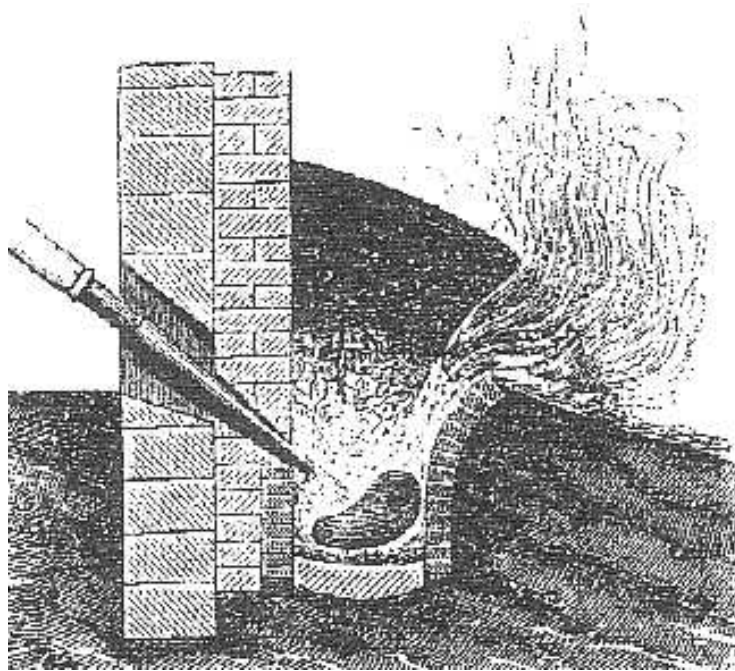


LORSQUE RONFLAIENT LES FEUX CATALANS



A juste titre, le fer mérite d'occuper la première place parmi les métaux. Non seulement il est le plus répandu dans la nature mais encore le plus utile. Jamais sans lui la révolution industrielle du 19^{ième} siècle n'aurait pu se développer. Les chiffres parlent d'eux-mêmes : de l'ordre de 800.000 tonnes en 1800, la production mondiale de fer passe allégrement le cap des 30 millions de tonnes à la fin du siècle, soit trois millénaires et demi après les premiers balbutiements de sa métallurgie, au sud du Caucase.

Certains peuvent se demander pourquoi pendant si longtemps, disons pour faire bref de 1000 ans avant J.C. à la fin du moyen-âge, la métallurgie ne connut pas de progrès très significatifs et le fer demeura une denrée rare. En fait c'est la question inverse qui est pertinente : par quel prodige des hommes sans connaissances théoriques, sans instruments de mesure, presque sans outils, ont-ils réussi la réduction des minerais de fer ?

Pour ne pas surcharger les parties "historiques" il m'apparaît opportun de rassembler dans un premier et court chapitre les aspects théoriques de la métallurgie du fer, du moins telle que la pratiquaient nos lointains ancêtres dans leurs "bas fourneaux", ce qui permet non seulement de souligner la complexité du phénomène mais aussi de rendre hommage à leur savoir faire.

1 – DEUX OU TROIS CHOSES QU'IL FAUT SAVOIR

Si le problème est ardu à résoudre, il peut s'énoncer en termes simples : « Voici du charbon de bois, voici du minerai de fer, faites-moi du fer métallique. » Inutile de

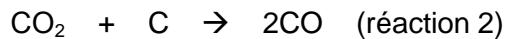
préciser que la plupart de nos contemporains, même les plus convaincus de l'*obscurantisme* des temps anciens peuvent en rester cois, sans parler de quelques chimistes.

Le minerai en question consistait presque toujours en oxyde de fer ferrique (Fe_2O_3) jamais totalement pur, les impuretés constituant la gangue. Techniquement il fallait s'arranger pour provoquer, conduire et maîtriser de façon concomitante les réactions suivantes :

- ▶ Combustion (oxydation) du carbone :



- ▶ Réduction du gaz carbonique par le carbone incandescent :



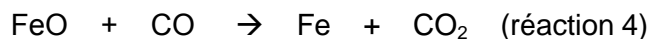
- ▶ Réduction de l'oxyde ferrique en oxyde ferreux :



Ici apparaît une difficulté spécifique. Le minerai n'est jamais pur et contient généralement de la silice contenue dans la gangue. Une partie du FeO produit réagit en pure perte avec elle pour donner un silicate de fer facilement fusible, appelé scories ou laitier.

