

CAHIERS DE L'INDUSTRIE DU FER

CAHIER N° 4.

# Évolution des techniques de production du fer

*Élaboré à partir de l'exemple des forges de Paimpont (Morbihan)*

Gérard DALSTEIN



# CAHIERS DE L'INDUSTRIE DU FER

## CAHIER N° 4

Gérard DALSTEIN

## DU MÊME AUTEUR

- **Les chantiers du fer. Tome 1. La conquête du fond**

Prix de l'académie nationale de Metz

Éditions Serpenoise . 1992 (Épuisé. Réédition numérique en cours)

- **Les Chantiers du fer. Tome 2. L'aube des hauts-fourneaux**

Prix de l'académie de Stanislas. Nancy

Éditions Serpenoise. 2001

- **Les Chantiers du fer. Tome 3. L'épopée des forges**

Éditions Serpenoise. 2002

- **Les feux d'Eden.**

Grand prix international « mémoire de la mine » de la société des poètes et artistes de France

Éditions Paroles de Lorrains. 2011

(En préparation)

- **Vert, Rouge, Ébène. Volume 1 « Aux Vauziers »**

CAHIER N° 4.

# Évolution des techniques de production du fer

*Élaboré à partir de l'exemple des forges de Paimpont (Morbihan)*

Gérard DALSTEIN

Ce cahier destiné au grand public a été réalisé dans le cadre des travaux de recherche et de restauration des monuments industriels du site historique des forges de Paimpont qui m'ont été confiés, notamment la restauration des deux hauts fourneaux de XIX<sup>ème</sup> siècle protégés au titre des monuments historiques.

Il a été intégré au livret général destiné aux visiteurs.

Il puise ainsi toute une part de ses sources dans la réalité historique de ce site exceptionnel. Visiter cet ensemble monumental semble s'imposer à qui s'intéresse à cette partie déterminante de notre histoire, celle à laquelle nous devons nos facilités de vie grâce à nos devanciers, ces « soldats de l'industrie » pour employer une expression chère au peintre François Bonhommé.

En application des dispositions relatives à la protection de la propriété intellectuelle, toute reprise ou transcription, même partielle, est interdite sans autorisation préalable de l'auteur.

**Page de couverture :**

Composition à l'aquarelle avec l'emprunt du personnage à un tableau à l'huile de Gérard DALSTEIN.

Imprimeur :

ISBN :

# CAHIER ILLUSTRÉ DE L'INDUSTRIE DU FER

Textes et illustrations originales Gérard DALSTEIN

Le domaine des forges a joué un rôle déterminant dans l'histoire de l'humanité, et son univers est devenu titanesque au fil des siècles, consommant en moins de deux siècles des réserves d'énergies fossiles que la nature a mis des millions d'années à constituer. Après l'ère carbonifère, cadeau de cette histoire de notre planète, nous entrons, quelques millions d'années plus tard avec la seconde révolution industrielle, celle du charbon et de la vapeur, dans une période que nous pourrions nommer « l'ère carbonivore ».

Alors en 1840, en pleine expansion de cette révolution industrielle « à l'anglaise », que font donc ces hommes des forges que le célèbre peintre de l'industrie « François Bonhommé » nomme les « soldats de l'industrie » ?

