



HAL
open science

La métallurgie ancienne: fer, fonte acier

Denis Morin, Philippe Fluzin

► **To cite this version:**

Denis Morin, Philippe Fluzin. La métallurgie ancienne: fer, fonte acier. Bibliothèque de travail [1964-2006], 1097, 1998, Bibliothèque de Travail BT. hal-04853843

HAL Id: hal-04853843

<https://hal.science/hal-04853843v1>

Submitted on 22 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Un grand reportage

LA MÉTALLURGIE ANCIENNE : FER, FONTE, ACIER.

« Que de difficultés à vaincre ! Que de problèmes à résoudre ! Combien d'arts accumulés les uns sur les autres ne faut-il pas pour fabriquer ce clou ou cette épingle dont nous faisons si peu de cas ! » (Buffon, 1783).

Étudier l'histoire de la métallurgie du fer c'est chercher quand et surtout comment le fer a été travaillé pour devenir matière d'une médaille, d'un récipient, d'un outil, d'un viaduc...

Par quels hasards successifs, par quelles inventions ingénieuses de générations d'artisans, par quelles opérations a-t-on tiré ce métal de la « pierre » ?

Des archéologues, des ethnologues et des métallurgistes examinent les vestiges et les installations qui racontent le passage du minerai de fer au métal, une étape fondamentale de l'histoire des techniques.

D'autres reportages :

– **Le savoir fer, ou comment fabriquer du fer aujourd'hui** : récit d'une expérimentation.

– **Un laboratoire de paléométallurgie** : CNRS de l'université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

MOTS CLÉS :

Pour faciliter votre classement, vous pouvez répertorier ces reportages aux mots clés suivants :

- **acier, bas fourneau, fer, fonte, haut fourneau, métallurgie, mine, réduction, scorie ;**
- **archéologie expérimentale, bronze, charbon de bois, fer, laboratoire.**

Bibliothèque de Travail

fondée par Célestin Freinet

• Publication éditée, imprimée et diffusée par les PUBLICATIONS DE L'ÉCOLE MODERNE FRANÇAISE Société anonyme - RCS : Cannes B 339.033.334 - APE : 221 E. Siège social : Parc de l'Argile, voie E - 06370 MOUANS-SARTOUX (France).

Directeur de la Publication :
Robert POITRENAUD.

Responsable de la Rédaction :
Pierre PÉGUIN

Comité de Direction :
Robert POITRENAUD :
Président-Directeur général ;
Georges DELOBBE, Pierre
GUÉRIN, Michel RIBIS :
administrateurs.

• Administration - Rédaction -
Abonnements : PEMF
06376 MOUANS SARTOUX CEDEX
Tél. : 04 92 92 17 57

Loi n° 49956 du 16 juillet 1949 sur les
publications destinées à la jeunesse.

Dépôt légal à parution.
N° CPPAP : 53288 - ISSN 0005-335X

BT

MAGAZINE DOCUMENTAIRE



CNRS
CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

- Un laboratoire de paléométallurgie
- Le savoir fer

La métallurgie ancienne fer, fonte, acier

10 N° PAR AN

1097



COUVERTURE :

Maquette de la couverture : Bernard TRINCAVELLI
Photographie : tableau de Henri Blès
GIRAUDON-Paris
Avril 1998 - n° 1097 - 10 numéros par an : 342 F
N° d'impression : 8980

SOMMAIRE

BT

Revue fondée
par C. FREINET
© 1998
Publications
de l'École moderne
française

2 LA MÉTALLURGIE ANCIENNE : FER, FONTE, ACIER

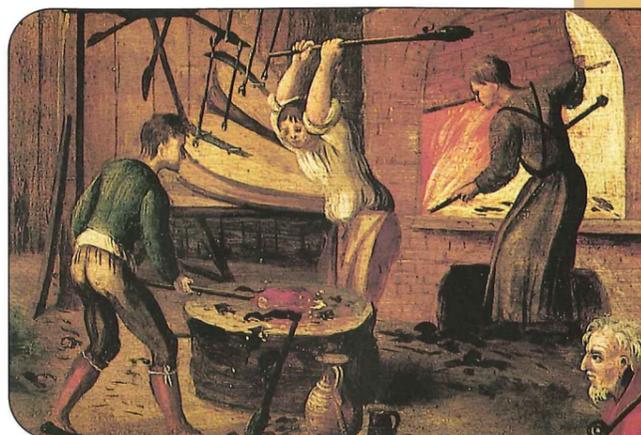
Ce reportage a été conçu par Denis MORIN et Philippe FLUZIN (CNRS Unité Propre de Recherche A0 423).

Collaborateurs :

Hélène MORIN-HAMON, Lucien BUESSLER, Roland BOLMONT, Nuria ROUCAUTE, Pierre PÉGUIN, Claude CANARD, Patrick ROSENTHAL, Philippe ANDRIEUX, Bernard HAMON, Jean-Pierre JAUBERT, Michel AUBERT.

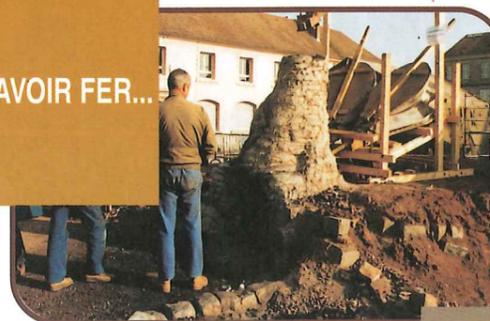
Cet ouvrage a été réalisé avec le soutien de la Délégation CNRS Nord-Est dans le cadre de l'opération *Passion Recherche*. Celle-ci organise la rencontre et le dialogue entre les jeunes, les chercheurs et les enseignants afin de faire pénétrer la science dans la culture et de mettre en évidence son utilité sociale (CNRS délégation Nord-Est - Tél : 03. 83. 85. 60. 38).

CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Unité Propre de Recherche A0423 CNRS
Paléoméallurgie du Fer et Cuitures.
Université de Technologie de Belfort,
Montbéliard - Tél : 03. 84. 58. 30. 29
90010 BELFORT Cedex



37

LE SAVOIR FER...



37

...OU COMMENT
FABRIQUER
DU FER
AUJOURD'HUI



45

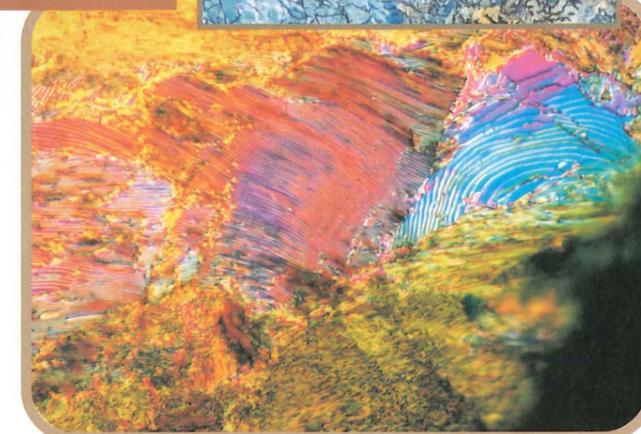
UN LABORATOIRE DE
PALÉOMÉTALLURGIE



Photographies :

Hélène MORIN-HAMON : p. 11 (en haut à gauche et au milieu), 37 (en haut), 41 (en haut et en bas à droite), 42 - GIRAUDON /Paris : p. 2/3, 16 (en haut) ;/Bridgeman : p. 29 (à droite) - Muséum national d'histoire naturelle - Paris/Patrick Lafalte : p. 4 (en bas) - Serge STEIN : p. 5 (en haut à gauche et au milieu) - Sinclair STAMMERS/S.PL/COSMOS : p. 5 (en bas à droite) - Laboratoire d'Archéologie des métaux-Nancy/Paul MERLUZZO : p. 6 (en bas) - Alain ROUSSOT : p. 17 - Kharbine-Tapabor : p. 18 (en haut) - Roger VIOLLET : p. 13 (en haut à droite et au milieu) 31, 36 (au milieu) - Ecomusée de la Communauté urbaine Le Creusot-Montceau : p. 32 (en haut à droite et en bas à gauche), 36 à gauche et à droite) - L'illustration/Sigma : p. 33 - Encyclopédie de Diderot et d'Alembert : p. 11 (en haut à droite), 12 (en bas), 20 (en haut et en bas à droite), 24, 25 (en haut à droite), 26 (en bas), 27, 28 - Michel COTTET : p. 37 (en bas), 40 (en bas), 41 (à gauche), 44 (en bas au milieu) - Denis MORIN : p. 4 (en haut), 7, 9 (au milieu et en bas), 11 (en bas à gauche), 12 (en haut), 16 (en bas), 19 (en bas), 22, 23 (à droite), 25, 32 (en haut), 34, 35 (en haut), 38, 39, 40 (à gauche), 43, 44, 45, 46 - Philippe FLUZIN : p. 13 (en bas), 15, 18 (en bas), 19 (en haut), 20 (en bas à gauche), 21 (à gauche), 29 (en bas), 30 (à droite), 46 (en bas à droite), 47, 48 - Bibliothèque de l'Institut, Paris : p. 21 (à droite) - Gérard SALAGNON : p. 35 (en bas) - DR : p. 16 (à droite), 21 (à droite), 30 (en haut à gauche et en bas).

Recherche iconographique : Christiane FRANCHETTI. Dessins : Bernard NICOLAS : p. 8, 10 (en bas), 12 (en haut à gauche), 14 (à droite), 15 (en bas), 23 (à gauche), 26 (à droite) - Croquis : Philippe FLUZIN : p. 14, 23, 26, 29 ; Patrick ROSENTHAL : p. 6 ; Denis MORIN : p. 8 (en bas), 9, 16 - Cartographie : Marie SIANO (p. 17, 18). Maquette : Marie SIANO (p. 2 à 36), Anifa SAUVADET (p. 37 à 48). Correctrices : Elisabeth ANFOSSO, Sophie GERBAUDO, Anifa SAUVADET.



LA MÉTALLURGIE ANCIENNE : FER, FONTE, ACIER

LE FER DANS TOUS SES ÉTATS

Le fer est le métal le plus couramment employé en raison de ses propriétés mécaniques remarquables (en particulier lorsqu'il est associé au carbone pour donner de l'acier), de l'abondance de ses minerais et de la facilité relative de leur extraction.

Il joue un rôle considérable dans les industries les plus diverses.

L'emploi de plus en plus répandu d'autres métaux, et en particulier de l'aluminium, la découverte des matériaux synthétiques ou composites comme les matières plastiques ne diminuent en rien l'importance de ce métal.

Depuis le début du siècle les aciers ont fait des progrès remarquables ; les aciers inoxydables par exemple ont permis le développement de la grande industrie chimique moderne.

Dans l'étude de l'origine des civilisations, du développement de l'esprit humain, de l'histoire des sciences, le fer joue un rôle particulièrement important : ces questions donnent lieu actuellement à de nombreux travaux se rapportant à l'archéologie et à l'ethnologie.

Détail d'un tableau de Henri Blès
(vers 1490-1550).
Il transcrit fidèlement la réalité
métallurgique de son temps.

La métallurgie est l'art d'extraire les métaux de leurs minerais, de les transformer en produits semi-finis et de les mettre en forme pour leur utilisation (produits finis).

La sidérurgie (du grec *sidéros*, « fer ») est la métallurgie du fer.



Les minerais de fer	4
Les minéraux riches en fer	5
Origine des minerais de fer	6
Extraction et préparation des minerais jusqu'au XIX^e siècle	8
La mine	8
La préparation mécanique des minerais	10
La préparation thermique des minerais	12
Bois et charbon de bois : des combustibles indispensables	13
Procédé ancien : le bas fourneau	14
Le bas fourneau	14
La réduction directe	14
L'épuration ou cinglage	15
Le forgeage	16
Premiers objets en fer	17
Le bas fourneau en Afrique aujourd'hui	18
La méthode catalane	19
Procédé moderne : le haut fourneau	20
Les premiers hauts fourneaux	20
La marche du haut fourneau	22
La réduction indirecte	23
La fonte liquide	24
De la fonte à l'acier et au fer : l'affinage	26
Fer, fonte, acier : résumons-nous	27
Le cinglage	28
La fenderie	28
La force hydraulique	30
La vie de la forge	31
Les ouvriers de la forge	31
La forge aux XVIII ^e - XIX ^e siècles	32
Que fabriquait-on à la forge ?	34
La métallurgie moderne	35
Le fer en France et dans le monde	36



Les minerais de fer

Le fer associé au carbone (acier) est un métal qui subit une corrosion importante dans l'air : il rouille. Il retourne ainsi à l'état de minerai.

Son abondance naturelle le place au quatrième rang dans l'ensemble des éléments constituant la croûte terrestre, après l'oxygène, le silicium et l'aluminium. Le fer se présente sous différentes formes, plus généralement associé à l'oxygène (oxydes) :

- le **fer natif** : fer à l'état pur qui existe dans la nature, mais il est extrêmement rare ;
- le **fer météorique** : fer présent dans toutes les météorites mais en proportion très variable. Les météorites nous apportent la preuve de l'existence du fer en dehors de la Terre ;
- les **eaux ferrugineuses** : le fer se rencontre dans la plupart des eaux minérales. Il existe également dans l'eau de mer et le sang.

Le fer est très disséminé dans les roches naturelles. Les grès, les schistes et les argiles en contiennent parfois une proportion assez élevée.



Source ferrugineuse sur la paroi d'une galerie de mine.

Les minerais de fer sont répandus à profusion et sur de grandes étendues à la surface de la terre. La plupart se rencontrent dans presque toutes les formations géologiques, en filons*, en amas, en couches ou strates.

On les désigne sous le nom de minerai en filon, minerai oolithique ou minerai d'altération suivant la nature de leur gisement. Les gisements de fer, ou gîtes de fer, comme les autres gîtes minéraux, résultent d'une concentration supérieure à la normale d'un ou de plusieurs éléments dans la croûte terrestre ou à sa surface.

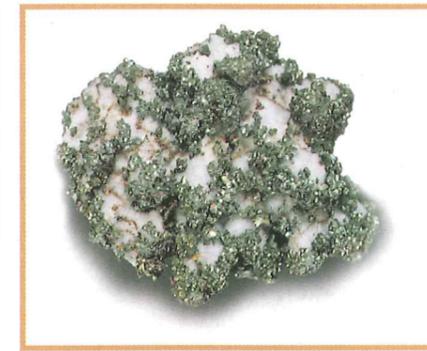
* **Filon** : couche de minerais de fer limitée en longueur et en largeur et se prolongeant en profondeur.



Fragment de la météorite Allende, tombée au Mexique en février 1969. Muséum national d'histoire naturelle, Paris.



Pyrite



Marcassite



Hématite



Goëthite



Limonite en pisolithes agglomérées



Limonite en pisolithes dissociées

Les minéraux riches en fer

Le fer entre dans la composition chimique d'un grand nombre de minéraux. Quelques-uns sont des constituants importants des minerais de fer. Les principaux minéraux riches en fer connus appartiennent à plusieurs familles :

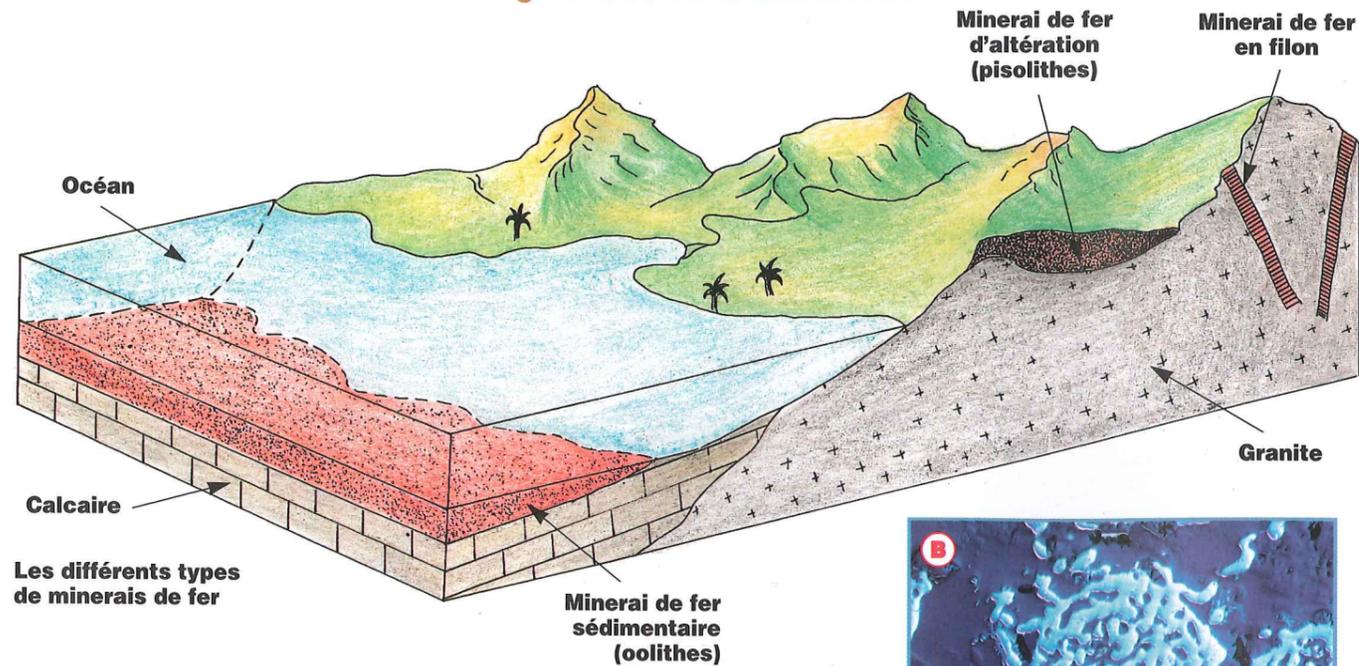
- les **sulfures** : pyrite, marcassite, pyrrhotite ;
- les **oxydes** : le fer possède trois oxydes, hématite, magnétite et wustite ; ce dernier n'existe qu'au-dessus de 570 °C ;
- les **hydroxydes** : goëthite, limonite.