Certains métallurgistes romains découvrirent assez tôt un secret : ajouter au minerai un peu de calcaire, appelé "castine", ce qui a pour effet d'entraîner la silice sous forme d'un silicate double d'aluminium et de calcium, économisant d'autant le précieux FeO. Malheureusement, cette découverte capitale, non seulement ne fut pas généralisée dans l'Antiquité, mais se perdit pendant plusieurs siècles.

- ▶ Réduction de l'oxyde ferreux en fer :



A part le fer, toujours impur, qu'il est nécessaire de traiter mécaniquement à chaud (cinglage) on obtient des scories, généralement riches en fer, abandonnées sur place et qui présentent un intérêt archéologique remarquable car elles renseignent en partie sur les procédés et les conditions opératoires mis en œuvre. Ainsi, une faible teneur en fer peut indiquer qu'un fondant (castine) fut utilisé.

Bien entendu l'oxygène nécessaire à la réaction 1 provenait de l'air. Il convenait donc de prévoir une ventilation qui pouvait être soit naturelle et aléatoire (vent) soit forcée, ce qui deviendra rapidement la règle. En effet l'ajustement du débit de l'arrivée d'oxygène constitue un paramètre essentiel. Il faut qu'il soit :

- Suffisant afin d'obtenir une température relativement élevée (1100 –1200 °C)¹ nécessaire à la réalisation de l'ensemble du processus.
- Non excessif afin de ne pas opérer en milieu trop oxydant, au risque de voir disparaître tout le carbone sous forme de CO₂.

A cet égard il convient d'observer que l'oxygène représente pratiquement le seul réactif ajouté en cours d'opération et donc le seul à permettre de régler l'allure de celle-ci. La maîtrise de débits de ventilation de plus en plus élevés conduira à l'évolution de la technologie jusqu'à la réalisation des hauts fourneaux et de la fonte, d'abord en Chine dès 300 ans avant J.C. puis beaucoup plus tard en occident, à partir du 15^{ième} siècle.

Pour être complet il faut ajouter que l'arrivée de l'air devait avoir lieu dans un système réactionnel (charbon +

minerai) préparé, proportionné et organisé de telle sorte que les réactions 1 à 4, toutes en hétérogénéité de phase (gaz / solide) puissent se produire. Tout ceci, répétons-le, un millénaire et demi avant notre ère. On peut applaudir.

2 - LE FER AU COMPTE-GOUTTES

Les rares métaux susceptibles d'exister à l'état natif furent les premiers à être mis à contribution :

- Le cuivre, dès le néolithique, environ 8000 ans avant J.C. Ce métal présente l'avantage de fondre à relativement basse température (1083 °C) et de pouvoir être coulé.
- L'or.
- Le fer météorique (utilisation à partir de 3000 ans avant J.C.). Ce fer présente la caractéristique de contenir environ 10% de nickel. Il est possible de rencontrer des blocs de plusieurs dizaines de kilogrammes.

Vers 2000 ans avant J.C. l'Égypte réalise une découverte de première importance : le bronze, alliage de cuivre avec environ 10% d'étain, que l'on peut fondre et couler comme le cuivre, mais nettement plus résistant que lui à l'état solide. Un marché étendu de l'étain (relativement rare) s'organise dès cette époque.

Enfin, pour en venir à notre propos, les premiers ateliers de fabrication de fer à partir de minerai apparaissent au sud du Caucase, approximativement vers 1500 ans avant JC.

Il serait passionnant de savoir comment l'idée de réaliser cette opération a pu germer dans les cerveaux des premiers métallurgistes. Malheureusement nous n'en savons rien et l'on doit se contenter de l'hypothèse la plus

probable : en construisant par hasard un foyer avec des blocs de minerai de fer, de petites loupes de métal se seraient formées, provoquant ainsi un processus de recherche empirique. On pense aussi que les tout premiers foyers métallurgiques devaient être très rudimentaires : une simple cavité aménagée dans la terre ou dans le rocher, au creux de laquelle s'empilaient quelques couches de bois très sec et de minerai, avec un résultat forcément aléatoire.