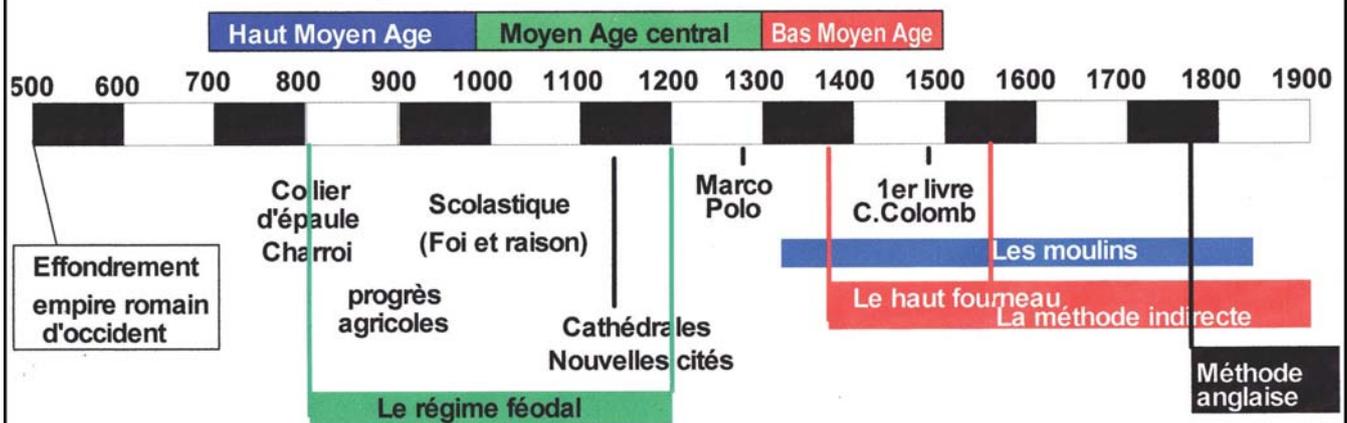
Que vivent-ils dans leurs ateliers, au haut fourneau, à la fonderie, à l'affinerie, aux laminoirs ? Comment exercent-ils des métiers qui se diversifient continuellement ? Qu'ont-ils à nous dire aujourd'hui depuis ce moment où l'Homme se tenait au centre de l'entreprise, en constituait la richesse à travers ses savoir faire, souvent dans des conditions très pénibles, c'est vrai... Mais **ils croyaient au progrès**, se battaient pour le progrès afin ne pas tomber sous les coups d'un capitalisme triomphant.

Ces quelques pages proposent un regard rapide sur leur univers pour en transmettre quelques éléments de mémoire et rendre hommage à ces devanciers auxquels nous devons des avancées techniques et sociales essentielles que nous ne savons même plus apprécier. **Ils croyaient au progrès !**

Et nous, à quoi croyons-nous en considérant tous les sacrifices auxquels ils ont du consentir, simplement pour pouvoir vivre à peu près décemment et nous permettre d'en profiter à leur suite ?

## L'AUBE DES HAUTS FOURNEAUX

Quelques repères chronologiques



Haut fourneau : Fonctionne en Chine dès l'an 400. Mais pas dans le cadre de la fabrication du fer par la méthode indirecte

Premiers hauts fourneaux occidentaux signalés en Suède vers 1350. Se développent en Belgique entre 1400 et 1500

Développement plus général en Europe à partir de 1500

Fig. 49

## LA FABRICATION DU FER

Sur notre planète, le fer n'existe que très exceptionnellement à l'état naturel du fait de son affinité chimique avec l'oxygène. (exception faite du fer météoritique et de certains nodules présents dans les fonds marins) On le trouve donc à l'état d'oxydes dont le plus commun à nos yeux se présente sous la forme de rouille. Ainsi le minerai de fer est constitué d'une multitude de particules d'oxydes de fer noyées dans une roche calcaire ou siliceuse que l'on nomme la gangue.

Pour bien comprendre la métallurgie du fer, il est nécessaire de distinguer en premier lieu trois métaux aux propriétés différentes, que l'on confond encore trop souvent, en tous cas pour le fer et l'acier, métaux pourtant issus du même atome Fer (représenté dans les figures qui suivront par un petit homme rouge). Le croquis de la Fig. 50 montre comment qualifier chaque métal –LE FER, L'ACIER, LA FONTE- à partir d'une courbe très simple faisant apparaître une teneur en carbone ! (Carbone représenté dans les figures suivantes par un petit homme noir)