Ces minéraux n'ont pas toujours une fréquence ou une concentration suffisantes pour former des minerais assez riches pour être exploités.



Magnétite

Origine des minerais de fer



Les différents types de minerais de fer

La concentration en minerai de fer peut se produire à différentes étapes du cycle géochimique. Elle peut être liée à des phénomènes relevant des modifications de la croûte terrestre :

- soit provoqués par la géodynamique interne (phénomènes volcaniques, surrection des montagnes). C'est le cas des gîtes en filon et en amas ;
- soit provoqués par la géodynamique externe (phénomènes découlant de l'érosion). C'est le cas des gîtes sédimentaires marins ou des gîtes d'altération et de remaniement.

Minette de Lorraine : vue microscopique des oolithes avant transformation dans le bas fourneau (A), et après transformation en métal (réduction, voir p. 14) (B).



Les principaux minerais extraits

Minerais de fer en filon et en amas

Lors de la formation des chaînes de montagnes, la mise en place de minéralisations de fer a été accompagnée ou suivie par un ensemble de phénomènes volcaniques. Ils sont à l'origine des minéralisations riches en fer que l'on peut rencontrer dans les Vosges ou le Massif central, sous forme de filons ou d'amas.



Coupe dans une carrière d'un gouffre rempli de sédiments ferrugineux

Minerais de fer sédimentaire

• Le minerai oolithique

Ce minerai s'est formé dans le fond des mers il y a plusieurs millions d'années, à partir des oxydes de fer provenant du lessivage des sols ferrugineux des zones émergées. Il renferme des oolithes ovoïdes : sphères millimétriques dont le noyau, formé d'un fragment de quartz, de calcite ou de petite coquille animale, est recouvert de pellicules concentriques de calcite ou d'hydroxyde de fer.

• Les minerais d'altération

Concentration du fer dans les sols

Sous un climat tropical, la partie supérieure du sol peut se dégrader pour former des latérites, sols riches en oxydes de fer. Il se développe alors une croûte, voire une cuirasse ferrugineuse épaisse de quelques centimètres à quelques mètres. De nos jours, en Afrique, on peut constater la formation de sols ferrugineux : les sols latéritiques ou « chapeaux de fer ».

Pendant la plus grande partie de l'ère tertiaire, l'Europe a subi des climats comparables à ceux qui règnent actuellement dans la zone intertropicale. Les terres émergées ont pu à plusieurs reprises se couvrir d'altérites. C'est l'origine de certains gisements de minerais de fer.

Lorsque les matériaux de ces sols sont soumis à l'érosion, ils sont transportés et se redéposent dans des cavités naturelles ou s'étalent en surface.

A partir de ces phénomènes, différents types de gîtes peuvent se développer selon la part que prend le transport et les conditions de milieu dans lesquelles les oxydes de fer s'accumulent.



Bloc de limonite en pisolithes agglomérées dans du sable provenant d'un gouffre. Les pisolithes sont des concrétions sphériques de diamètre supérieur à 2 mm, constituées de couches concentriques d'oxydes de fer.

Extraction et préparation des minerais jusqu'au XIX^e siècle

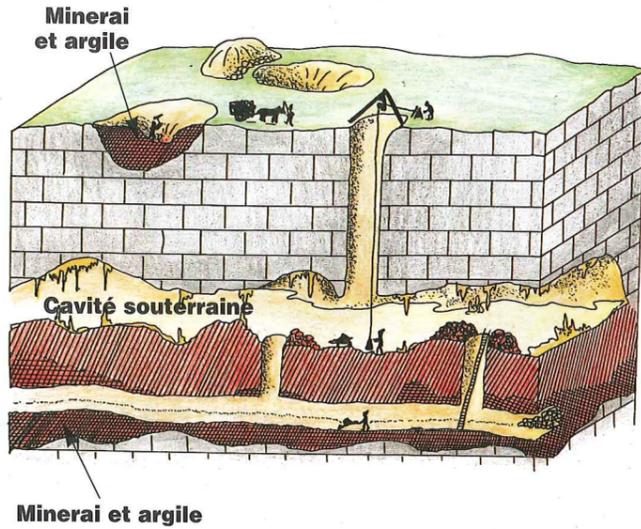
La mine

L'activité métallurgique s'est concentrée autour des abbayes au Moyen Âge.

Plusieurs catégories de minerai de fer ont été exploitées : les minerais de fer d'altération ou en grains ; les minerais de fer oolithique ou en roche ; les minerais de fer en filon.

- Les minerais de fer d'altération ont donné lieu à d'innombrables exploitations par minières, puits et galeries. Les minières sont de simples fosses creusées à la surface.

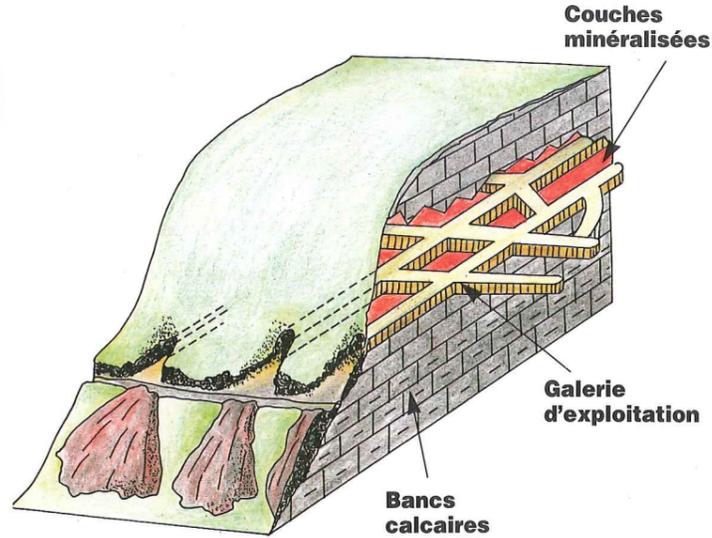
Dans les galeries, le transport s'effectuait à l'aide de traîneaux ou de brouettes tirés sur des planches grossièrement façonnées et posées à même le sol. Des passages bas reliaient les chantiers.



Mine de fer d'altération dans une cavité souterraine et dans des cuvettes (minières).

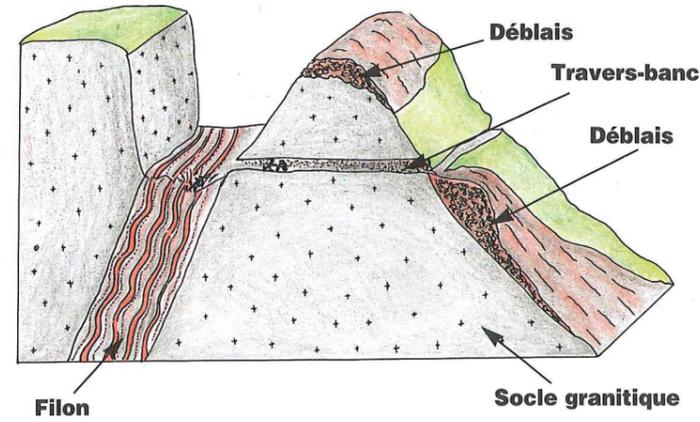


- Les minerais oolithiques datant du jurassique (180 millions d'années) ont été exploités à l'affleurement, par carrière à ciel ouvert, puis par travaux souterrains étendus et complexes.



Mine de fer en roche : exploitation par galeries dans la couche minéralisée.

- Les minerais en filon ont été exploités à l'affleurement, par carrière à ciel ouvert puis en souterrain, par enlèvement complet du gîte en profondeur : le défilage.



Mine de fer en filon
Exploitation au XIX^e siècle

Le soutènement des galeries

Pour assurer la sécurité dans la mine, les galeries et les puits devaient être consolidés par des étaçons et des planches. C'est le **boisage**.



L'outillage des mineurs

Aussi longtemps que la roche restait friable, l'abatage s'effectuait à la pointerolle, au pic ou au coin. Pics et hoes étaient utilisés dans les mines et minières de fer en grains. Les nombreuses traces observables sur les parois et au plafond des galeries montrent une utilisation constante de ces deux outils.



Abattage du minerai à l'aide d'un marteau et d'une pointerolle



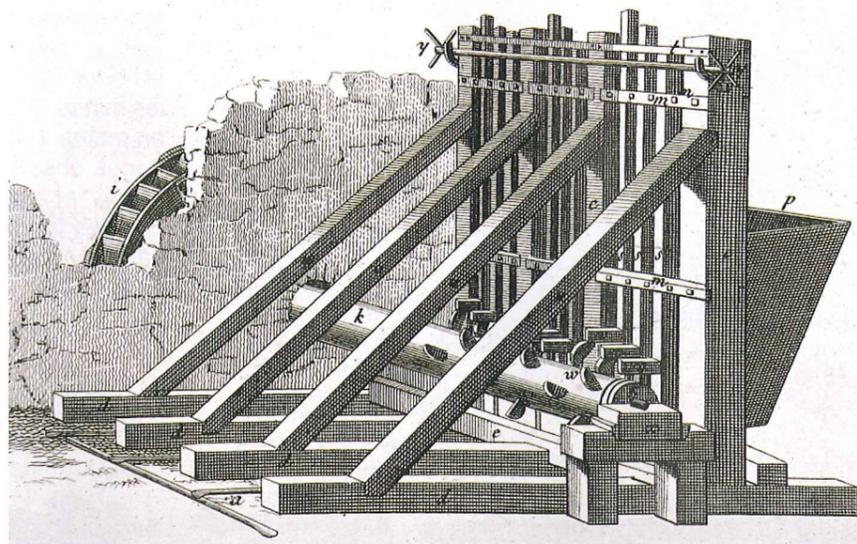
Les coins en bois et en fer ont été utilisés avec la masse dans toutes les mines de fer. Le coin servait à éclater les blocs volumineux au front de taille ou abattus au sol.

Lorsque la roche était très dure (minerai en filon), les mineurs utilisaient la technique du feu. Un bûcher était allumé au pied du front de taille ; la chaleur ainsi dégagée dilatait et fragilisait la roche.

L'utilisation de la poudre est attestée dans les mines dès 1617 dans le district de Château-Lambert (Haute-Saône), dans les Vosges. Les trous de mines étaient percés à coup de fleuret ou barre à mine. Il s'agissait d'une tige de métal dont l'extrémité était munie d'un taillant simple à une arête (taillant ciseau). La charge de poudre, introduite dans le trou ménagé par la barre à mine, était estimée par le mineur suivant le coup à effectuer. La poudre était allumée au moyen d'un morceau d'amadou.

La préparation mécanique des minerais

Avant de pouvoir être transformé en métal, le minerai de fer doit subir une série de traitements mécaniques et thermiques.



Bocard d'après Monnet

Le bocard est une innovation technique mise au point au début du XVI^e siècle en Europe et largement utilisée dans l'industrie métallurgique.

Le bocard était constitué de poutres verticales dont l'extrémité en fonte retombait lourdement sur le minerai à concasser. Ces poutres étaient actionnées à tour de rôle par une came mue par une roue hydraulique.

Une préparation nécessaire

Le minerai extrait du sol est mélangé à de l'argile et de la roche plus ou moins dure dont il convient de le débarrasser. A chaque type de minerai correspond un savoir-faire et des techniques spécifiques.

Dans l'est de la France, l'utilisation du minerai de fer d'altération ou minerai en grains a provoqué l'établissement et le développement de nombreux ateliers de préparation mécanique le long des cours d'eau.

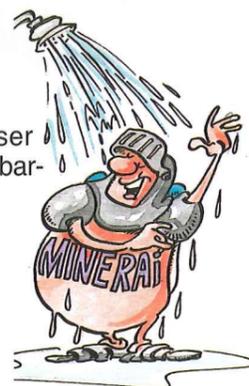
Le triage et le broyage

Le minerai, une fois trié, c'est-à-dire séparé des blocs de roches stériles, était broyé à la main avec un broyon en roche dure ou dans un bocard.



Le lavage ou débourbage

Le lavage consistait à faire passer un courant d'eau assez fort pour débarrasser le minerai de la terre.



Bac de lavage d'un lavoir à minerai encore visible dans une forêt de Franche-Comté



Lavoirs à minerai appelés aussi lavoirs à bras

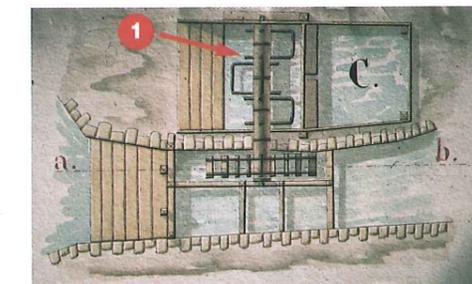
Les premiers lavoirs à bras étaient rudimentaires. Un courant d'eau circulait dans des caisses en bois peu profondes. Le minerai, placé au centre des bacs, était remué avec de longues raclettes à manche, ou râbles, pour le débourber.

Importance de l'eau et innovations techniques

Étroitement liée à l'eau, la préparation mécanique des minerais a entraîné des innovations techniques : les moulins à minerai, les bocards puis les patouillets ont révolutionné l'art de l'utilisation de l'énergie hydraulique.



Martinet, marteaux mus par la force hydraulique, dans une forge au XVI^e siècle. (Schwarzer Bergbuch, Munich.)



Aux XVII^e et XVIII^e siècles, le patouillet était un mécanisme mû par une roue hydraulique ou un manège à chevaux et qui servait à laver le minerai. Il se composait de une (1) ou deux huches en bois séparées par une cloison (Archives départementales de Haute-Saône).

Mécanismes, machines et organisation rationnelle du travail fait par des équipes spécialisées composent déjà le paysage des carreaux* miniers bien avant la révolution industrielle.

* Carreau de mine : emplacement où sont déposés les produits extraits.

La préparation thermique des minerais



Le grillage

Le grillage consiste à chauffer le minerai au contact de l'air, soit à l'air libre, soit dans un four oxydant. Pendant cette opération, le minerai perd ses éléments volatils que sont le soufre, l'arsenic, l'eau. Il devient plus poreux, plus perméable aux gaz qui doivent effectuer la réduction (voir p. 14).

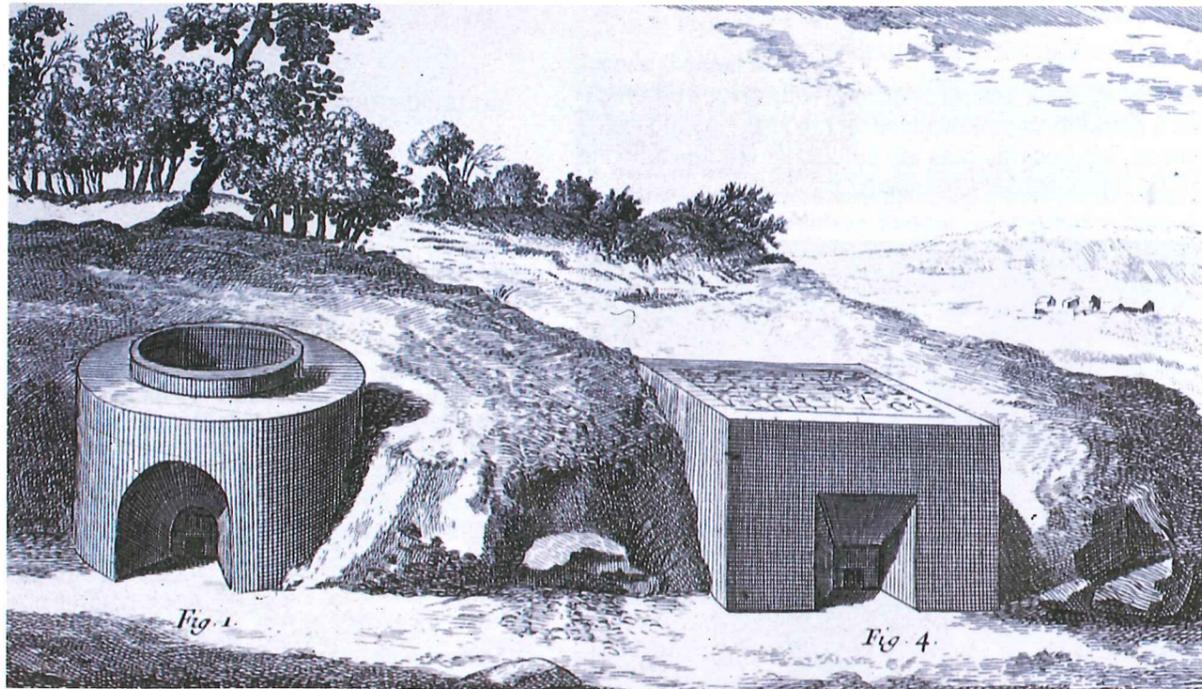


Four de grillage, Alpes italiennes.

Quand les atomes d'oxygène s'accrochent aux atomes de fer, on dit que le fer s'oxyde. L'air contenant de l'oxygène est un milieu oxydant.

Quand les atomes d'oxygène quittent les atomes de fer, c'est la réduction.

Four de grillage



Bois et charbon de bois : des combustibles indispensables

Le combustible utilisé dans l'industrie métallurgique était fabriqué à partir du bois : c'est le **charbon de bois** capable de donner une forte chaleur, de fournir le carbone pour réduire les oxydes de fer et de s'allier au fer pour donner de l'acier.

Les charbonniers construisaient des meules, empilements de bois recouverts de terre auxquels on mettait le feu. Une partie du bois se consumait mais l'essentiel se transformait, au bout de quelques jours, en charbon de bois. La façon de disposer les meules, leur composition, leur architecture constituaient un savoir-faire transmis de génération en génération.



Charbonniers au travail

Les innombrables vestiges du travail des charbonniers qui parsèment encore les forêts témoignent de l'importance de cette activité.