Il est significatif d'observer que ces réalisations initiales suivent de très près la production des premières céramiques qui exigeaient pour leur cuisson une température continue de l'ordre de 1100 °C. L'obtention et le maintien d'une telle température constitue d'ailleurs une référence car outre la cuisson des "terres à feu" elle permet également la fusion du cuivre et du bronze ainsi que la métallurgie primitive du fer, y compris son travail à la forge².

En Grèce, huit siècles avant J.C. les métallurgistes formaient une élite de la société ; Héphaïstos était un Dieu (les latins en feront Vulcain). La technologie des bas fourneaux présentait déjà les traits caractéristiques qu'elle allait conserver pendant près de 2600 ans :

- Utilisation d'un minerai de fer (oxyde de fer ferrique) très riche. Etant donné l'absence de tout moyen d'analyse, l'aspect physique retenait l'attention des mineurs : roche rouge foncé ou brun sombre, de densité élevée, ne comportant pas ou peu de parties blanchâtres (gangue) et brillante lors de la cassure.
- Usage de charbon de bois, obtenu par combustion ménagée dans des "meules" recouvertes de terre.
- Mise en œuvre d'une ventilation mécanique forcée et continue à l'aide de soufflets réalisés initialement en

peau de chèvre et actionnés à pied d'homme. Une paire de soufflets assurait en pratique la continuité du "vent" dirigé à la base du foyer.

Au début, on obtenait une "loupe" spongieuse de seulement un à deux kilogrammes qu'il fallait immédiatement cingler, c'est-à-dire marteler à chaud pour en chasser les scories liquides et rassembler tout le fer en masse compacte.

Le procédé consommait en poids beaucoup plus de charbon que de minerai (le double en moyenne). Aussi le fer n'était-il produit que dans les régions riches en bois ce qui explique que le bronze se maintint longtemps dans les pays peu boisés. Par exemple, lors de la conquête de la Gaule, les Gaulois se battaient avec des épées en fer face à des Romains armés d'épées en bronze, en fait bien supérieures. Au plus fort de la mêlée, certains Gaulois devaient arrêter le combat pour redresser leur épée tordue sur leur genou. Fer ne veut pas dire acier.

Pendant longtemps, le fer va demeurer un matériau rare et cher. Ainsi, la pratique de ferrer les chevaux ne commencera à se développer qu'à l'époque de Charlemagne. Cependant, dès le début de notre ère, un procédé original prend naissance en Italie, plus exactement dans l'île d'Elbe, riche en minerai d'oxyde ferrique de très bonne qualité (oligiste cristallisé en rhomboèdres brillants). Ce type de traitement passera d'abord en Corse, puis en Espagne, de là enfin dans les Pyrénées orientales. Il y atteindra à partir du 16^{ième} siècle un tel degré de perfection qu'il est resté dans l'histoire sous le nom de feu catalan ou de forge à la catalane.

Trois améliorations notoires marquent dès le départ, il y a environ 2000 ans, l'essor du feu catalan (en fait sur l'île d'Elbe) :

- Constitution, au bas du foyer, d'un creuset ayant un triple but : allumer le feu, recueillir la loupe de fer et permettre l'évacuation des scories par un orifice initialement obturé par un bouchon d'argile.
- Diriger, à l'aide d'une lance de cuivre, un vent continu immédiatement au dessus du creuset et donc au dessus de la loupe.
- Répartir le minerai et le charbon non plus en strates horizontales mais en deux colonnes verticales : le charbon côté lance et le minerai du côté opposé.

Avantages :

- Economie de charbon et de ventilation.
- Possibilité d'obtenir une loupe plus conséquente et jusqu'à 6Kg de fer par opération (au départ).
- Le fer ainsi produit contient souvent un peu d'acier (fer aciéreux) ce qui favorise l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques.