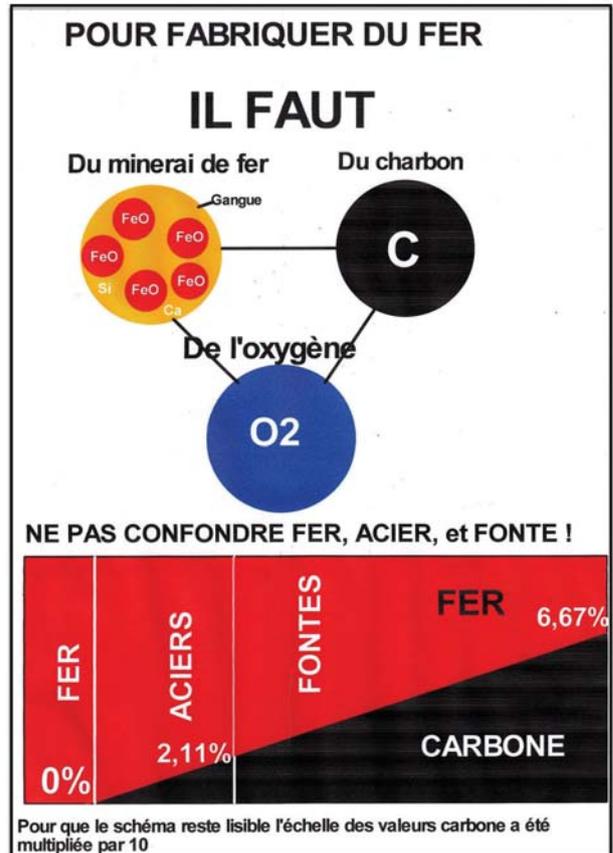


Fig. 50

Les premiers hommes de l'âge du fer ont cherché à fabriquer du fer par la méthode dite directe, car ils obtenaient directement ce métal à la base de petits fours qu'ils ventilaient sans relâche à l'aide de soufflets en peaux.

### La méthode directe

Chauffer du minerai à une température telle qu'il fonde, soit vers 1000°, ne permettrait pas d'obtenir du fer, mais une roche vitrifiée sans grand intérêt. Le four à fer est avant tout un appareil chimique. Bien qu'une haute température soit nécessaire pour engendrer la réaction chimique, le combustible -généralement du charbon de bois- outre qu'il va élever la température de la charge de charbon et de minerai, va surtout produire de l'oxyde de carbone, agent chimique réducteur, avide d'oxygène (oxygène représenté dans les vignettes par un petit homme bleu). Tout le secret est là !

La Fig. 51 décrit les réactions chimiques de base permettant d'obtenir du fer à partir du minerai. Les hommes de l'époque ignoraient la science de la chimie. Mais leur sens de l'observation exploité par une intelligence très pragmatique leur a permis d'obtenir et de forger ce métal que l'on peut qualifier de stratégique, et cela pendant les milliers d'années qui les séparent encore de l'apparition du haut fourneau. La production est très faible, de l'ordre de quelques kilos par jour, mais la multiplication des fours ou bas foyers dans les forêts permet de limiter un peu ce handicap. Ainsi les forgerons de l'époque, appelés également « ferrons » pourront fabriquer nombre d'outils très efficaces et...des armes. Une légende attribue même la victoire des Gaulois sur les Romains à Gergovie sur le fait qu'ils disposaient d'armes en fer forgé (car le fer seul est un métal mou et demande des opérations de forgeage pour acquérir de la dureté et de la résilience) alors que les armées romaines étaient encore équipées d'armes en bronze. La Fig. 52 présente en coupe un type des fours employé à l'époque, dont la soufflerie est actionnée à force d'homme. Mais le fer demeure un métal mou et diverses méthodes forgeage vont permettre aux forgerons de lui donner des propriétés de dureté et de résilience indispensables à la fabrication d'outils, et d'armes !