Grande utilisatrice de bois, l'industrie métallurgique est responsable pour une grande part de la disparition des forêts. La pénurie de bois a favorisé la recherche d'une autre énergie, la **houille ou charbon de terre**, dont l'exploitation s'est développée dès le XII^e siècle dans certaines régions et surtout au début du XVIII^e siècle.



Meule terminée

Mais le charbon de bois est resté la principale source d'énergie des bas fourneaux puis celle des hauts fourneaux jusque dans les années 1830, époque à partir de laquelle on emploie massivement la houille.

L'usage du charbon de terre et du **coke*** ne s'introduisit que lentement, d'abord mélangé au charbon de bois, puis à l'état pur dans les années 1800. C'est en Grande-Bretagne que cet emploi se généralisa en premier, dès le XVIII^e siècle, compte tenu de la destruction presque totale des forêts et grâce à l'invention du coke par l'Anglais Abraham Darby en 1709.



Bas foyer expérimental : orifice supérieur du four après chargement : le charbon de bois est mélangé au minerai de fer concassé.

* Le coke résulte de la transformation de la houille par distillation.

Procédé ancien : le bas fourneau

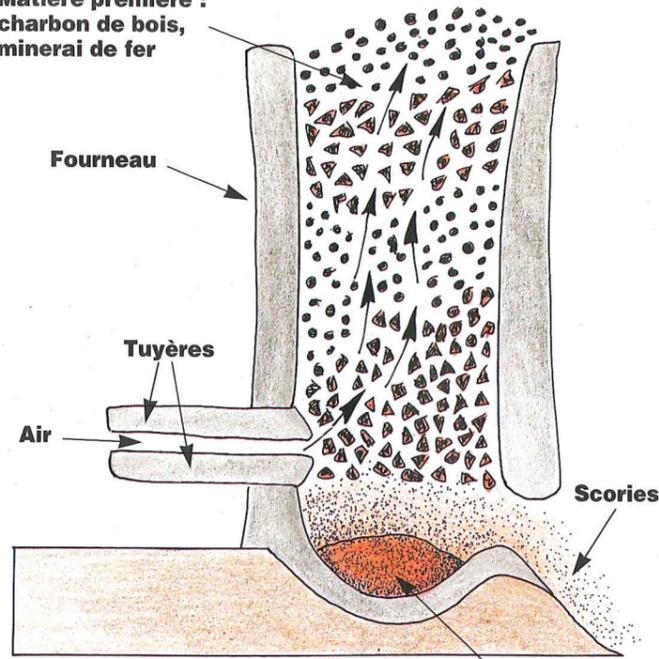
Pour se transformer en métal, le minerai doit subir ce que l'on appelle une **réduction**. On a utilisé pendant longtemps la technologie du bas fourneau pour y parvenir.

Le bas fourneau

Le modèle le plus primitif est une simple fosse creusée dans le sol dans laquelle étaient placées en alternance des couches de minerai et de charbon de bois. Un système de ventilation naturelle ou actionné par des soufflets prolongés par des tuyères en terre cuite était disposé autour de cette structure.

Puis les modèles se sont perfectionnés, avec des fours bâtis hors sol en argile et en briques.

Matière première :
charbon de bois,
minerai de fer



Réduction du minerai de fer dans le bas fourneau

Éponge de fer appelée loupe

La réduction directe

Il s'agit de casser la liaison, dans le minerai de fer, entre atomes de fer et atomes d'oxygène pour supprimer cet oxygène.

La réduction directe est la réduction du minerai de fer qui produit directement du fer doux ou légèrement carburé, c'est-à-dire combiné avec du carbone : c'est l'acier.

Pour effectuer cette réaction, on mélange dans le bas fourneau minerai de fer concassé et charbon de bois et on y met le feu. La forte température obtenue, de l'ordre de 1350 °C, permet aux atomes d'oxygène du fer de se fixer sur les atomes de carbone du charbon de bois. Le minerai perd presque la totalité de son oxygène. On dit que le minerai est réduit. Une partie des atomes de carbone s'est aussi fixée sur le fer pour donner de l'acier.



Fourneau expérimental



Coulée de scories dans un bas fourneau expérimental

Coulée de scories après refroidissement



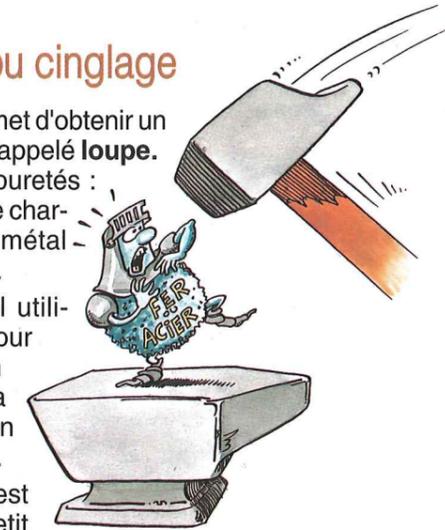
Épuration d'une loupe (expérimentation)

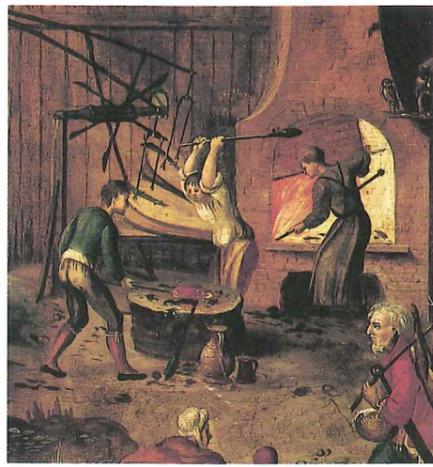
L'épuration ou cinglage

Le bas fourneau permet d'obtenir un bloc d'éponge de fer appelé **loupe**. Elle contient des impuretés : scories, fragments de charbon de bois... et le métal n'est pas homogène.

Pour avoir du métal utilisable, par exemple pour la fabrication d'un outil, il faut épurer la loupe. Cette opération s'appelle le cinglage.

Pour cela, la loupe est chauffée dans un petit foyer. En la martelant ensuite sur une enclume, on chasse les déchets et le métal se rassemble.





Détail d'un tableau de Henri Blès : forgeron au travail, feu de forge et soufflets à l'arrière plan.

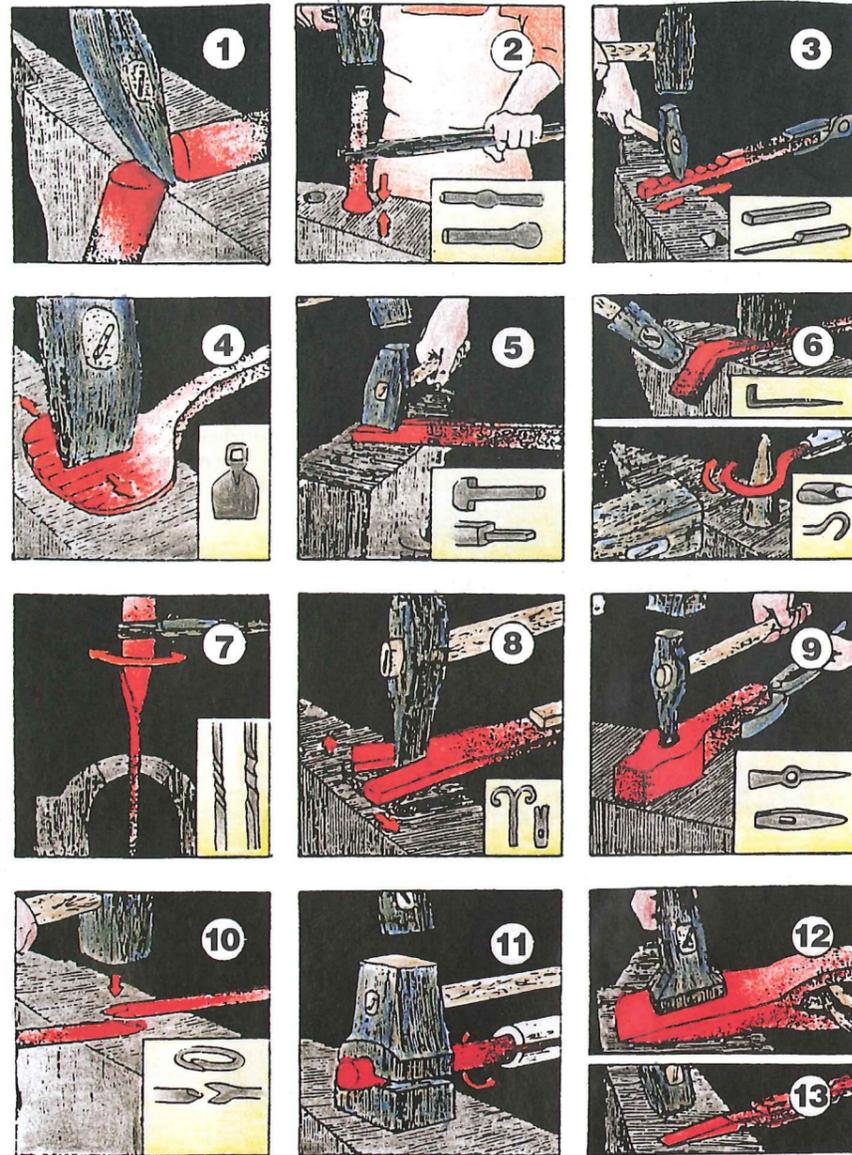
Le forgeage

Le morceau de fer ou lingot obtenu par réduction est transformé en objets à la forge.

L'artisan se sert d'une enclume sur laquelle le métal est battu et travaillé à chaud. Le forgeron utilise des tenailles de différentes formes pour manipuler le métal.

Les procédés de mise en forme varient suivant la pièce à fabriquer.

Enclume de forge, XVI^e-XVII^e siècle (L : 0,80 m environ).



Les différentes opérations de forgeage (d'après Pleiner, 1962) :

1. Sectionner. 2. Refouler. 3. Étirer en longueur.
4. Étirer en largeur. 5. Épauler. 6. Couder et courber.
7. Tordre. 8. Fendre. 9. Perforer. 10. Souder à chaud.
11. Étamper. 12. Amincir. 13. Affûter.

Les battitures

Lorsque le forgeron frappe le métal chaud, il se détache des petites lamelles d'oxyde de fer que l'on appelle battitures.

Premiers objets en fer

On ne peut attribuer à un peuple particulier le mérite d'avoir, le premier, fabriqué du fer. On rencontre en effet des traces irréfutables de cette industrie dans des contrées très éloignées les unes des autres, habitées par des peuples paraissant ne jamais avoir été en relation (Asie, Afrique).

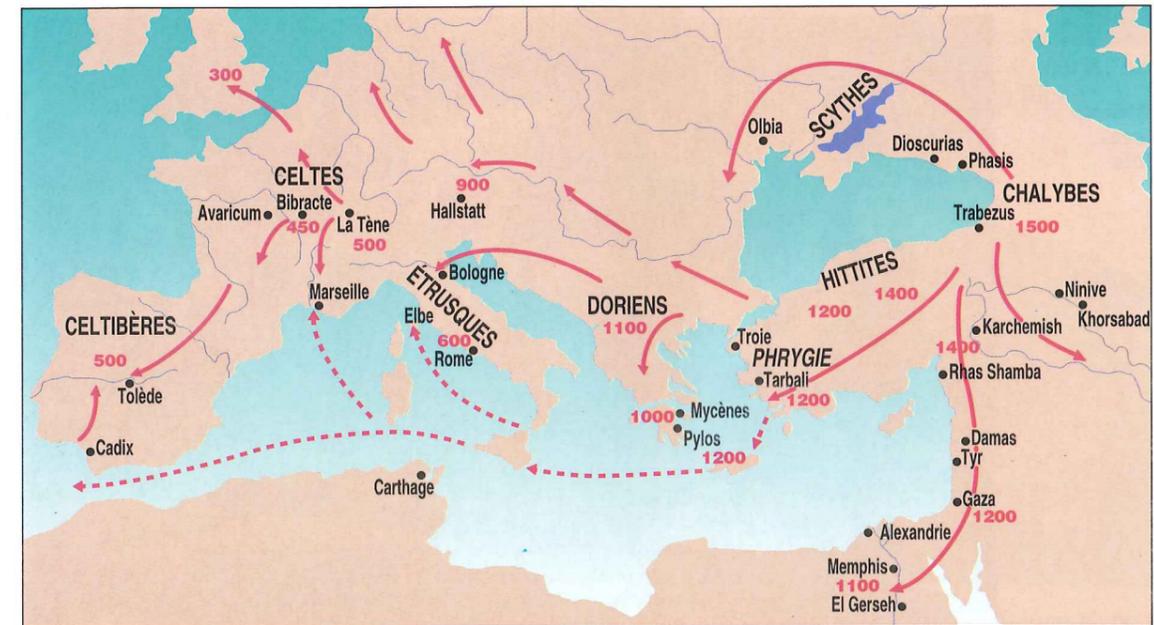
Dans la plupart des pays, l'élaboration du fer remonte à la protohistoire. On admettait autrefois qu'un âge de bronze avait partout précédé la découverte du fer. Il paraît aujourd'hui démontré que, dans des contrées où se contraient soit du fer météorique, soit un minerai de fer facile à traiter, ce métal a été connu avant le bronze, et même avant le cuivre.

Les premières traces d'objets en fer ont été trouvées à Sumer, capitale de la plus ancienne civilisation babylonienne, au nord du golfe Persique, ainsi que dans des tombes égyptiennes datant du XVIII^e siècle avant notre ère. Il semble que ces objets proviennent de l'utilisation de météorites contenant du fer très pur, ainsi que du nickel. On ne peut parler encore d'élaboration, puisqu'il s'agit de l'utilisation directe de produits, par ailleurs rares.

Les premières ébauches d'une véritable métallurgie du fer peuvent être situées chez les Chalybes, peuplade vivant sur la côte méridionale de la mer Noire, aux environs de 1500 avant notre ère. On y a retrouvé, en effet, des vestiges de fourneaux ainsi que des instruments destinés à l'agriculture. C'est le fer qui a donné aux Hittites la puissance qui leur a permis de dominer l'Asie Mineure. La métallurgie du fer apparut aux environs de 1100 - 1000 av. J.-C. en Egypte et en Grèce, puis en Europe occidentale à partir de 900 av. J.-C.



Poignard en fer dont la poignée en bronze représente un corps humain. Époque de la Tène (460 à 52 av. J.-C.).



Diffusion de la métallurgie du fer, depuis son apparition au Moyen-Orient jusqu'en Europe occidentale

Le bas fourneau en Afrique aujourd'hui

En Afrique noire, certaines ethnies possèdent encore le savoir-faire ancestral. Les forgerons fabriquent le métal selon des principes vieux de plus de trois mille ans.

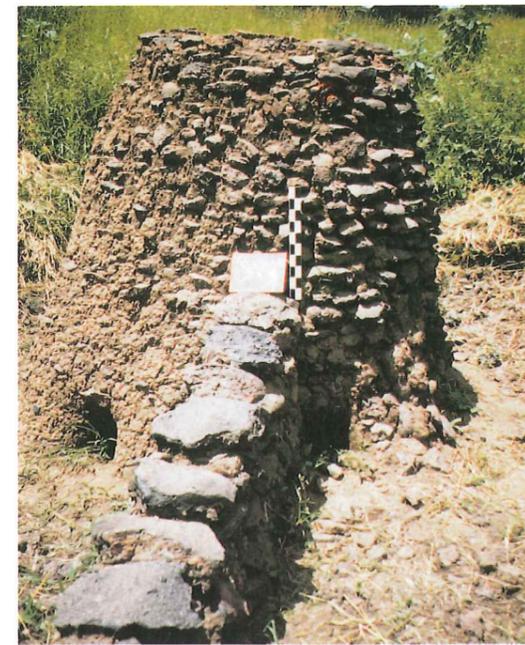
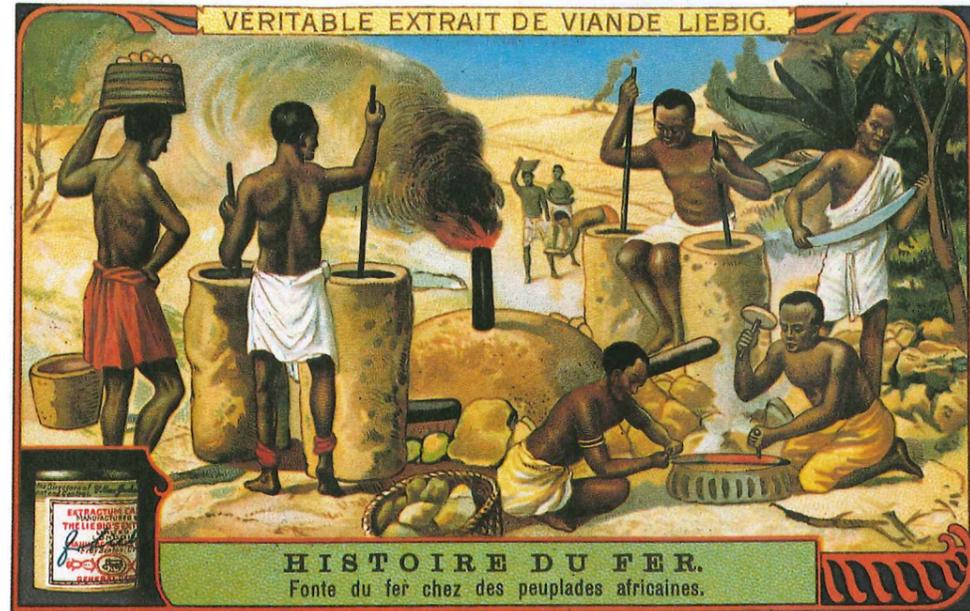
Quand on mesure les difficultés qu'ont les archéologues pour interpréter les vestiges archéologiques d'un bas fourneau, on comprend l'intérêt de voyager à travers la brousse pour y découvrir une partie de notre passé encore vivant.