Peu à peu, à partir du 12^{ième} siècle un nouveau progrès commence à se diffuser : l'utilisation de la force hydraulique non seulement pour manœuvrer les marteaux nécessaires au cinglage de la loupe (les martinets) mais également pour actionner les soufflets, permettant d'augmenter le débit du "vent" sans provoquer l'épuisement trop rapide des ouvriers.

De ce fait, à partir de cette époque et compte tenu de l'état calamiteux des moyens de transport, les installations vont se concentrer sur des sites réunissant trois conditions indispensables :

- Un minerai très riche.

- Des forêts pour produire le charbon de bois.
- Un cours d'eau susceptible de fournir l'énergie motrice nécessaire aux martinets et aux soufflets, puis plus tard aux bocards et aux trompes³.

Tel est précisément le cas des Pyrénées, notamment de leur partie constituée actuellement par le département de l'Ariège (mine du Rancié, vallée du Vicdessos par exemple).

L'importance et la régularité de la ventilation demeurant l'un des problèmes cruciaux de cette technologie, une innovation très caractéristique du "feu catalan" apparaît à la fin du 17^{ième} siècle : la trompe. Il s'agit en fait d'une invention pragmatique italienne dont l'étude théorique sera réalisée plus tard par Giovanni Venturi (1746 – 1822). Le principe en est le suivant : dans une conduite verticale de 8 à 9 mètres de hauteur et d'environ 0,6 m² de section on fait circuler de l'eau (provenant d'un bief construit au niveau de son orifice supérieur). En partie haute de ce tube (ou trompe) se trouve un étranglement percé de quelques trous communiquant avec l'atmosphère. Une certaine quantité d'air est ainsi aspirée dans le tube et dégringole avec l'eau en écoulement biphasique et à pression croissante jusqu'au bas de la trompe dont l'orifice inférieur est raccordé à une boîte de décantation étanche. L'eau s'échappe vers l'extérieur par un orifice inférieur strictement calibré (pour éviter une chute de pression) et l'air comprimé est prélevé à la partie supérieure pour être dirigé vers la lance. Outre son rôle de séparateur de phases, la boîte inférieure permettait, eu égard à son volume tampon, d'obtenir un vent d'une continuité quasi parfaite.

A noter que compte tenu de son mode de production, l'air comprimé fourni par la trompe était saturé en vapeur

d'eau, ce qui provoquait dans le foyer l'apparition d'une petite quantité de gaz à l'eau ($\text{CO} + \text{H}_2$) favorable à la réduction des oxydes de fer.

La trompe étant une invention italienne, on en retrouvait des exemplaires similaires sur le même principe – à quelques détails de réalisation technique près – non seulement dans le Piémont mais également dans le Dauphiné.

Quoi qu'il en soit la "trompe pyrénéenne" devint au 18^{ième} siècle le symbole le plus emblématique du feu catalan.

3 – UNE JOURNÉE DE TRAVAIL À LA FORGE CATALANE

Au 18^{ième} siècle la production de loupes de fer au feu catalan s'opérait en discontinu (nous dirions aujourd'hui en batch) ; une opération suivait l'autre, et la forge ne s'arrêtait pas. Comme un "feu" durait six heures, chaque établissement disposait de deux équipes assurant deux postes par jour séparés par six heures de repos, soit douze heures de pénible travail par jour :

➤ **premier temps.** Pendant que l'on cinglait la loupe qui venait de sortir du feu, deux ouvriers (l'escola et son aide) nettoyaient le creuset des charbons incandescents (précieusement conservés) et des scories encore présentes.

➤ **deuxième temps.** Les braises récupérées étaient replacées dans le creuset pour assurer l'allumage du feu suivant.

➤ **troisième temps.** La charge (400 Kg de minerai et 600 Kg de charbon) était répartie avec précaution dans le foyer, le charbon contre le mur équipé de la lance à air (les

porges) et le minerai concassé contre le mur opposé (l'ore). La surface de contact entre les deux solides devait être établie avec le plus grand soin à l'aide d'une pelle plate.

