

exemple, on répète souvent que les minerais sulfurés n'ont pas été utilisés pour produire du fer par le passé en raison de la présence de soufre qui donne du fer de piètre qualité. L'exemple de Carena est là pour montrer que les règles générales souffrent des exceptions. Là où le fer est rare, et donc cher, un minerai difficile à traiter vaut mieux que pas de minerai du tout. De même, un fer de bonne qualité est recherché pour la fabrication d'armes et d'outils performants mais il n'est pas indispensable pour une production de clous et de ferrures. Les conditions qui président au développement d'un établissement sidérurgique comme celui de Carena peuvent donc être complètement différentes de celles qui prévalent dans d'autres régions. Un tel phénomène "micro-économique" n'en est pas moins intéressant.

Bibliographie :

BERTHIER, P. 1822 : Sur la nature des scories de forges catalanes et des foyers d'affinerie. Annales des Mines (1) 7, 1822, p.307-402.

KÖPPEL, V. 1966 : Die Vererzungen im insubrischen Kristallin des Malcantone (Tessin). Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie 40, Bern.

RHEINARD, M. 1964 : Über das Grundgebirge des Sottoceneri im Süd-Tessin und die darin auftretenden Ganggesteine. Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, NF 117, Bern.

SERNEELS, V. 1993 : Archéométrie des scories de fer. Cahiers d'Archéologie Romande 61, Lausanne 1993.

Adresse de l'auteur: Dr. Vincent Serneels
Institut de Minéralogie
Université de Fribourg
Pérolles
1700 Fribourg