Le Burkina Faso est un petit pays d'Afrique où l'on fabrique encore le fer comme autrefois

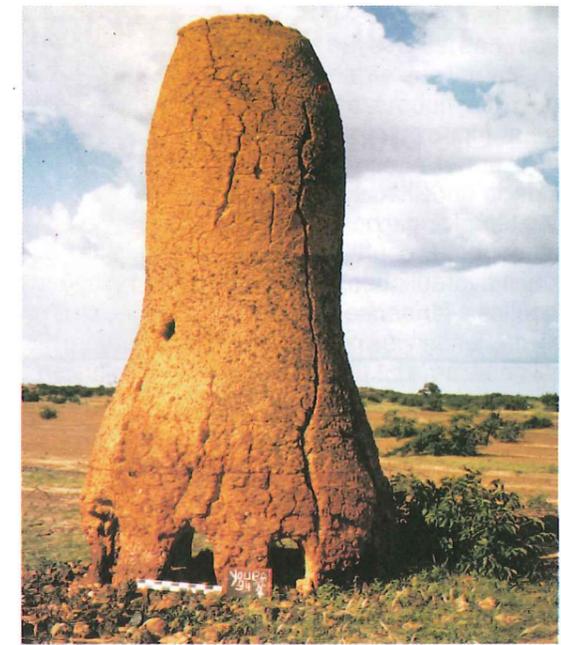
Ce que les vestiges archéologiques ne peuvent nous dire, les forgerons africains nous l'expliquent.

Loupe de fer obtenue par un forgeron africain au Burkina Faso



Bas fourneau au Burkina Faso aujourd'hui

Bas fourneau à ventilation naturelle



La méthode catalane : une variante du bas fourneau

Ce nom lui vient de la Catalogne, partie du versant méridional des Pyrénées où l'abondance du bois et de minerais riches en fer a permis l'installation d'une industrie

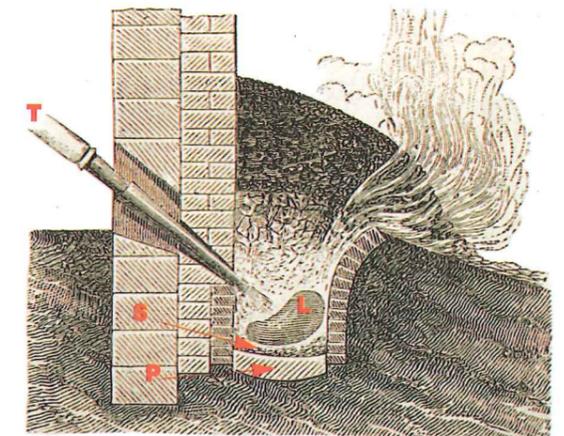
importante. Cette méthode, qui se développa de la fin du XVII^e siècle jusqu'au XIX^e siècle, se retrouve dans les vallées méridionales des Alpes.

Dans un trou de forme variable, généralement carré, à angles arrondis, dont les parois sont formées de pierres ou de briques réfractaires et qui porte le nom de creuset, se fait le travail de la réduction du minerai. En P, au fond, est un mélange d'argile et de poussier de charbon de bois destiné à protéger le sol contre la corrosion des scories produites.

En T pénètre un tube de fer par lequel on introduit le vent.

Le minerai est entassé sur le devant du creuset, les plus gros morceaux au fond et les plus fins à la surface. Le creuset préalablement rempli de charbon de bois est chauffé par le vent de la tuyère. Les gaz produits par cette combustion agissent sur le minerai et en préparent la réduction. En marche courante, le charbon de bois occupe le côté de la tuyère et, comme l'indique le dessin, le minerai reste sur le devant. Au fur et à mesure que la réduction se fait, les morceaux de minerai entrent en fusion, le fer se combine au carbone pour passer à l'état d'acier.

Le fer, spongieux, se rassemble en une sorte de boule ou loupe L, en contact avec un bain de scories S.



Coupe d'une forge catalane

Procédé moderne : le haut fourneau

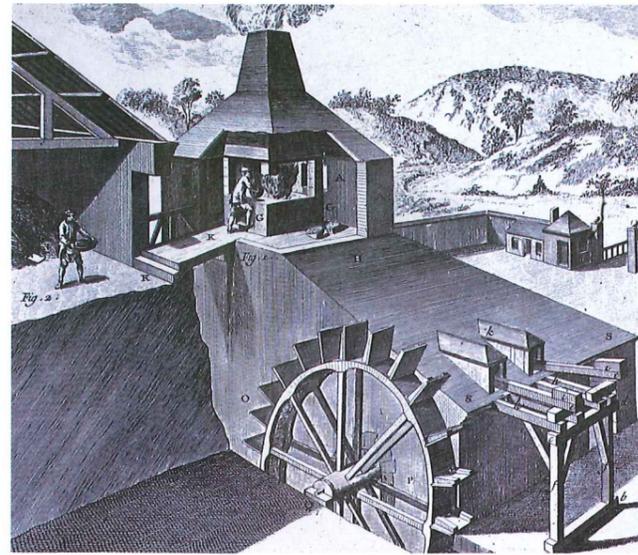
Les premiers hauts fourneaux

A partir du XIII^e siècle apparaît dans le nord de l'Europe une technologie nouvelle. On utilise la force de l'eau pour actionner les soufflets et divers mécanismes à l'aide des roues hydrauliques, déjà largement employées dans les moulins à farine. Les soufflets, plus gros, plus puissants, permettent un feu continu et une température plus élevée qui dépasse les 1 600 °C, température de fusion du métal.

Ce simple perfectionnement donne en fait un produit nouveau : la **fonte**. Le métal obtenu n'est plus une loupe pâteuse, mais un produit liquide qui s'écoule à la base du four. En refroidissant, il devient gris et cassant, se moule facilement. Il est plus économique car il donne moins de résidus.

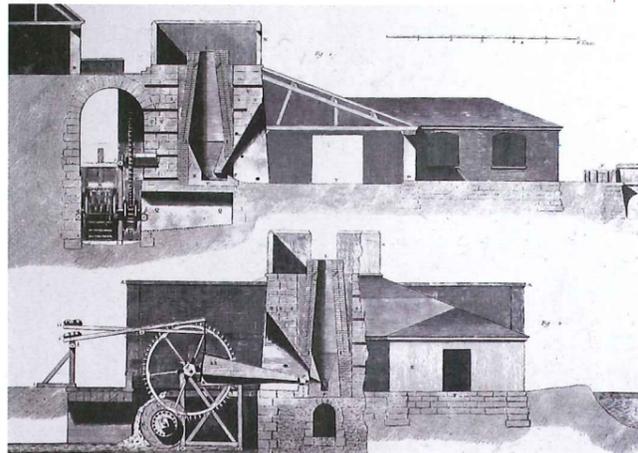
On peut en obtenir davantage en agrandissant le four : celui-ci devient une tour maçonnée qui est réutilisée, au lieu d'être totalement ou partiellement détruite comme dans la technique du bas fourneau. Il est nécessaire d'y entretenir un feu en permanence, pour éviter le refroidissement des matériaux qui rendrait l'installation inutilisable.

L'un des tout premiers hauts fourneaux. New Lapphyttan, fin du XII^e siècle, Suède, (reconstitution).



Vue générale d'un haut fourneau au XVIII^e siècle
Au sommet de la tour, les ouvriers chargent la cuve avec des paniers remplis de charbon de bois et de minerai. Au premier plan, la roue hydraulique actionne les soufflets.

Coupe d'un haut fourneau montrant la cuve et le système de soufflerie à contrepoids

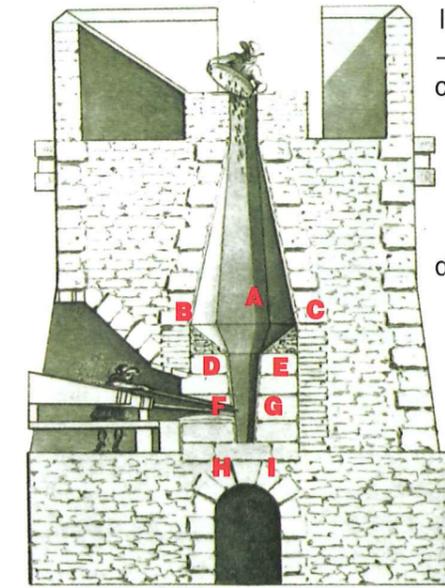
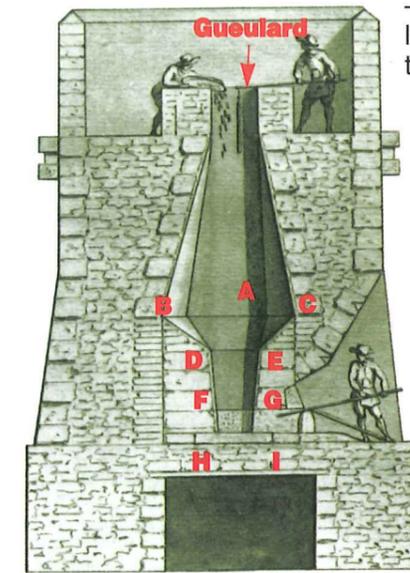
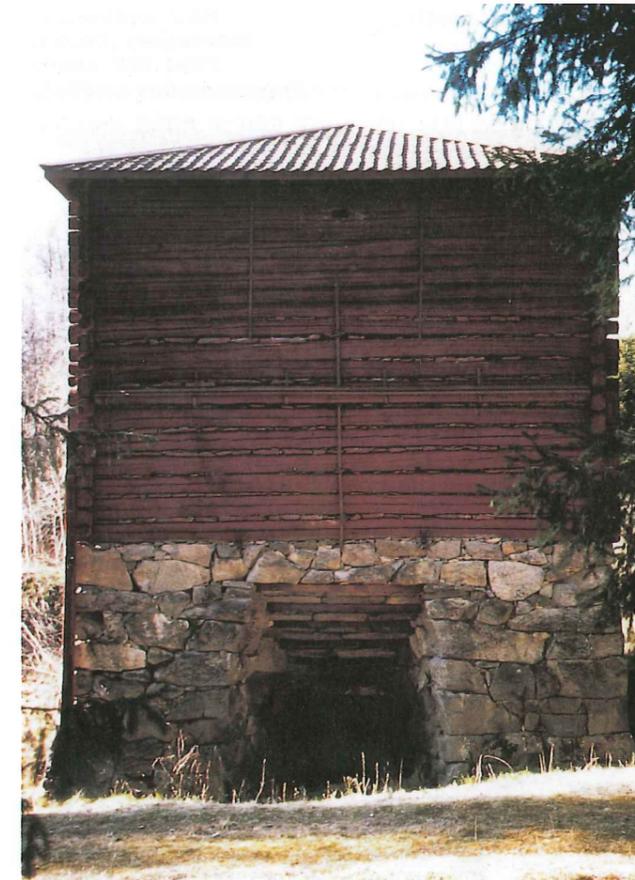


Le haut fourneau aux XVIII^e et XIX^e siècles

C'est une tour carrée, trapue, en maçonnerie, d'une dizaine de mètres de hauteur, comportant un vide intérieur revêtu de brique réfractaire*. Ce four à cuve profonde en forme de deux troncs de cône, accolés par leur grande base, se compose des parties suivantes :

– l'ouverture supérieure, ordinairement circulaire, s'appelle le **gueulard**. C'est par là que l'on introduit le minerai et le combustible ;

Haut fourneau, Suède, XVIII^e siècle.



– la partie **A** est appelée la **cuve**. C'est dans cette partie que l'oxyde de fer est réduit par l'oxyde de carbone, aussi a-t-elle la forme d'un tronc de cône dont la base est dirigée vers le bas, afin que la colonne gazeuse ascendante soit resserrée et que le contact entre le minerai et les gaz soit plus intime ;

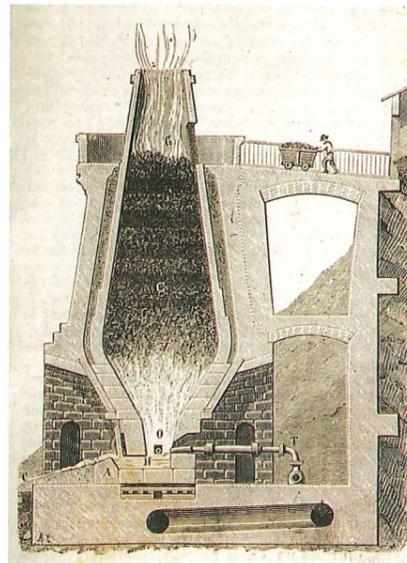
– **B-C** constitue le ventre du fourneau. On appelle l'espace **BCDE** les **éta-lages**, partie évasée où commence la carburation du fer par le charbon ;

– la partie **DEFG** constitue l'ouvrage. La température y est la plus élevée ; le fer et les scories y fondent complètement et se rendent à l'état fluide dans le creuset **FGHI**.

Coupe schématique du haut fourneau

* Réfractaire : qui résiste à de très hautes températures.

La marche du haut fourneau



Coupe à travers un haut fourneau

Quatre ouvriers suffisaient à faire fonctionner le haut fourneau.

Le gros du travail est assuré par les chargeurs. Munis de corbeilles en osier ou rasses, ces ouvriers basculent le contenu de leur corbeille dans le gueulard : charbon de bois, minerai et parfois castine*.

Le haut fourneau est à marche continue. Il faut l'alimenter sans cesse, de jour comme de nuit. La mise à feu est une opération longue (de dix à quinze jours après allumage).

L'aide-fondeur procède à l'évacuation du laitier (voir p. 23), tandis que le fondeur assure la bonne marche des soufflets. Il règle leur rythme et veille à l'état des tuyères, détachant au besoin les crasses qui pourraient les obstruer.

La coulée s'effectue toutes les douze heures environ. Le fondeur enlève le tampon de glaise qui obstrue l'orifice ménagé à la partie inférieure du creuset : la fonte peut s'écouler dans un moule creusé dans le sol.

Un haut fourneau était utilisé par campagne de durée variable : un à trois mois ou plus.

* **Castine** : pierre calcaire utilisée comme fondant dans le haut fourneau.



Hauts fourneaux, Ironbridge, Angleterre, XIX^e siècle.



Haut fourneau de Montagney (Doubs), XVIII^e-XIX^e siècle. Embrasure des soufflets.

La réduction indirecte

Dans le haut fourneau, la température étant très élevée, de l'ordre de 1 600 à 2 000 °C, le carbone du charbon de bois (ou du coke) s'allie à l'oxygène pour former un gaz : l'oxyde de carbone.

Ce gaz va agir sur le minerai de fer pour lui prendre son oxygène. La même chose se passe dans le bas fourneau.

Mais dans le haut fourneau se produisent deux phénomènes simultanés :

- un phénomène de **réduction**, comme dans le bas fourneau ;
- un phénomène de **carburation beaucoup plus important que dans le bas fourneau** : du carbone diffuse dans le fer. Le mélange obtenu est liquide à cette température : c'est de la fonte.



Si l'on veut obtenir du fer ou de l'acier, il faut décarburer la fonte (pour enlever le carbone en excédent) par une opération supplémentaire : l'**affinage**.

Réduction et affinage sont nécessaires pour obtenir du fer ou de l'acier à partir du minerai, ce qui explique le terme de réduction indirecte.

LE HAUT FOURNEAU

La CUVE : partie tronconique évasée vers le bas. Sa forme est justifiée par l'accroissement volumique des gaz dû à l'augmentation de température quand on descend vers le bas du four.

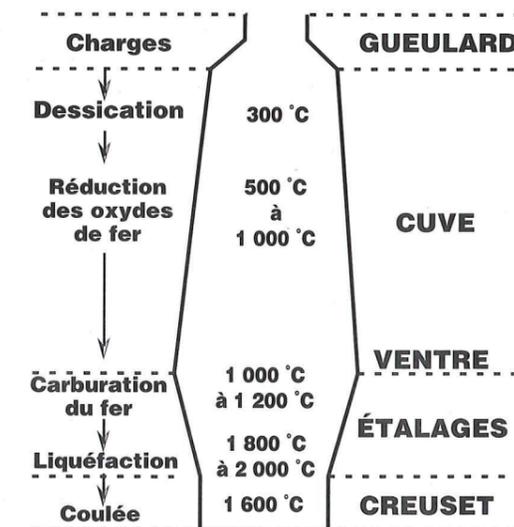
Le GUEULARD : appareil de réception des matières et orifice de sortie des gaz.

Les déchets des hauts fourneaux : le laitier

Dans un haut fourneau, la fonte est séparée des scories au moment de la coulée. Les déchets, plus légers (laitiers), surnagent sur la fonte en fusion. Au moment de la coulée, ils sont évacués par un trou percé plus haut que celui réservé à la fonte. Ces scories ont un aspect pâteux qui ressemble à du verre : c'est le laitier.