➤ **quatrième temps.** La partie supérieure du foyer était alors recouverte, d'abord d'une mince couche de minerai puis d'une couche de poussier de charbon humide, appelé brasque, que l'on s'appliquait à bien tasser.

➤ **cinquième temps.** Un cri : « Donne le vent, donne ! » En agissant sur une corde, l'aide libérait un clapet pour permettre à l'eau du bief de s'engouffrer dans la trompe.

Et c'était parti....*alea jacta est*. Le succès ne pouvait jamais être garanti et l'échec d'une seule opération représentait une perte financière catastrophique.

Par une ouverture latérale ménagée au-dessus du creuset, l'escola surveillait anxieusement la formation et l'évolution de SA loupe (lou massé) en intervenant si nécessaire avec un ringard. Il aidait son développement en regroupant les petites boules de fer (principes) qui se constituaient. Si un excès d'air tendait à la compromettre (par oxydation) il la protégeait par projection d'un peu de minerai finement divisé. Lorsque les scories (ou laitier) menaçaient d'envahir un peu trop le creuset, il fallait vite déboucher le trou prévu à cet effet (le chio) afin de les laisser s'écouler, puis reboucher avec de l'argile.

En fin d'opération, si tout s'était bien passé, une loupe aveuglante d'environ 150 Kg reposait sur le fond du creuset (la cave). L'en extraire n'était pas une manœuvre de tout repos. Bien souvent elle accrochait et il fallait la détacher en suant sang et eau à l'aide d'un ringard passé dans le trou du chio. Enfin avec des crochets elle était amenée toute chaude sous le martinet afin de la cingler pour la transformer en fer marchand, prêt à être découpé

en lopins. Seulement 30% en moyenne du fer initialement contenu dans le minerai se retrouvait sous forme commercialisable.

Mais déjà, la seconde équipe avait nettoyé le creuset et chargeait le fourneau...

De nos jours personne, pas même les travailleurs – travailleuses d'Arlette, n'accepterait d'être soumis à un labeur aussi épuisant. Heureusement, si l'on peut dire, les périodes de chômage n'étaient pas rares, parfois par manque de charbon de bois mais plus souvent en raison d'absence ou d'insuffisance d'eau, surtout en été.

Tout ce travail comportait aussi sa récompense : le fer ariégeois était de très haute qualité. Légèrement aciéreux, allié avec un peu de manganèse, mais surtout pratiquement exempt de soufre et de phosphore, sa renommée grimpera au zénith lorsque les techniques de cémentation, pour la production de l'acier, commenceront à se propager.

4 – L'EXTINCTION DES FEUX

Une légende, fausse mais tenace, veut que l'arrivée des hauts fourneaux ait fait disparaître les forges à la catalane. Nous verrons que ce n'est pas à eux mais au puddlage de la fonte que l'on doit imputer cette disparition.

Par la force des choses, la mise en œuvre de débits de ventilation toujours plus élevés, afin d'augmenter le rendement par opération, conduisit à la construction de fourneaux toujours plus imposants et, partant, de plus en plus hauts. Corrélativement les températures moyennes et maximales de fonctionnement du système allèrent croissant, jusqu'au jour où...les opérateurs virent à leur étonnement le fond du creuset se remplir non d'une loupe mais d'un métal liquide. Au départ son intérêt échappa aux

sidérurgistes qui le nommèrent le “mauvais fer”. Pourtant ils s’aperçurent vite que ce nouveau matériau pouvait être fondu et coulé comme le bronze et son emploi se généralisa, sous le nom de fonte. A titre d’exemple, à partir du 15^{ième} siècle, toutes les cuisines s’équipèrent progressivement de la célèbre marmite en fonte.

Les hauts fourneaux (puisqu’il faut les appeler ainsi) présentaient un intérêt tout particulier : moyennant un soutirage régulier de la fonte et des scories, associé à une alimentation en charbon et minerai par le haut (le gueulard) leur fonctionnement devenait continu durant deux mois. De ce fait, tandis qu’un feu catalan produisait péniblement 300 Kg de fer par jour, un haut fourneau à la même époque pouvait cracher 2 à 4 tonnes de fonte.