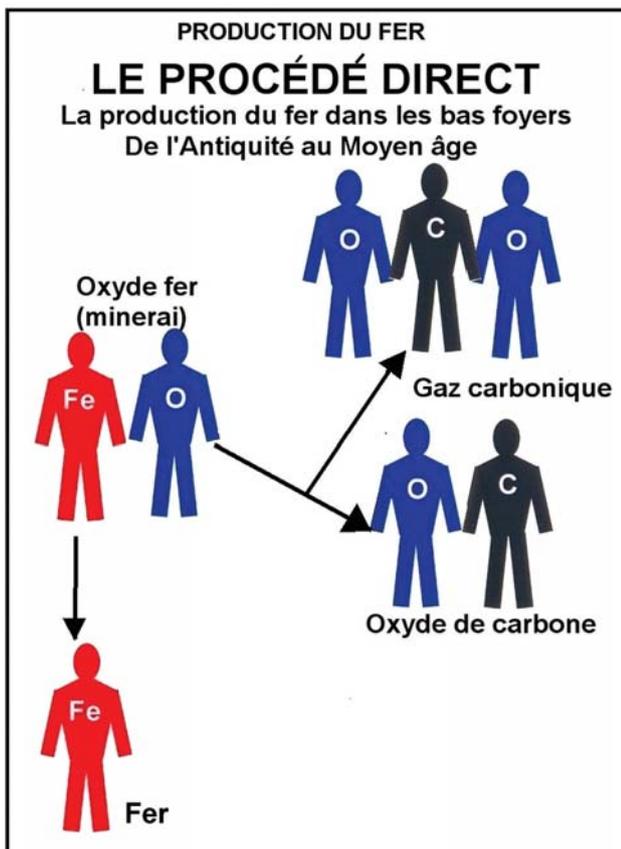
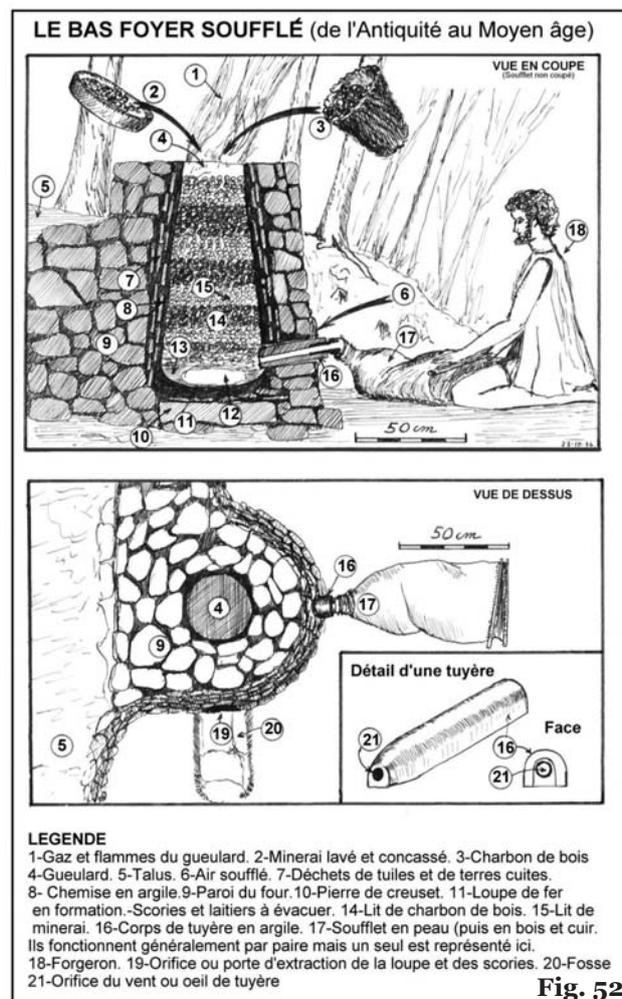


Fig. 51



La Fig. 53 schématise quelques-uns de ces procédés tandis que la Fig. 54 présente quelques exemples des différents produits qu'ils pouvaient fabriquer avec cette méthode dans la période du bas Moyen Âge, juste avant l'apparition du haut fourneau et de la production du fer par la méthode dite « indirecte ». Travail artisanal certes, mais quel beau travail !