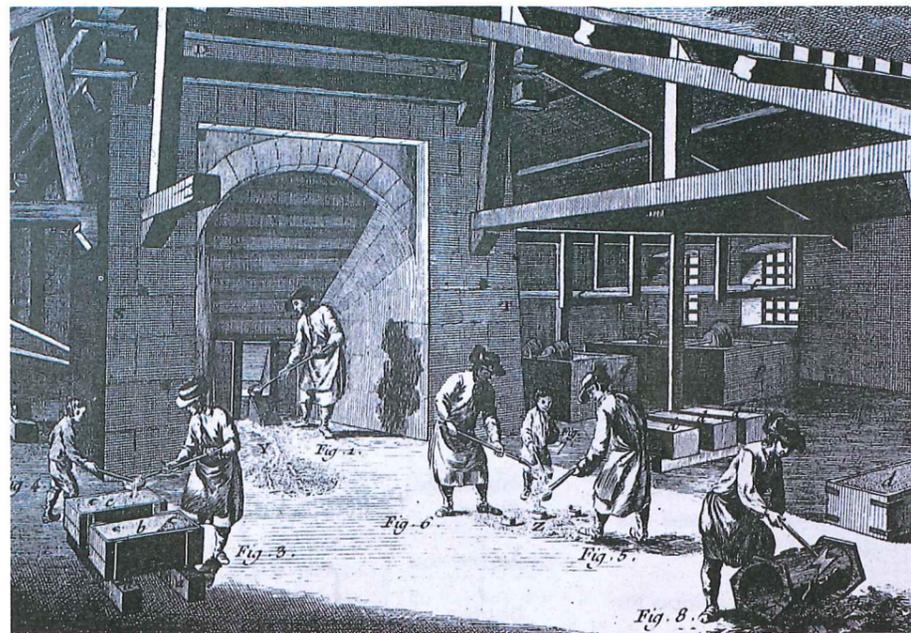
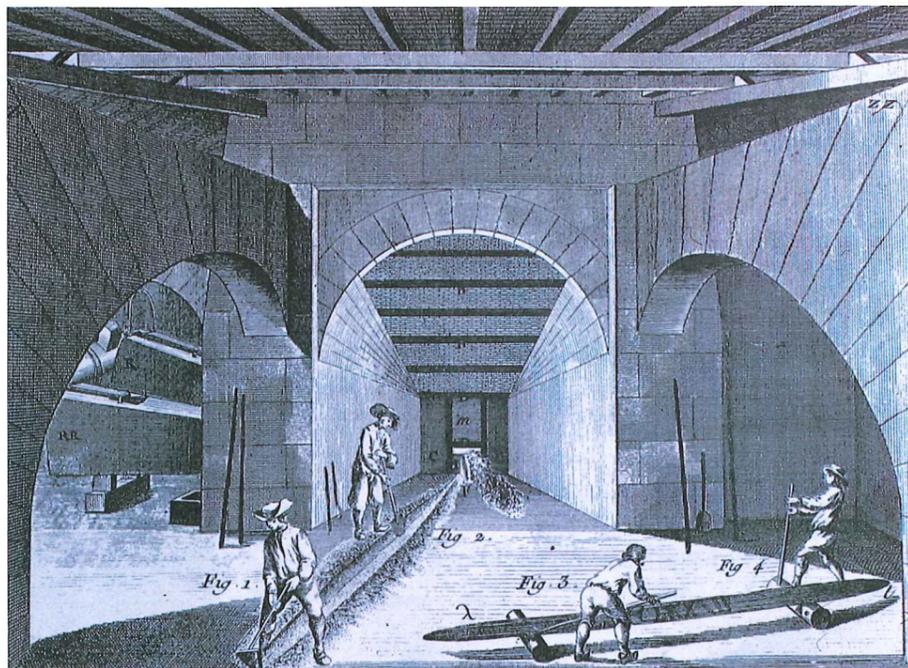
Fragment de laitier



La fonte liquide

La fonte s'écoule par un orifice percé au bas du fourneau. Elle est prélevée directement à sa sortie dans des récipients pour la mouler en objets prêts à être utilisés : plaques de cheminée, enclumes, marmites, boulets de canon...

Elle est aussi coulée dans des raies tracées dans le sable du sol. Elles constituent ainsi, après refroidissement, des lingots ou **gueuses** (de l'allemand *Giese*, « fonte ») pouvant mesurer de 5 à 6 mètres de longueur, de section triangulaire et pesant jusqu'à 1 000 kg. Chaque gueuse est numérotée et pesée après démoulage à froid.



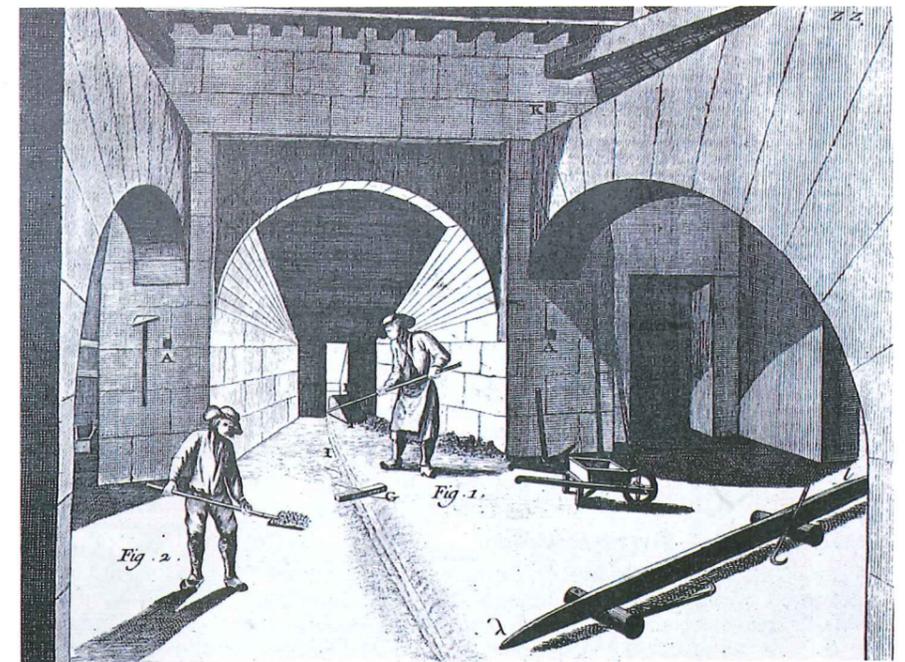
La coulée
Deux ouvriers à gauche sont occupés à préparer le moule dans lequel la fonte va couler. A droite, deux autres acheminent une gueuse refroidie à l'extérieur du bâtiment.

Fabrication d'objets en fonte
La fonte est prélevée dans le fourneau et coulée dans des moules pour fabriquer des objets tels que des plaques de cheminée ou des boulets de canon.



Haut fourneau de Montagney (Doubs) : moule pour fabriquer des petits boulets de canon.

Haut fourneau de Montagney (Doubs) : orifice de coulée.



Le fourneau est ouvert. La fonte liquide peut s'écouler dans la rainure.



Haut fourneau de Montagney (Doubs) : gueuse numérotée.

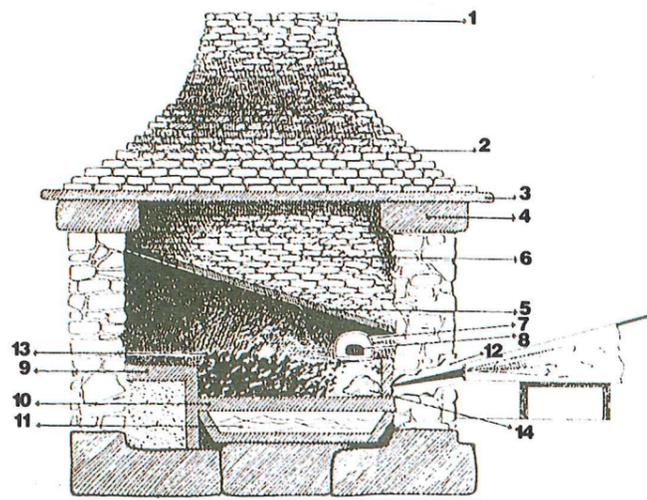


De la fonte à l'acier et au fer : l'affinage

La fonte obtenue doit être affinée pour se transformer en acier et en fer.

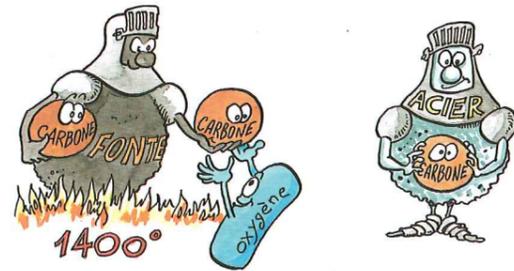
Les feux ou foyers d'affinerie

Les gueuses sont transportées au four d'affinage. Sur un lit de charbons transformé en fournaise, la gueuse se liquéfie et s'écoule progressivement. La fonte, débarrassée de son carbone, se transforme en une loupe de fer et d'acier appelée aussi, autrefois, « renard ».

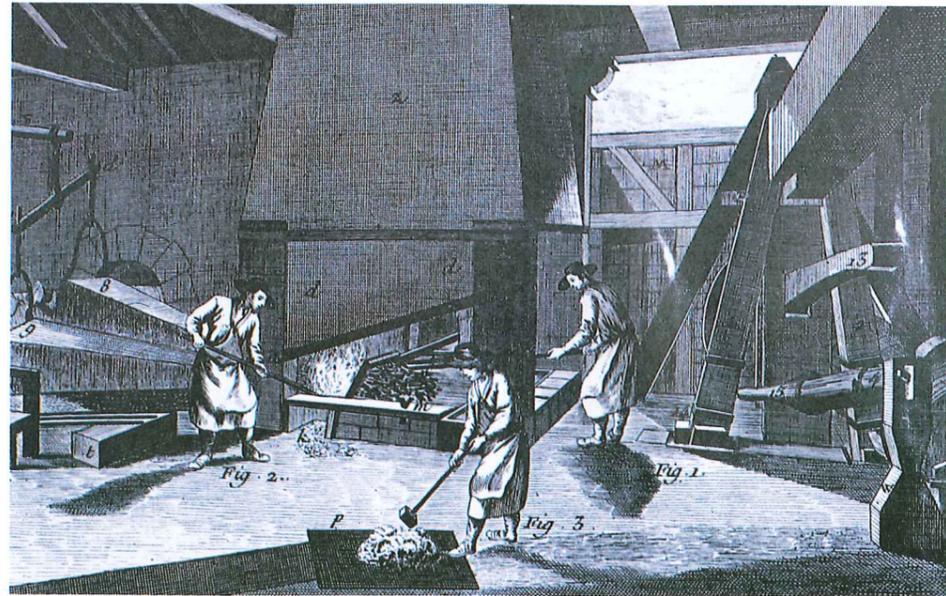


Le foyer d'affinage. Vue en élévation.

1. Cheminée - 2. Hotte - 3. Marâtre - 4. Blocs de fonte - 5. Marâtre oblique sur laquelle est construit un muret en briques (6) - 7. Ouverture pour le passage de la gueuse - 8. Nez de la gueuse - 9. Plaques de fonte (côtés du creuset) - 10. Plaques de fonte (fond du creuset) - 11. Caisse à circulation d'eau - 12. Tuyère dans laquelle s'engage la buse des soufflets - 13. Charbon de bois - 14. Loupe de fer



Ce travail était effectué par des ouvriers qui remuaient sans cesse la masse en fusion au moyen d'un ringard.

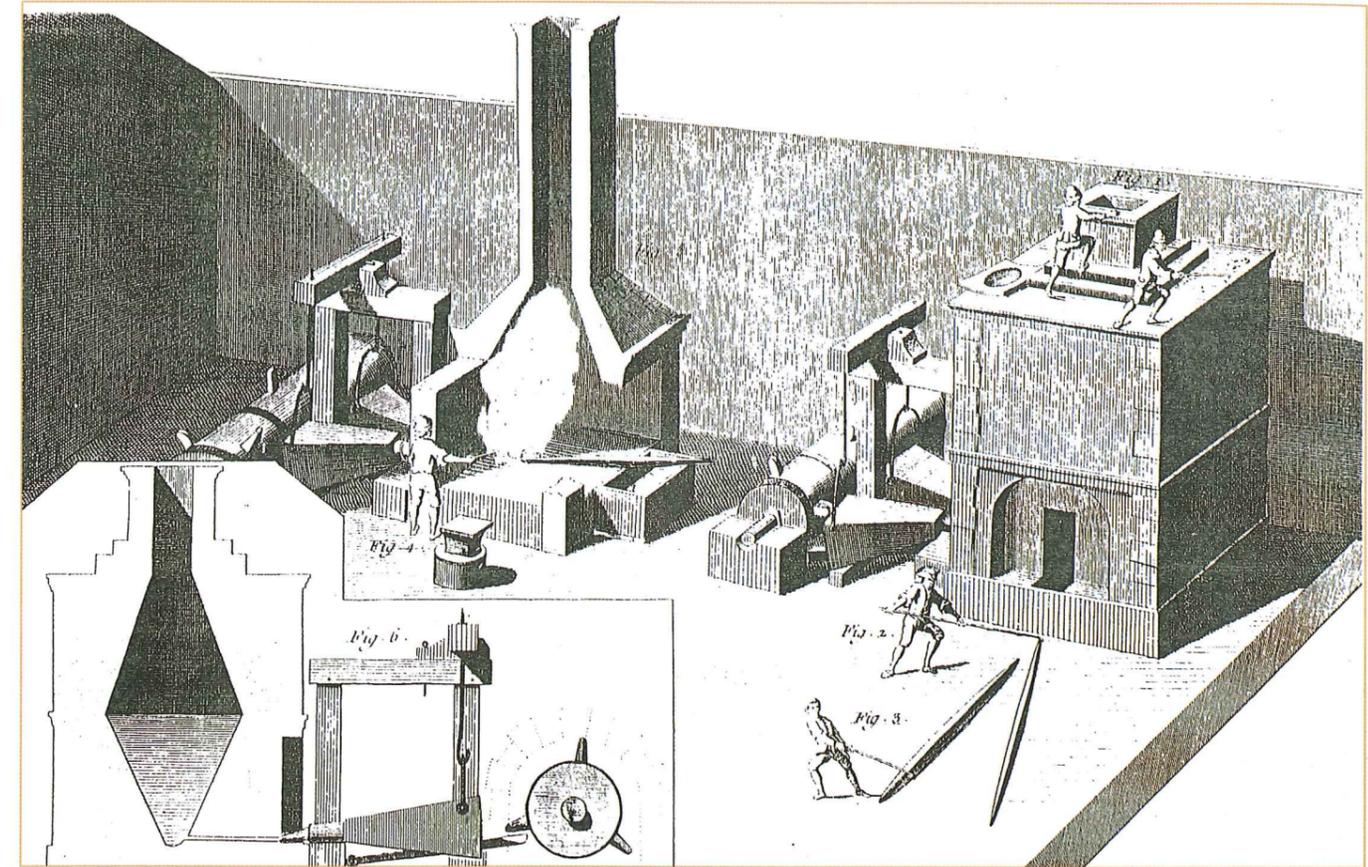


Foyer d'affinerie

La fonte est soumise à un feu d'affinerie.

À droite, un ouvrier pousse progressivement la gueuse vers le foyer attisé par deux soufflets. Au premier plan, un ouvrier frappe la loupe obtenue avec une masse pour la compacter.

Fer, fonte, acier... résumons-nous



De la fonte au fer
Sur cette gravure on aperçoit les principaux ateliers d'une forge : haut fourneau, affinage.

Fonte, acier, fer : trois produits à partir d'un même minerai ?

Ces trois termes ont été définis au XIX^e siècle pour désigner un même métal mais présentant des teneurs en carbone différentes :

- la fonte qui comporte plus de 1,7 % de carbone : c'est ce qui coule du haut fourneau ;
- l'acier qui comprend entre 0,02 % et 1,7 % de carbone,
- le fer pur qui contient au maximum 0,02 % de carbone.

Ces deux derniers produits sont obtenus après affinage (dans le procédé indirect).

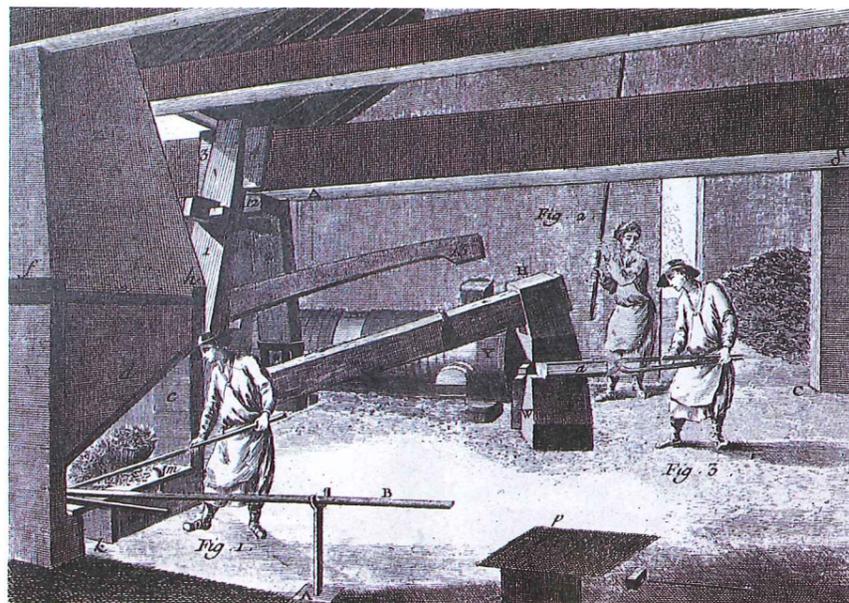
La teneur en carbone modifie les caractéristiques d'usage du produit. Par exemple le produit peut être plus ou moins dur mais cassant selon qu'il contient ou non une forte proportion de carbone.

Le cinglage

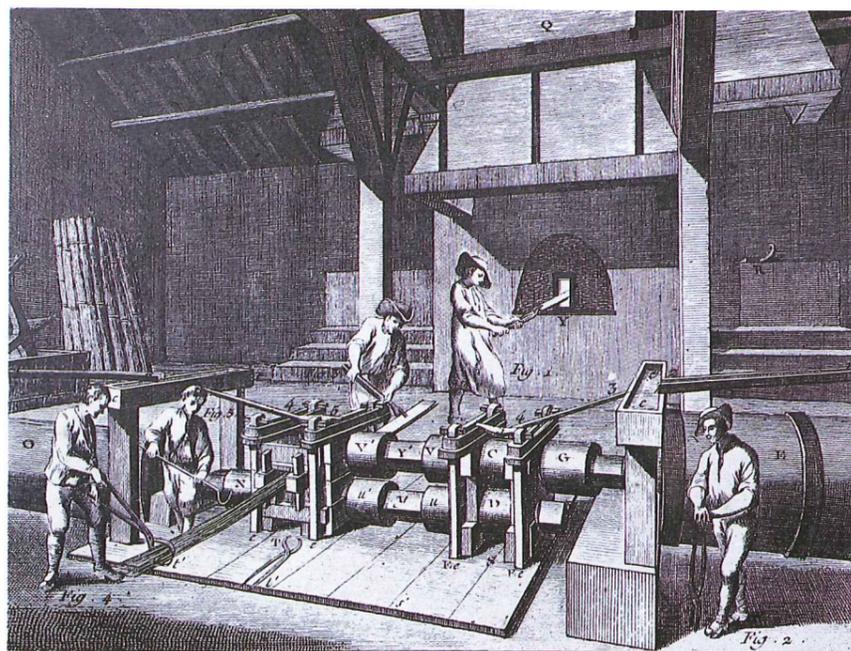
Comme dans le procédé direct, la loupe de fer est ensuite martelée pour la débarrasser de ses impuretés et la rendre homogène. Le fer obtenu est malléable et non cassant.