Le gros problème, qui mettra 300 ans pour trouver sa solution (et encore provisoire) concernait le passage de la fonte au fer⁴. En attendant, cette transformation s’opérait dans des bas fourneaux en milieu oxydant, donc en excès d’air, afin de décarburer la fonte. A partir de 100 Kg de gueuse de fonte on obtenait 80 Kg de fer en brûlant 70 Kg de charbon de bois. Économiquement parlant, la méthode directe continuait à tenir la route. Elle trouvera même avec la découverte de la cémentation un soutien inattendu.

La cémentation se développe en Angleterre à partir du 17^{ième} siècle. Cette technique consiste à carburer légèrement le fer pour le transformer en acier. Elle exige un métal de départ très pur (fer suédois, fer des Pyrénées) ; en particulier la présence de soufre, de phosphore ou pire encore des deux, interdit la réalisation d’aciers fins. La France va patauger près de 150 ans avant de parvenir à imiter les Anglais, en dépit des moyens importants mis en oeuvre⁵. On ira jusqu’à débaucher au prix fort des Anglais et des Italiens dont la plupart se révéleront à l’usage de bons charlatans mais de piètres sidérurgistes. Ce n’est qu’à la suite d’une mission en

Angleterre effectuée par Gabriel Jars en 1765 que l'industrie de la cémentation commencera à décoller en France sur des bases à peu près saines.

Alors que la découverte de la cémentation avait eu un effet somme toute bénéfique pour les bas fourneaux en général et les forges à la catalane en particulier, celle du puddlage due à deux Anglais, Peter Onions et Henry Cort en 1783 – 1784 va leur porter un coup fatal. Cette technique consiste à remuer, dans un four à réverbère, une flaque (*puddle*) de fonte en fusion en milieu oxydant pour la décarburer, la décarburation étant facilitée par l'adjonction de scories riches en oxydes de fer ; par exemple :



Des flammes bleues s'élevaient à la surface de la fonte bouillonnante, au fur et à mesure que le fer "prenait nature".

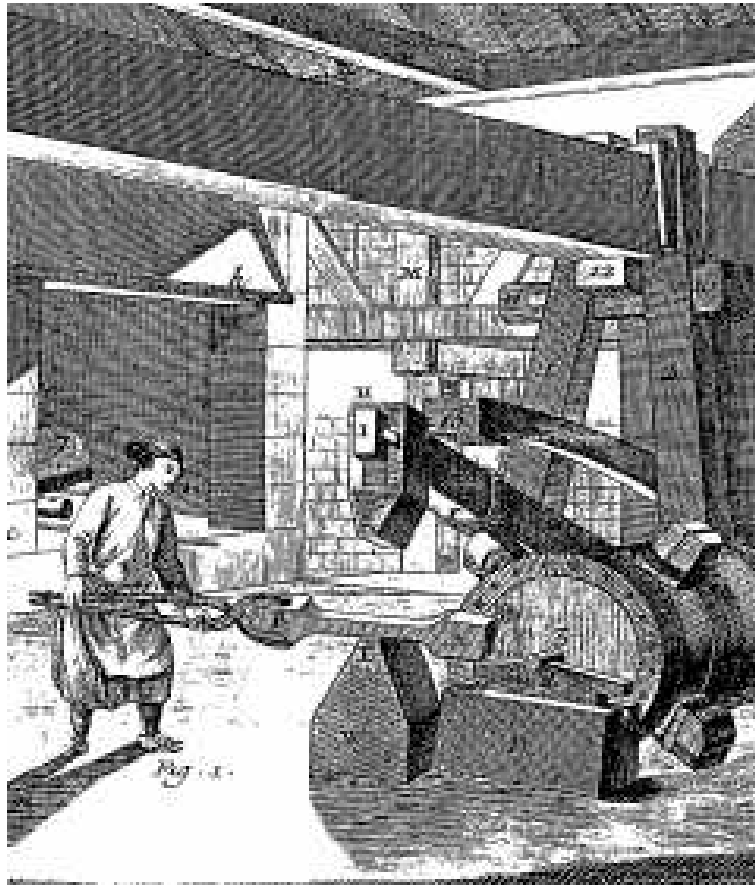
La production journalière d'un seul four de puddlage équivalait à celle de 8 à 10 feux catalans ! Balayés par une telle concurrence, ils s'éteignirent l'un après l'autre au cours du 19^{ème} siècle.