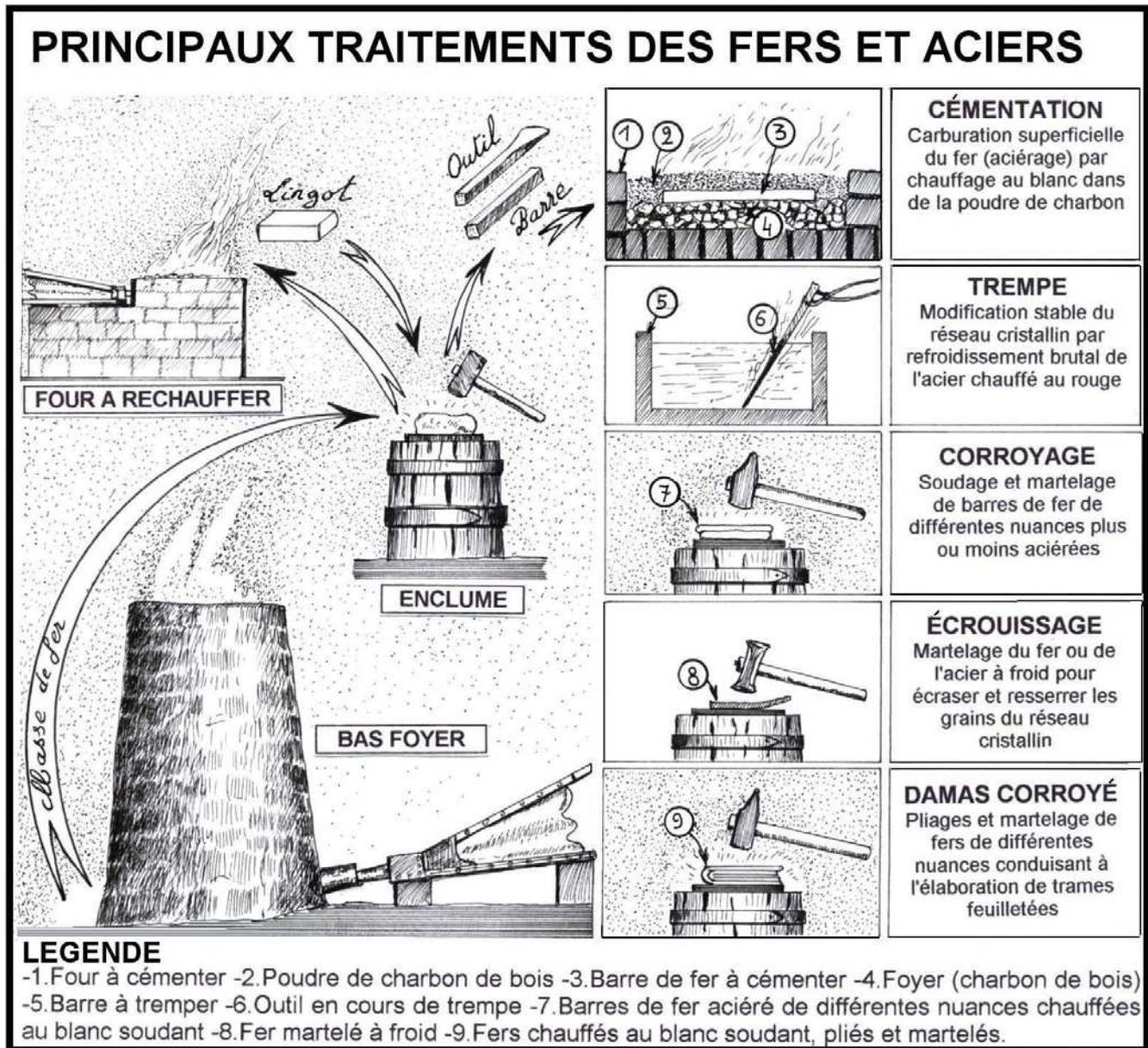


Fig. 53

*Le travail du fer au bas Moyen Age*



Fig. 54

## **La révolution industrielle et la méthode indirecte**

Ce serait faire un raccourci abusif que de lier dans un même mouvement la révolution industrielle qui se développe à la fin du bas Moyen Âge, soit au XIII<sup>ème</sup> siècle, et la naissance du haut fourneau qui va conduire à la méthode indirecte de fabrication du fer. De l'Empire romain d'Occident il ne reste que ruines vers l'an 400. Le régime féodal développe une nouvelle culture sociale bien éloignée de ce que nous ont parfois laissé nos livres d'histoire de l'école communale, d'une époque d'obscurantisme. Bien au contraire ! Les merveilles du Moyen Âge peuvent étonner, et vers l'an mille où l'on situe la grande peur de la fin du monde, les rendements agricoles ont progressé très sensiblement et il règne dans le pays une certaine prospérité.

C'est dans ce contexte où frémit la grande entreprise des cathédrales qui vont s'édifier à partir du XII<sup>ème</sup> siècle, que les châteaux dits « forts » ouvrent leurs meurtrières, que l'on réinvente la ville autour des cathédrales financées par nombre de fidèles, que le règne de la roue hydraulique va s'imposer pour remplacer et surtout largement surpasser la force humaine et animale qui prévalait pour tous les types de travaux.

Les hommes viennent d'inventer l'industrie en faisant travailler des machines pour assurer une production de plus en plus normalisée ! Désormais, le long des cours d'eau, s'égrèneront des chapelets de roues hydrauliques, premier véritable moteur capable par sa puissance et sa régularité de faire fonctionner nombre de machines. Moulins à fouler le papier, à tanner les peaux, à concasser les pierres, à polir les métaux, à marteler le fer et bien entendu à moudre le grain pour compléter le parc devenu insuffisant des moulins à vent moins productifs, du moins dans notre pays. Les moulins et les cheminées de divers fours font désormais partie d'un nouveau paysage : le paysage industriel !