La loupe, à l'état pâteux, passe sous un **martinet** ou marteau d'affinerie, actionné par la force hydraulique, qui la cingle. Elle perd son aspect spongieux pour acquérir une consistance plus homogène et plus dense. Elle peut être transformée en barres.

La méthode d'affinage employée variait suivant les régions.



Atelier de fenderie



Atelier de cinglage avec martinet

Le martinet est un énorme marteau pouvant peser plus de 100 kg. Emmanché d'un tronc d'arbre entier, sa force et sa cadence de frappe, dans un bruit infernal, permet de forger à chaud le métal en le battant sur une enclume.

La fenderie

La fenderie est un atelier où sont réalisées des barres de fer de petite dimension. Les barreaux obtenus dans les affineries y sont fendus longitudinalement en barres de petite section. Pour réaliser cette opération les barreaux sont chauffés à blanc.

L'atelier est composé d'un four à réchauffer et de plusieurs séries de laminoirs mus par la force hydraulique. Les laminoirs sont des cylindres en métal qui tournent en sens inverse pour entraîner les barres. Ils sont destinés à réduire l'épaisseur des barreaux.

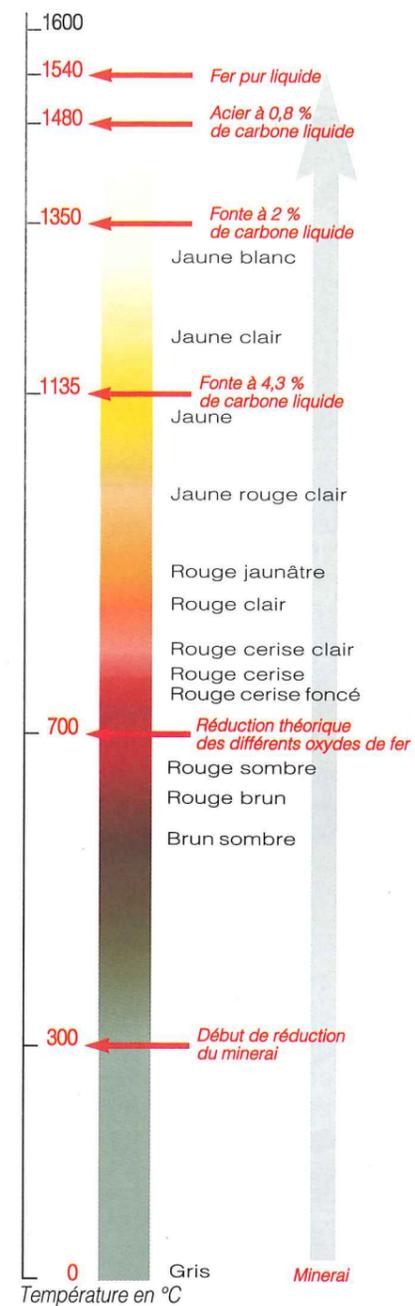


Tableau de correspondance températures/couleur de la flamme



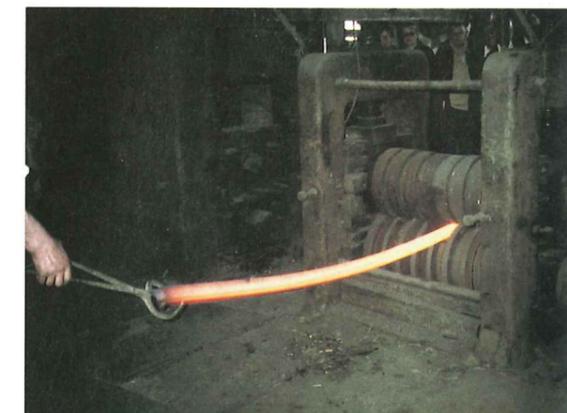
A la forge, de Joseph Wright de Derby, 1772. Martinet en action.

Les barreaux peuvent aussi être fendus par cisaillement lors de leur passage entre les taillants, cylindres comportant des cannelures. La tirerie réduit les barres fendues en fil de fer par le même procédé.

Le passage successif entre des cylindres plats progressivement plus resserrés permet d'obtenir de la tôle.

L'éclairage de la forge

Les locaux des forges étaient peu éclairés. Les ouvriers devaient distinguer à l'œil et par la couleur la température de chauffe. Cette mesure n'était possible que dans une semi-obscurité.



Laminage manuel à l'ancienne

La force hydraulique

Quels sont les principes du moteur hydraulique ?

L'organe moteur est constitué par une roue hydraulique, généralement en bois, à axe horizontal et dont le pourtour comporte des augets. Sous l'effet d'un courant d'eau débouchant à la partie supérieure de la roue, les augets se remplissent. Le poids de l'eau provoque la rotation de la roue.

L'alimentation en eau des installations sidérurgiques était assurée grâce à la canalisation forcée d'une rivière à partir d'un système astucieux de barrages, de vannes et de canaux. Les forges devaient donc être situées à proximité de cours d'eau.

Le moteur hydraulique animait les soufflets de la forge mais aussi toutes sortes de mécanismes, les martinets, les laminoirs, les patouillets, les bocards...

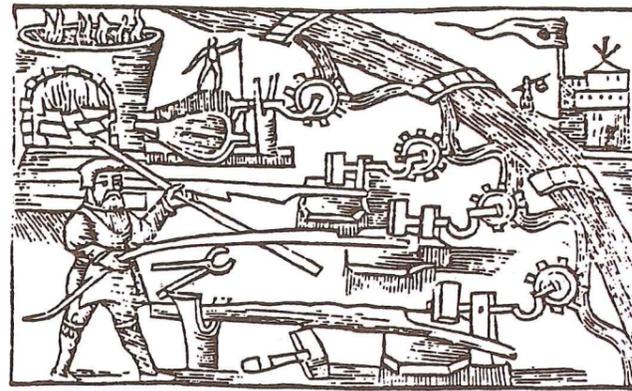
Ce dispositif, simple dans son principe, présentait des inconvénients : le manque d'eau pendant une partie de l'été obligeait les usines à un arrêt de trois à quatre mois dans l'année, suivant le débit des cours d'eau.

L'établissement de biefs, canaux de dérivation, représentait des travaux importants, mais il permettait de laisser libre le cours d'eau pour la navigation ou le flottage.

Ce n'est que tardivement, à partir de 1850 en Angleterre et plus tard sur le continent, que l'emploi de machines à vapeur se généralisera pour remplacer la force de l'eau.



Conduite forcée et roue hydraulique en action, province de Bienna, Italie du Nord.

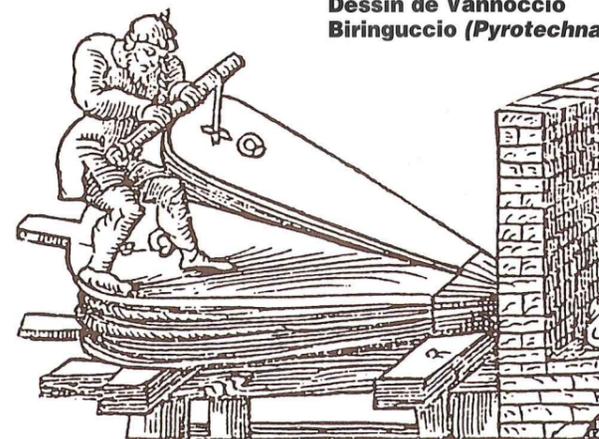


Rivière domestiquée pour l'utilisation de la force hydraulique : soufflets et martinets en action. Dessin de Vannoccio Biringuccio (Pyrotechna).

Les soufflets

La soufflerie d'un haut fourneau doit être constante.

Pour obtenir une arrivée d'air suffisante, estimée en pleine marche à 100 m³ à la minute, les soufflets de grande taille (environ 5 m sur 1,80 m) sont toujours groupés par deux et leurs phases de fonctionnement décalées l'une par rapport à l'autre.



Dessin de Vannoccio Biringuccio (Pyrotechna).

La vie de la forge



Les ouvriers de la forge

Les mineurs et les ouvriers qui travaillent le fer sont au plus bas de l'échelle sociale.

« Ce ne sont pas des gens commodes ou riches qui travaillent dans les bois, ni dans les mines, comme ce ne sont ordinairement que des gens dénués de tout moyen pour vivre, lesquels n'ont pas sitôt fait une journée qu'ils voudraient déjà en toucher le paiement. Il en est pour travailler souvente fois plusieurs mois à fouiller et chercher des mines sans rien trouver, ou au moins guère trouver de quoi se dédommager d'une petite partie de leur frais, les coupeurs de bois sont dans le même cas et généralement tous les ouvriers travaillant pour les forges. »

Archives du Doubs, document du XVIII^e siècle.

Les conditions de travail

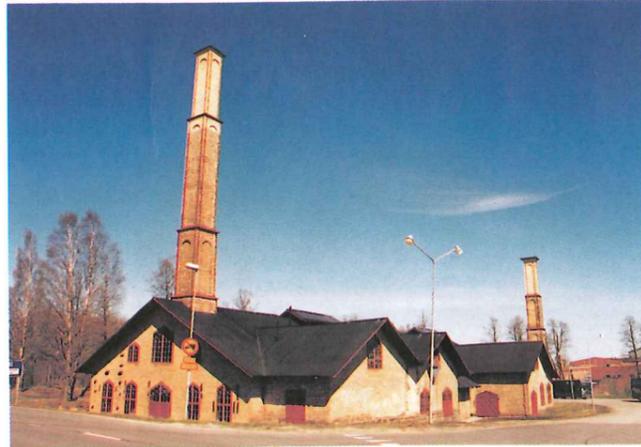
Les conditions de travail étaient très dures. Les ouvriers travaillaient de jour et de nuit ; ils étaient constamment exposés aux hautes températures.

Ils portaient une longue chemise ou sarrau, en toile de chanvre grossier qui leur laissait toute liberté de mouvements et qui les protégeait de la chaleur. C'était un vêtement facile à réparer en cas de brûlures.

Le port traditionnel du tablier de cuir complétait l'habillement.

Un chapeau à larges bords protégeait le visage des projections et de la chaleur.

La forge aux XVIII^e - XIX^e siècles



Bâtiments de forge (Suède), XIX^e siècle.

La forge : une chaîne d'ateliers et un lieu de vie

La forge constitue un espace structuré où se côtoient les logements des ouvriers, du contremaître et les ateliers.

La halle à charbon, les magasins où sont stockés les fers en attente d'expédition, les écuries* et leur réserve de fourrage font partie intégrante de cet ensemble.

Les ouvriers internes vivent et travaillent dans l'enceinte de l'établissement où ils sont logés : ouvriers spécialistes du haut fourneau, des feux d'affinerie et du martinet ainsi que leurs aides. Ils disposent de jardins potagers, de



* Les chevaux assuraient le transport du minerai, du charbon de bois et aussi des produits réalisés à la forge.

Le travail dans la forge



prés et de vergers. Si la communauté est nombreuse, on peut y trouver un cabaret, des magasins comme une boulangerie, une boucherie.

La communauté des forges ne se mêle que rarement aux villageois. Les ouvriers, exemptés de corvées et de charges seigneuriales jusqu'à la Révolution, étaient considérés par les paysans comme des privilégiés. Ces exemptions permettaient aux ouvriers de se consacrer exclusivement aux travaux des forges. Les avantages fiscaux visaient surtout à les attirer et à les fixer, mais, en dehors des maîtres ouvriers (fondeurs, maîtres marteleurs), les salaires étaient en dessous du minimum vital et obligeaient les ouvriers à recevoir à leur foyer des « communiens » célibataires et à faire participer femmes et enfants au travail pour obtenir un complément de revenus.

Les ouvriers externes : mineurs, coupeurs (bûcherons), charbonniers (fabriquant le charbon de bois en forêt) et voituriers étaient employés à la saison et rétribués par la forge.

Le logement des ouvriers

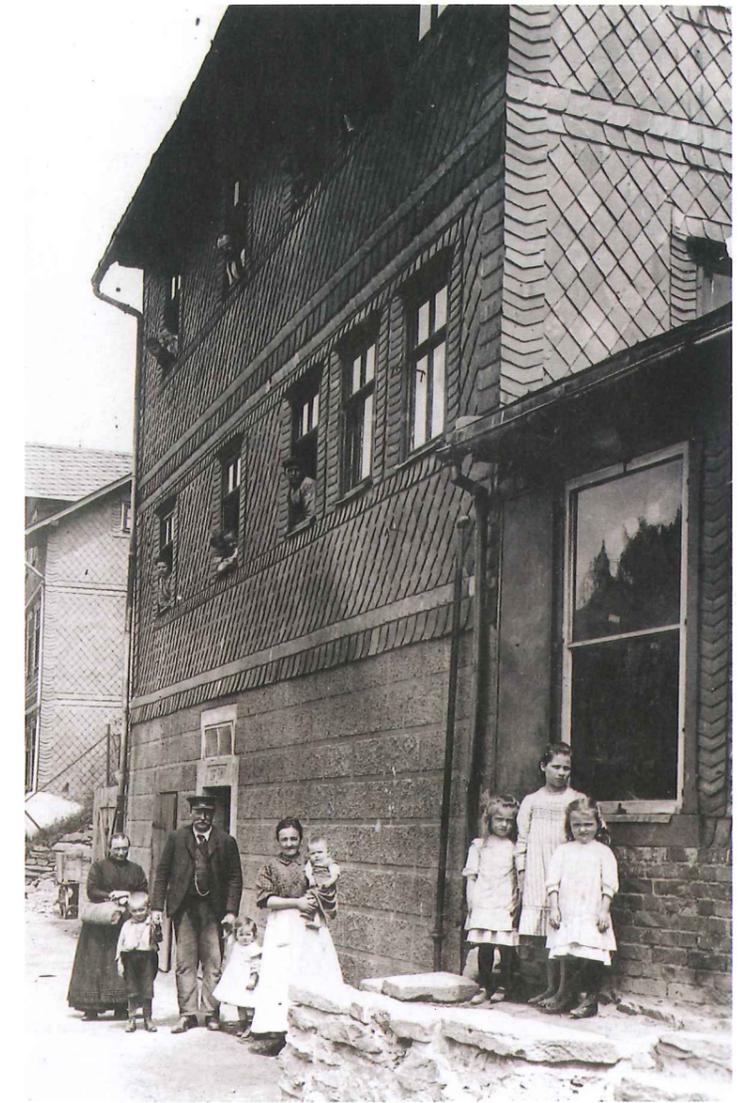
Les logements des ouvriers font partie intégrante de la forge et remontent à l'origine des installations industrielles. Leur présence était nécessitée par la fabrication en continu et l'isolement de l'usine.

Simple baraquement de planches, les bâtiments seront progressivement construits en pierre, chaque étage comprenant de dix à quinze logements le plus souvent exigus et mal isolés par de simples cloisons de planches.

Au XVIII^e siècle, le logement type est composé d'une cuisine au sol en terre battue dotée d'une cheminée avec ses plaques, crochets et barre pour porter les viandes à sécher, et d'une chambre avec alcôve.

Les logements plus importants, la maison du fondeur ont une cuisine pavée de pierres ou une petite chambre dans le grenier. Ces locaux (deux pièces/cuisine par famille) correspondent au type de maison de cette époque.

Les ouvriers disposaient d'un puits avec une pompe pour faire monter l'eau, d'une étable, d'une porcherie, d'un four à pain.



Logement ouvrier au début du siècle

Les toilettes n'existaient pas. Les excréments étaient réservés comme le fumier à l'engraissement des jardins. Ces logements regroupés autour des installations industrielles impliquaient une vie communautaire conditionnée par l'usine et le roulement continu des fourneaux.

Que fabriquait-on à la forge ?

Au haut fourneau, on produisait outre des gueuses, des moulages, des taques de cheminées, des enclumes, de gros marteaux, des boulets de canon.

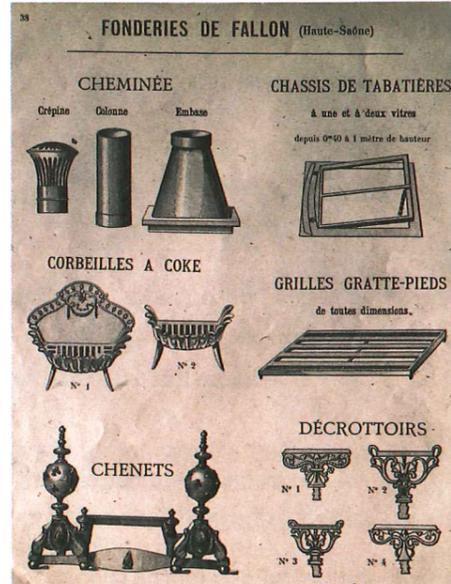
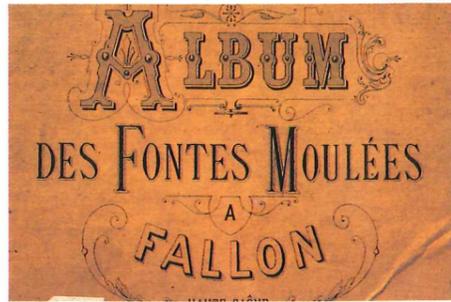
A la « renardière »* et aux feux d'affinerie de fer, on fabriquait des barres de fer, rondes ou plates, des pieux, des outils agricoles comme des socs de charrue... Tous ces matériaux étaient façonnés par martelage ou laminage.