Et pourtant... le culte de nos *racines* a presque ressuscité, sous la forme d'un musée, l'un de ces ateliers mythiques, à Montgailhard, sur l'Ariège (tout près de Foix). Un site très intéressant et que je vous conseille de visiter en assure la promotion :

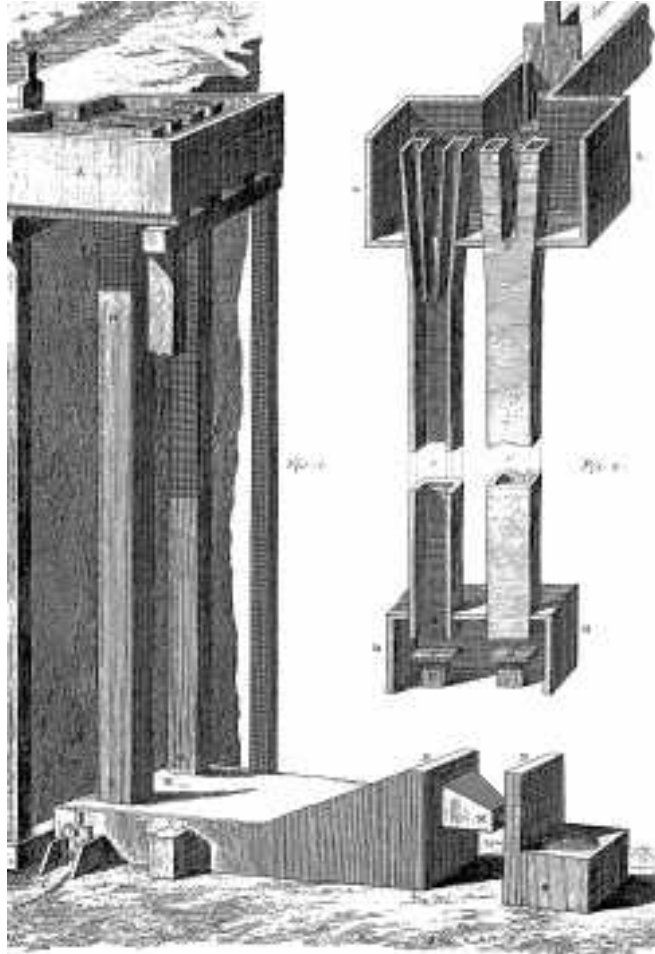
<http://www.ac-toulouse.fr/ariege-education/stages/forges/accueil.htm>

NOTES

1. Par comparaison la température la plus élevée dans un haut fourneau moderne, au niveau des étalages, voisine les 2000°C.
2. Compte tenu de sa température de fusion élevée (1536°C) le fer ne pouvait être fondu. Cependant, dès 900 – 1000°C il devient malléable et peut être travaillé au marteau et à l'enclume.
3. Pour les instruments animés d'un mouvement alternatif, tels que martinets, soufflets, bocards (masses pour concasser le minerai) le principe consistait à mettre en rotation un cylindre horizontal muni de cames, à l'aide d'une roue hydraulique. L'arbre à cames de nos automobiles est donc une invention médiévale.
4. De façon très générale, selon leur teneur en carbone, on rencontre les produits suivants :
 - fer doux : pratiquement 0
 - acier doux : inférieure à 0,5%
 - acier dur : entre 0,6 et 1,5%
 - fonte blanche : environ 2%
 - fonte grise : environ 4%
5. L'ouvrage publié par Réaumur en 1722 (*L'art de convertir le fer forgé en acier*) n'a fait qu'égarer les industriels. Il y prétendait que l'acier contient des principes sulfurés et salins ce qui est faux. Les Anglais utilisaient une poudre de cémentation constituée de poussier de charbon de bois pur.



LE MARTINET



TROMPE PYRÉNÉENNE