Dès lors, les chantiers hydrauliques vont occuper le terrain, avec une multiplication de digues et d'étangs. Les Fig. 55 et 56 en montrent le principe général que l'on retrouve à Paimpont comme dans maints lieux de l'Hexagone.

Il est difficile de savoir à partir de quelle époque les forgerons ont eu l'idée d'employer la force hydraulique pour faire mouvoir de puissants soufflets d'une façon continue et ainsi augmenter sensiblement la température de leurs fours aux dimensions devenues plus importantes. Les premiers hauts fourneaux seraient apparus en Suède vers 1100. Mais le fonctionnement développé de cet appareil à produire la fonte (car des fours fonctionnant à la force hydraulique produisaient encore du fer. On parlait alors de « Stuckofen ») ne semble vraiment établi dans notre pays qu'à partir de la fin du XV<sup>ème</sup> siècle.

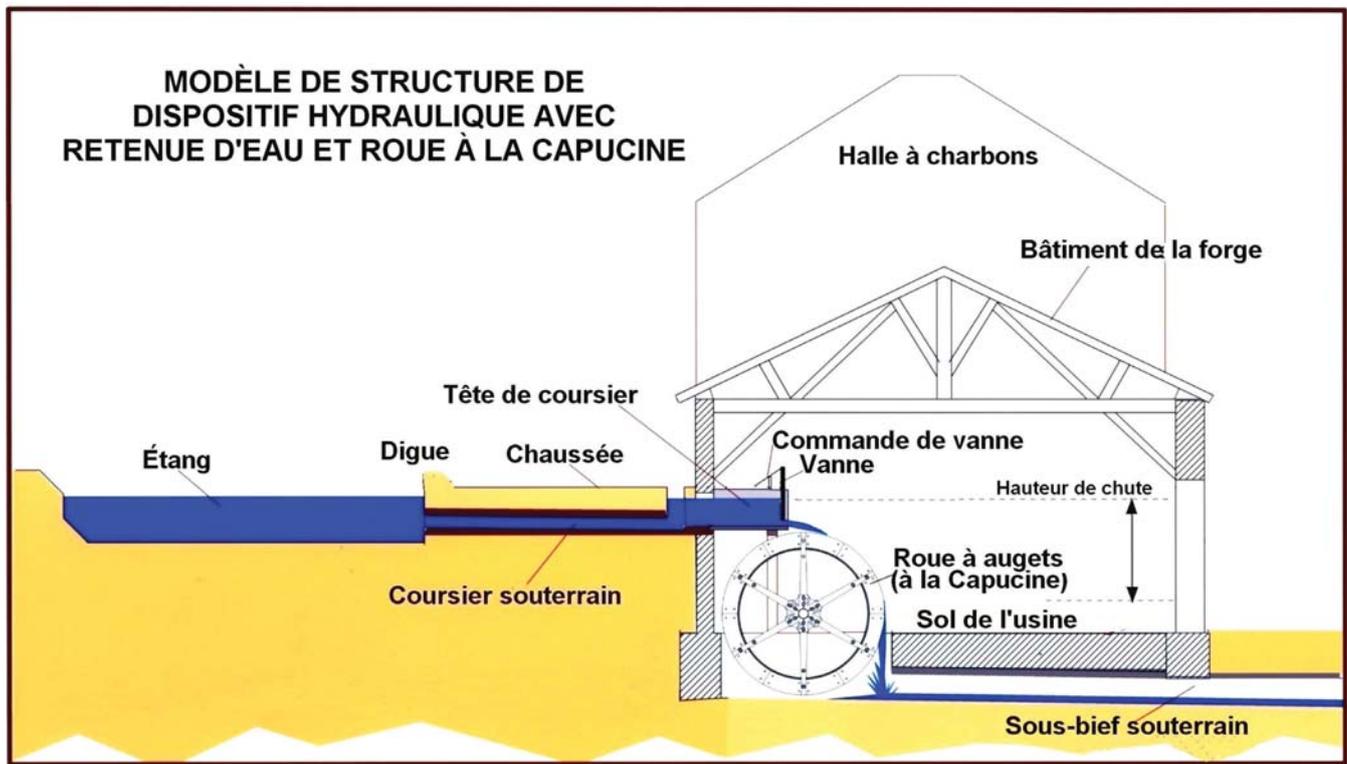


Fig. 55

La puissance développée par les souffleries fonctionnant à la force hydraulique a notamment pour effet d'augmenter sensiblement la température au niveau de l'ouvrage, dans la zone des tuyères, pour atteindre  $1500^{\circ}$ . Alors les conditions se trouvent réunies pour permettre au cœur du four