Renardière : atelier où l'on travaillait le « renard » (voir p. 26).



Boulets de canon, haut fourneau de Montagney (Doubs).

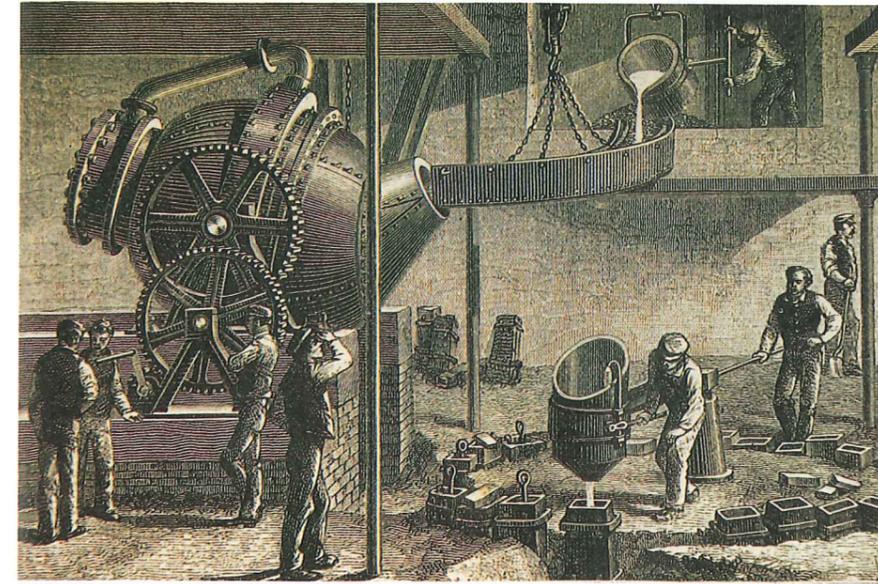
Extrait du catalogue des forges et fonderies de Fallon (archives départementales de la Haute-Saône).



Fourneaux colonne unie à galerie à bois ou à houille



La métallurgie moderne



Fabrication de l'acier Bessemer

Des inventions décisives marquent le XIX^e siècle. En 1855, l'Anglais Bessemer réalise pour la première fois une production industrielle de l'acier par affinage de la fonte à l'aide d'un convertisseur. En 1875, le procédé Bessemer est adapté à l'affinage de la fonte de Lorraine par Thomas.

Grâce à ces procédés, on peut ainsi disposer de grandes quantités de cet alliage fer-carbone que l'on appelle acier dont les propriétés d'élasticité et de résistance sont remarquables. Ces propriétés sont progressivement améliorées en incorporant d'autres métaux tels que le manganèse, le nickel, le chrome...

Aciers fins et spéciaux ont permis l'essor des merveilles technologiques du XX^e siècle : automobile, aéronautique.

Au XVIII^e siècle, la consommation de fer connaît un grand bond en avant, ce qui pose d'énormes problèmes de fourniture de combustible, jusqu'à ce qu'on parvienne à produire de la fonte au coke (1709).

Le procédé d'affinage par puddlage qui consiste à brasser la fonte liquide dans des fours à réverbère pour la convertir en fer permet de produire du fer ou de l'acier avec un rendement amélioré.

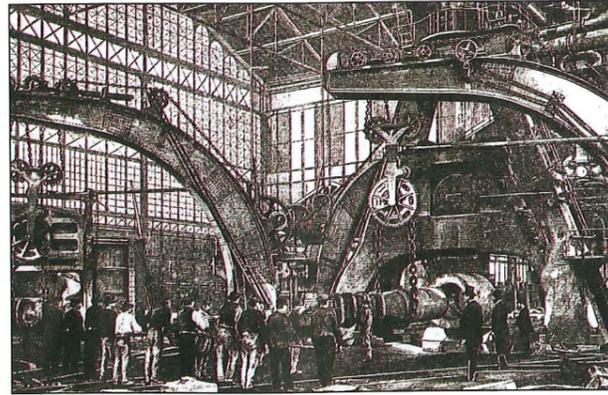
Au XIX^e siècle de nombreux bâtiments sont érigés avec des armatures métalliques : ponts, marchés, gares, grands magasins. Le siècle du fer annonce les grandes innovations du XX^e siècle avec la multiplication des aciers spéciaux et la sidérurgie moderne.

Le haut fourneau voit ses dimensions et sa production s'accroître considérablement, grâce à l'emploi des machines à vapeur pour le soufflage de l'air et à l'insufflation d'air chaud. La production d'un haut fourneau passe de 4 tonnes par jour en 1806 à 15 tonnes par jour en 1850.

Ironbridge : symbole de la révolution industrielle, la première construction métallique bâtie en 1779 en Angleterre.



Le fer en France et dans le monde



Le Creusot au début du XX^e siècle.

- | | |
|---|---|
| - 1800 - 1700 : Apparition de la métallurgie du fer au Proche-Orient | 1783 Invention du puddlage et du laminage du fer par Henry Cort |
| - 700 Introduction de la métallurgie du fer en Gaule | 1817 Tarif douanier visant à protéger la sidérurgie française contre la concurrence étrangère |
| - 52 Grand essor de la production du fer en Gaule | 1826 Premier chemin de fer en France |
| 410 Production du fer réduite à la satisfaction des besoins locaux | 1841 Premier essor en France de l'équipement ferroviaire |
| 1100 Apparition du martiné à fer
Reprise de la production du fer, notamment sous l'impulsion des cisterciens | 1852 Mise en service du chemin de fer Paris-Lyon |
| 1340 Apparition du haut fourneau en Europe | 1855 Procédé Bessemer - Crise générale de la sidérurgie au bois |
| 1450 Première expansion de la sidérurgie indirecte en France (Lorraine et Champagne) | 1878 Procédé Thomas et Gilchrist - Essor de la sidérurgie lorraine |
| 1560 Recul de la production sidérurgique en France | 1900 Four électrique de Héroult en France |
| 1600 Apparition des fenderies et des bocards | 1960 Record historique de la production charbonnière en France (58 MT) |
| 1660 Nouvelle expansion de la production du fer en France | 1966 Premier plan acier en France |
| 1709 Mise au point du coke par l'Anglais Abraham Darby | 1978 Reprise par l'État de la sidérurgie française |
| 1769 Machine à vapeur de James Watt | |

Le savoir fer ou comment fabriquer du fer aujourd'hui...

Récit d'une expérimentation

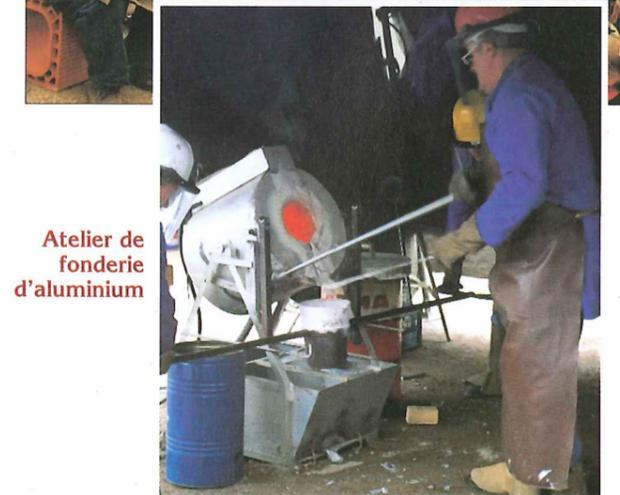
Le fer

A Lure, petite cité du département de Haute-Saône, en Franche-Comté, la place centrale a été transformée en un immense atelier de métallurgie où se côtoyaient meules de charbonniers, atelier de préparation mécanique des minerais de fer, bas fourneau de réduction du fer, atelier de bronzier, atelier de fonderie d'aluminium et train de mine pour une immense fête du métal.

Cette manifestation de grande ampleur, organisée par une association qui s'occupe du patrimoine local, la Société d'histoire et d'archéologie de l'arrondissement de Lure, avec la participation des élèves du collège du Mortard (SEGPA) et du lycée professionnel Bartholdi de Lure en partenariat avec le CNRS, s'est déroulée dans le cadre de l'opération Science en fête en 1996.

Archéologue professionnel, Philippe Andrieux (à gauche sur la photo du haut) a apporté son savoir-faire pour construire un bas fourneau tel qu'il s'en faisait autour des grands centres d'extraction minière à l'époque gallo-romaine. C'est donc à partir des renseignements apportés par les fouilles archéologiques que ce four a été réalisé.

L'expérimentation a consisté à reconstituer une structure avec les techniques les plus proches possible de celles utilisées dans le passé, puis de la faire fonctionner toujours à partir des indices que l'on a pu retrouver.



Atelier de fonderie d'aluminium

Le choix de l'emplacement

Pour installer un four, il faut choisir un emplacement idéal, c'est-à-dire proche des sources d'approvisionnement en matériaux nécessaires :

- matières premières pour construire le four ;
- combustible pour produire le charbon de bois ;
- minerai de fer.

A Lure, il a fallu acheminer les matières premières nécessaires à la construction des fours (un pour le fer et un pour le bronze) et aussi à leur fonctionnement : argiles et sables provenant de carrières proches, bois des forêts environnantes, minerai de fer prélevé dans des mines anciennes.

Début de la construction du four



Le combustible : le charbon de bois



Le bois se consume dans le chaudron.

Pour fabriquer du charbon de bois, il faut beaucoup de bois, coupé en rondins de taille régulière (charbonnettes) disposés en meules et qu'on laisse se consumer. On peut aussi creuser de petites fosses dans lesquelles on place le bois.



La combustion est achevée. Le bois s'est transformé en charbon de bois.

Vers la fin du XIX^e siècle, le charbon de bois était fabriqué dans de grosses marmites en tôle. Ce procédé était plus rapide.

Le minerai de fer

Le minerai, quant à lui, est concassé avant d'être introduit dans le four. Pour ce faire, on utilise des pierres plates comme meules dormantes. De simples galets massifs servent à broyer le minerai. On peut également utiliser le feu pour le fissurer, puis l'éclater.

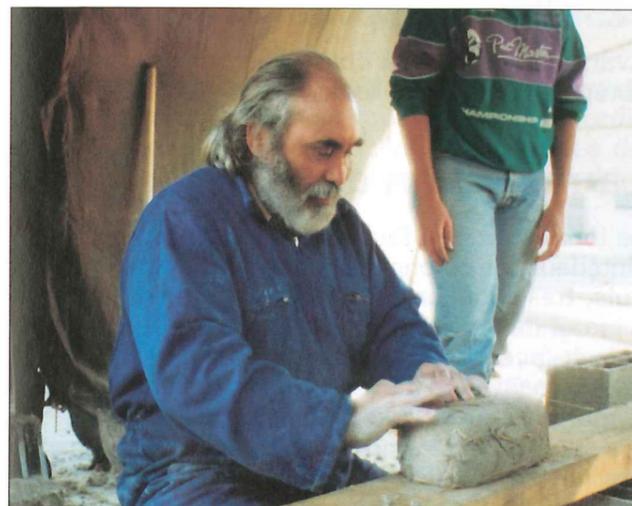
La réalisation du four

La fabrication des briques

Une fois l'emplacement choisi commence la construction du four. Pour cela, on fabrique des pains d'argile. On prépare un savant mélange de limon, de sable et de paille, que l'on compacte et foule avec les pieds.

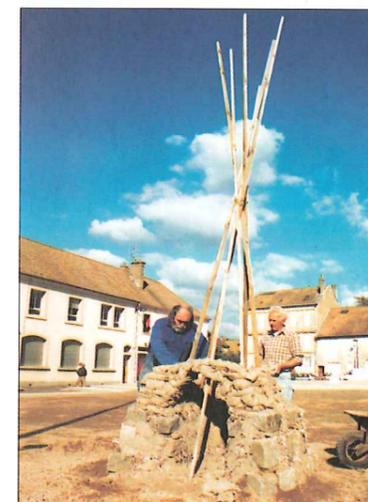
Pourquoi de la paille ? La terre, en séchant, durcit, se fend et se craquelle. En introduisant de la paille, on favorise la présence de micro fissures, ce qui évite à l'ensemble les grosses fissures, puis l'éclatement sous l'effet de la chaleur.

Les briques sont réalisées à la main avec cette matière et compactées au moyen de planches en bois.



La construction du four

L'opération semble facile. Pourtant, comme le souligne Philippe Andrieux, plus c'est simple, plus il y a d'investissement d'intelligence. Le type de four construit était en usage entre les III^e siècles avant et après notre ère. Ce sont des installations légères comme il s'en faisait à ces époques. Le but est donc de reconstituer ces fours, que l'archéologie nous livre, mais aussi de les faire fonctionner pour en comprendre les techniques.



Pour monter le four, on installe un gabarit : six à neuf baguettes en bois fixent le diamètre et la hauteur à ne pas dépasser.

La ventilation

Une fois le four monté, il faut installer la soufflerie sur une plate-forme artificielle construite à l'arrière. On peut adosser le four contre un talus.

Le vent est essentiel. Pour le maîtriser, il faut une parfaite coordination entre les deux souffleurs.

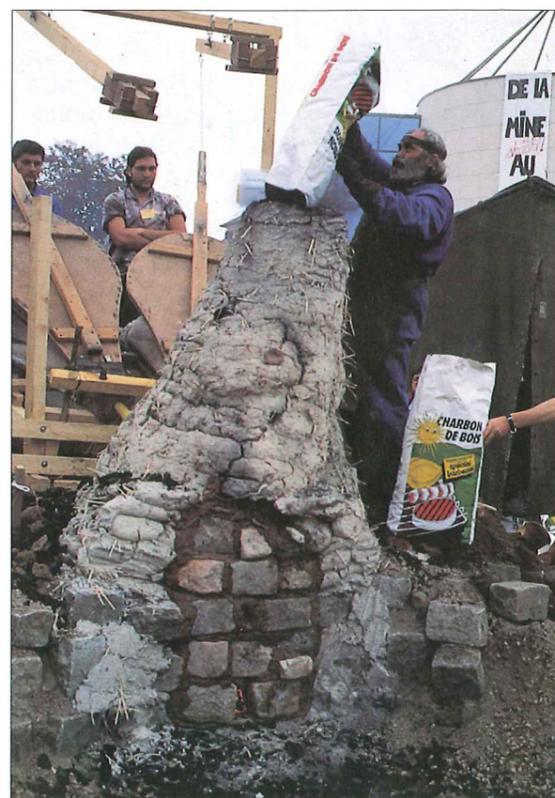
Les soufflets sont en bois pour l'armature et en cuir. Ils sont prolongés par des tuyaux en terre cuite (tubes à vent), qui s'enfoncent dans les tuyères placées dans la paroi du four.

Les soufflets fonctionnent en alternance : quand l'un est ouvert, l'autre s'abaisse, ce qui permet d'insuffler de l'air en permanence.



Le séchage

Avant de démarrer l'opération, il faut chauffer le four pour le solidifier et éviter qu'il ne se détruise suite à une élévation trop brutale de la température. Un feu est allumé à l'intérieur pendant plusieurs heures.



Fermeture de la porte

Avant de recevoir sa charge, la porte du four est obturée avec des moellons jointoyés avec de l'argile.

La réduction du minerai

Le four est prêt. Il faut le préchauffer en brûlant à l'intérieur une colonne complète de charbon de bois puis, très régulièrement, déposer une charge de minerai de fer en alternance avec du charbon de bois de façon à ce que l'opération se passe bien. Le rôle du maître-fondeur est alors essentiel : il surveille la marche du four, il se tient en alerte et contrôle la température à partir des couleurs de la flamme et des fumées. Il veille en permanence sur la ventilation.



Ici, l'archéologue enregistre des données grâce à des capteurs placés sur le four et reliés à un ordinateur, afin de mémoriser les phénomènes de combustion et de réduction. Il les étudiera plus tard.

Un travail d'équipe

L'artisan métallurgiste n'est pas seul. Il dirige une équipe où se côtoient charbonniers, mineurs et souffleurs avec qui il travaille. Sans arrêt, il fait actionner les soufflets et alimenter le four. C'est une opération qui demande une coordination parfaite, une très grande rigueur et surtout un partage des tâches.



Le retrait des tuyères

Douze heures plus tard environ, la réduction est achevée

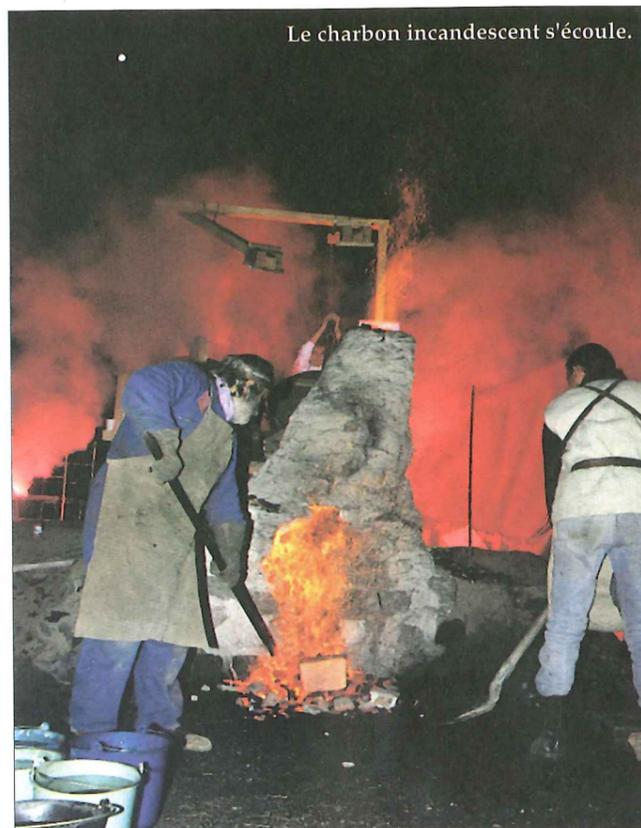
Les tuyères commencent à s'encrasser et il devient difficile d'insuffler de l'air.