une nouvelle opération chimique : un alliage d'une petite quantité de carbone au fer. Le haut fourneau vient de naître, producteur d'un nouveau métal très fusible, contenant entre 2,11 et 6,7% de carbone : LA FONTE !

La Fig. 57 propose un schéma explicatif qui ne diffère de celui de la production directe du fer que par l'introduction d'atomes de carbone au niveau des zones les plus chaudes.

On pourrait avec quelque humour, comparer cette opération à une préparation culinaire dans laquelle l'ajout d'une petite pincée de sel transformerait le goût et la consistance du plat !

Car la fonte possède des propriétés différentes de celles du fer : elle est très fusible à plus basse température (à partir de  $1150^{\circ}$ ) et se moule avec une grande finesse dans certaines nuances. En revanche, alors que le fer constitue un métal malléable qui peut se travailler par des contraintes mécaniques violentes comme le forgeage ou l'emboutissage, la fonte est cassante et supporte très mal les contraintes mécaniques qui chercheraient à la déformer (étirement, cisaillement, pliage...)

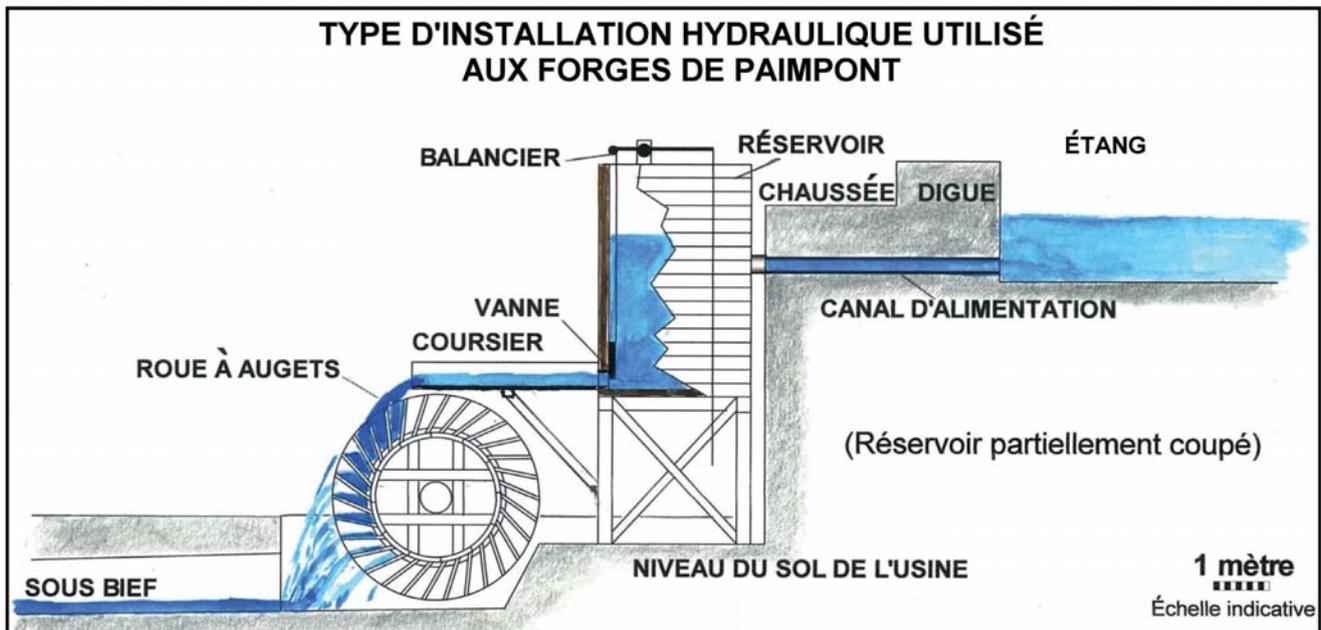


Fig. 56

Dès lors, elle va être réservée à deux emplois distincts :