La charge de minerai et de combustible descend plus lentement.

Au signal du maître-fondeur, les soufflets sont stoppés net. La température atteint 1 300 à 1 400°C dans le four.



La porte est ouverte à l'aide d'une barre à mine.



Le charbon incandescent s'écoule.



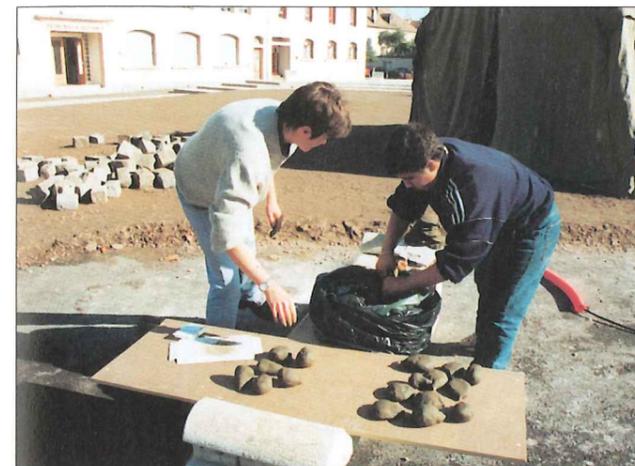
Extraction du massiau

L'extraction se fait en deux temps. D'abord il faut ouvrir la porte du four : le bouchon de pierres et d'argile est défoncé à coup de barre à mine, laissant s'échapper le charbon incandescent.

Puis le massiau est extrait : il s'agit d'une masse de scories et de fer agglomérés, accrochée à la paroi du four, qui sera par la suite battue à coups de marteau pour en extraire le fer au cours de multiples réchauffages à la forge.

Le bronze

A Lure, l'expérimentation a également concerné la fabrication du bronze à partir de cuivre et d'étain. Là encore, la maîtrise du feu et du métal est conditionnée par une parfaite harmonie entre la structure et l'équipe qui la fait fonctionner. Les structures de chauffe comme le bas foyer ont été mises en oeuvre.



Enrobage des figurines avec le massac

Moulage d'objets

Des objets ont été fabriqués par des enfants au moyen de cire d'abeille.

Le moule est confectionné dans une matière spécifiquement composée, le « massac ». Sa recette ancienne est simple : se procurer du crottin de cheval (l'animal doit être sain et n'être nourri qu'au pré) ; ramasser quelques seaux de limon argileux ; faire trois parts égales de crottin, d'eau et de limon ; mélanger le tout dans un récipient jusqu'à l'obtention d'un liquide visqueux et odorant ; le verser dans autant de récipients que nécessaire ; laisser reposer deux mois en remuant le mélange de temps en temps.

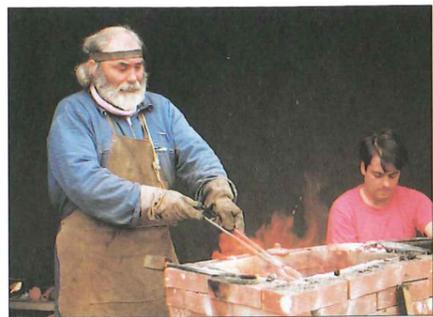


Figurines de cire

Le mélange doit se concentrer. Après avoir laissé décanter le produit, le tamiser, pour séparer les fibres du massac. Le produit est prêt à l'emploi. Auparavant, ajouter quelques cheveux coupés fins procurés chez un coiffeur pour améliorer la tenue de la pâte et sa plasticité à l'emploi. Le massac a maintenant la consistance de la pâte à modeler. Réduire le tout en galettes.

Prendre les objets fabriqués en cire d'abeille et les entourer avec les galettes de massac, en laissant poindre le bout de cire collé au modèle par où pénétrera le métal une fois la cire fondue (jet).





Le mélange cuivre et étain est mis à fondre dans les creusets.



Le foyer est activé sans interruption par une soufflerie manuelle.



Le bronze en fusion est versé dans les moules à cire perdue.



Type de fourneau utilisé pour le bronze



Les moules en cours de refroidissement

Pour fabriquer des objets en bronze on utilise la technique de la cire perdue ou le surmoulage pour les objets simples et symétriques, donc démontables.

Pour faire du bronze il faut mélanger du cuivre et de l'étain, les fondre ensemble dans un creuset. La deuxième opération consiste à verser le métal en fusion dans les moules en massac une fois la cire fondue. Le moule a été « étuvé » pendant trois ou quatre heures à 450-500 °C. La cire disparue, le métal prend sa place. Après refroidissement, on casse le moule : l'objet apparaît.



Le bronzier casse les moules pour en retirer les objets de bronze.

ATTENTION !

Les auteurs demandent instamment aux éducateurs de ne pas pratiquer ces techniques comme une activité éducative normale. Ils doivent être impérativement encadrés par un professionnel. Manier du métal en fusion (même et surtout du plomb !) peut être très dangereux. Cet article n'est en aucun cas un mode d'emploi.

Reportage de
Hélène Morin-Hamon et
Philippe Andrieux

Un laboratoire de paléoméallurgie

CNRS de l'université de Technologie de Belfort-Montbéliard



Outil avant sciage

La recherche, c'est tenter de comprendre le présent pour créer l'avenir. Ceci ne peut se faire sans connaître un maximum de choses de notre passé, ne serait-ce que pour ne pas reproduire les mêmes erreurs.

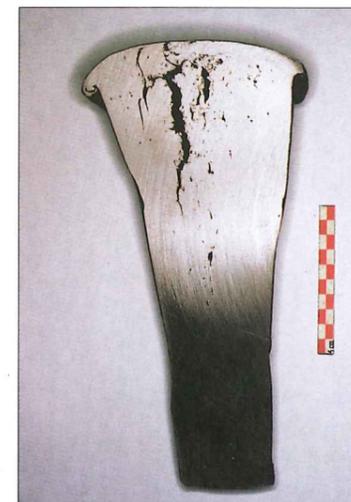
Au laboratoire de paléoméallurgie, nous étudions les métaux anciens afin de mieux comprendre le vieillissement des matériaux d'aujourd'hui (et ainsi préserver et valoriser notre patrimoine), et contribuer à élaborer les nouveaux matériaux de demain.

Nous cherchons par conséquent à restituer le « cycle de vie » d'un objet métallique. Né de la réduction du minerai par la volonté humaine, l'objet retourne irrémédiablement à son point de départ, le minerai, sous l'influence de l'environnement : c'est le phénomène de corrosion (du latin *corrodere*, « ronger ») qui conduit à la mort de l'objet.

Pour ce faire nous essayons de lire l'information contenue dans l'objet. Comme une langue, la matière comporte un alphabet et une grammaire. Il faut utiliser des moyens d'observation et d'analyse très perfectionnés pour pouvoir lire du macroscopique à l'ultramicroscopique, du visible à l'invisible à l'œil nu (microscope, accélérateur de particules, rayonnement synchrotron...).

Ces quelques photographies montrent une petite partie de ce travail.

Outil après sciage



Pointerolle avant et après sciage et polissage



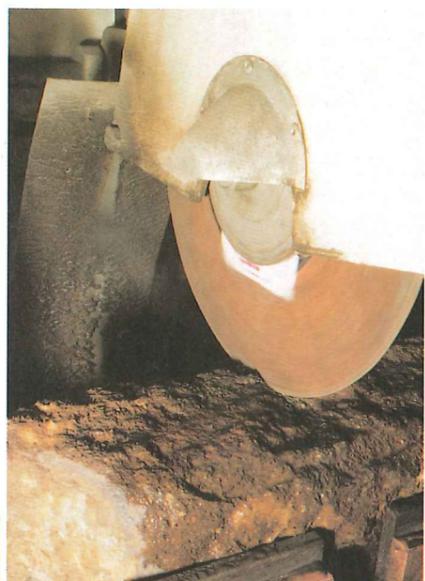
Comment analyser un morceau de métal au laboratoire ?

– Il faut commencer par prélever un échantillon et le couper.

– Il faut ensuite le préparer. C'est une opération qui peut être très longue.

Pour pouvoir observer la structure d'un métal, il faut le polir avec des abrasifs de plus en plus fins (particules de diamant de 1 micromètre*) afin d'obtenir une surface aussi lisse et réfléchissante qu'un miroir. Suivant la taille de l'échantillon, cette opération peut prendre plusieurs heures.

Fragment d'objet en cours de sciage



Vue d'un fragment d'objet en cours de polissage



Avant de passer au microscope ou à l'analyse, de nombreux traitements chimiques sont parfois encore nécessaires. Les merveilles de la matière organisée ainsi que ses défauts apparaissent sous le microscope à des grossissements de plus en plus forts de 1 à 1 000 000 en fonction du microscope utilisé.

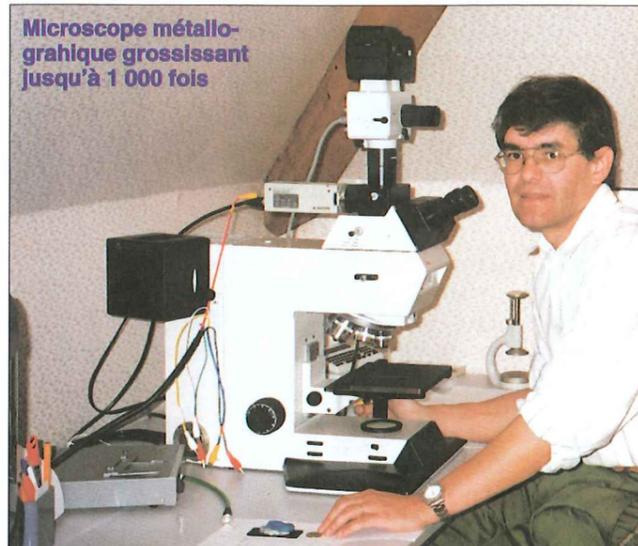
Chaque structure comporte des éléments d'information sur l'histoire de la vie du matériau : son origine, la manière dont il a été élaboré, utilisé, transformé, et la façon dont il a vieilli.

* Un micromètre est égal à un millionième de mètre.

Lingot de fer en cours de sciage



Microscope métallographique grossissant jusqu'à 1 000 fois



Un acier trempé au microscope

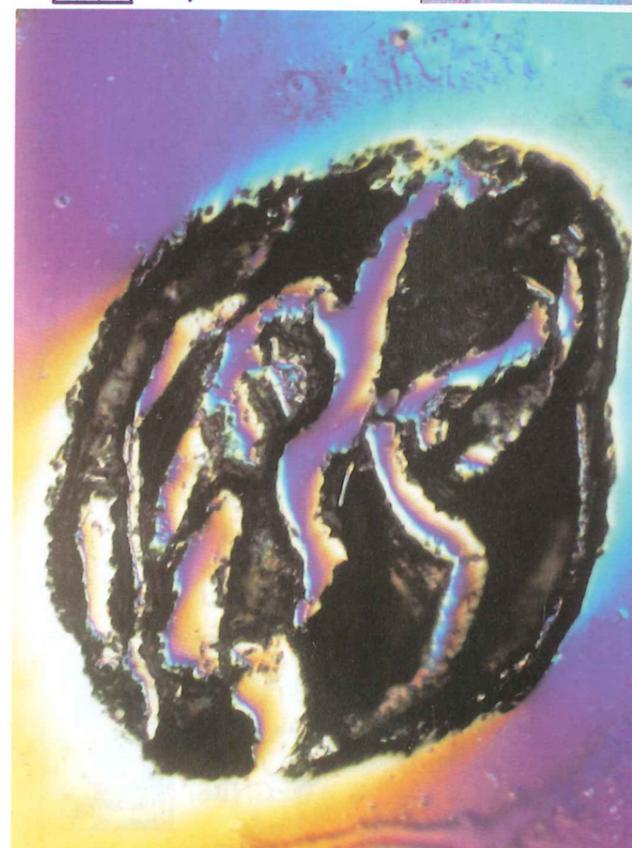
50 μm

Voici quelques exemples de la structure d'un acier composite du XVI^e siècle.



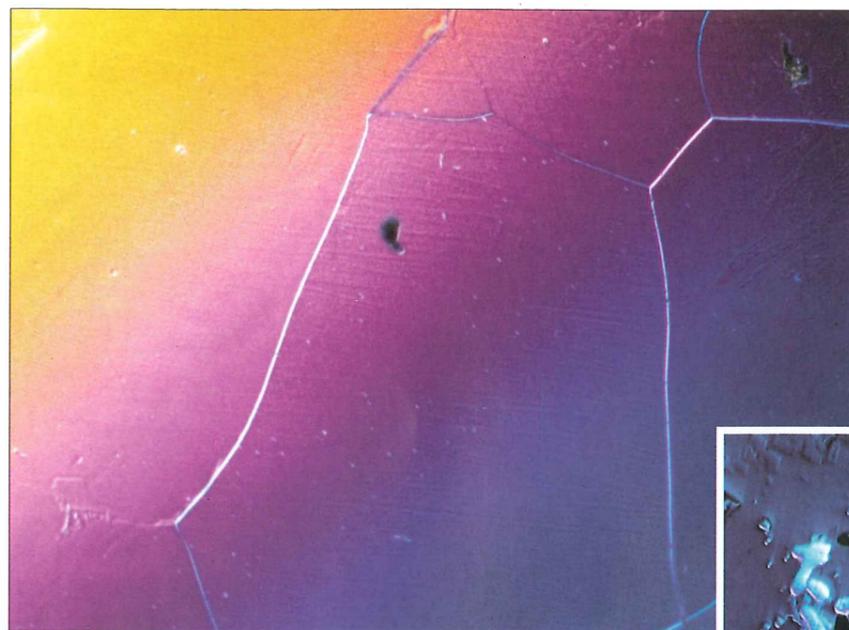
L'épuration au microscope

100 μm

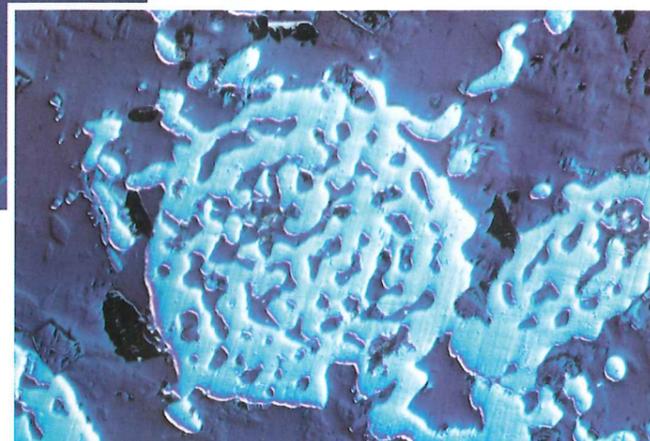


La fonte au microscope 30 μm



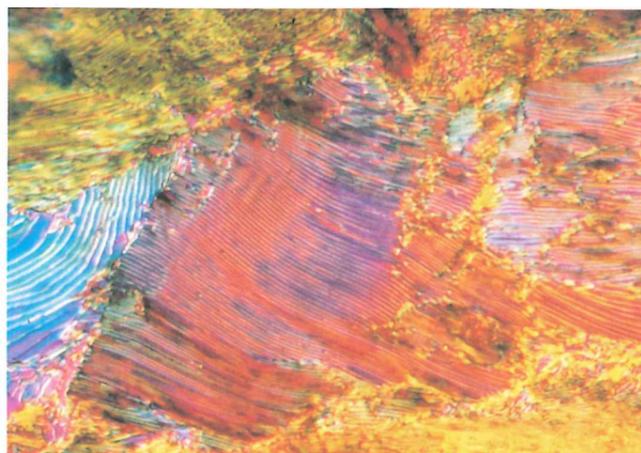


Le fer pur au microscope
50 µm



La réduction du minerai oolithique au microscope 50 µm

L'acier à 0,8 % de carbone au microscope 30 µm



Reportage de Philippe FLUZIN,
directeur de recherche au CNRS
(Unité propre de recherche A0423
CNRS)



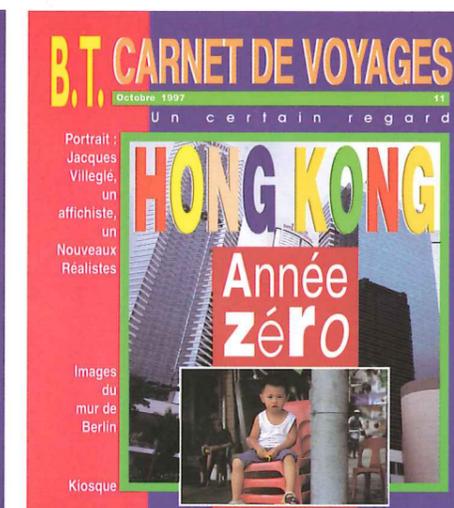
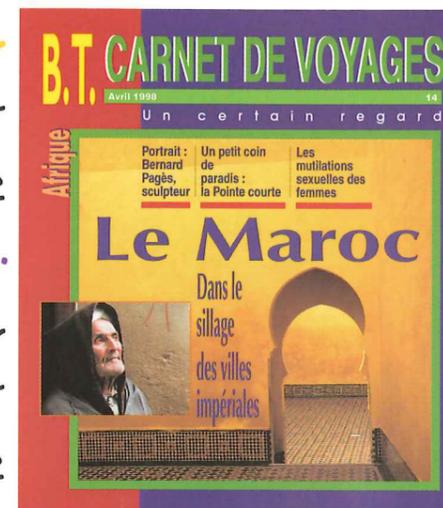
D é c o u v r i r l e m o n d e

Parcourir le monde pour mieux l'écouter,
le regarder et le **comprendre**
est la vocation de Carnet de voyages.
Devenue tribu pour les uns,
ou no man's land pour les autres,
la planète nous cache encore des terres
et des langages insoupçonnés.

Voir
simplement
le monde
qui bouge.

Voir
simplement
le monde
qui change.

Carnet de
voyages
l'écrit.



CARNET DE VOYAGES

un certain regard