- Le moulage de pièces, parfois énormes, qui n'ont pas à supporter de telles contraintes, et notamment des chocs. Ici naît l'art de la fonderie qui nous laisse de véritables chefs d'œuvre, notamment en architecture et en statuaire. Mais elle demeure particulièrement utilisée dans l'industrie pour la fonderie de bâtis de machines parfois imposantes et diverses pièces de mécanique comme les pignons. Elle entre aussi naturellement dans les cuisines à travers cuisinières, poêles, casseroles et cocottes !

- L'affinage, qui représente le plus gros tonnage. Elle va alors servir de produit intermédiaire pour être transformée en fer ou, plus tard, en acier, ce qui constitue l'essentiel de sa destination.

Alors, quel peut être l'intérêt de produire de la fonte pour la transformer ensuite en fer s'il est possible de produire directement du fer par la méthode directe ?

La méthode directe souffre de deux défauts incompatibles avec un développement industriel. Le fer n'est fusible qu'à partir de 1550° et ne se présente en méthode directe que sous une forme pâteuse qui ne permet pas de le fabriquer en grandes quantités dans de petits fours.

Pour des raisons similaires, la loupe pâteuse qui résulte de l'emploi de la méthode contient beaucoup d'impuretés (scories, charbons incomplètement brûlés, matières pierreuses mal fondues), ce qui oblige le forgeron à se livrer après l'extraction de la loupe de fer à un premier travail pénible de cinglage pour la débarrasser de ses impuretés.

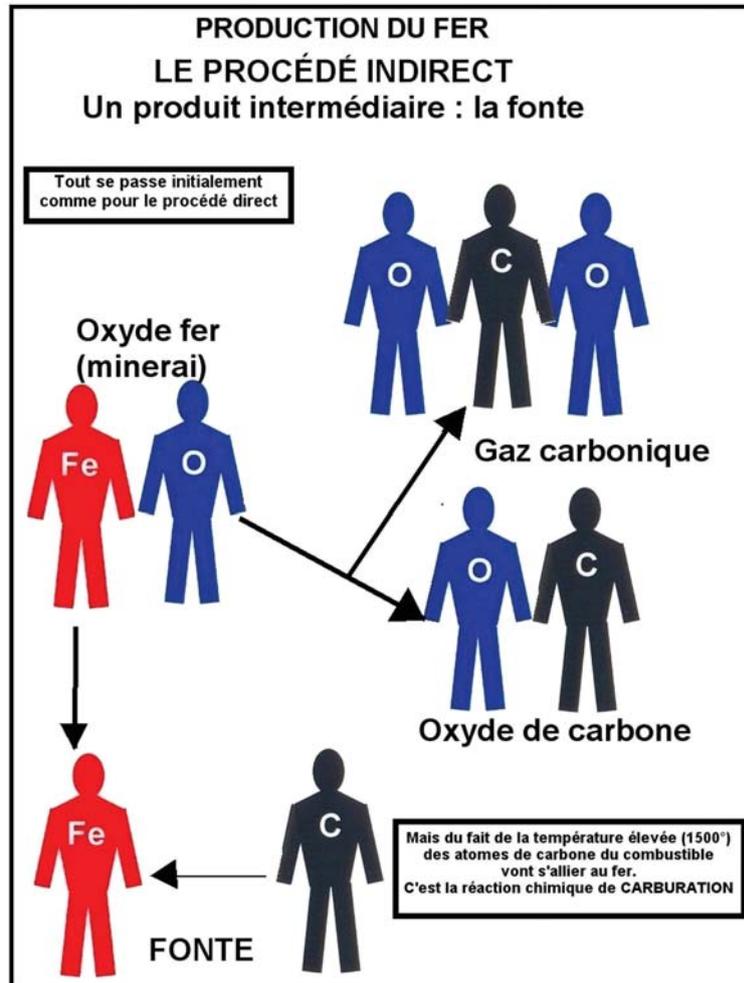


Fig. 57

La fonte, quant à elle, est homogène, liquide, et peut donc s'emmagasiner dans le haut fourneau en grandes quantités. Il suffit de la couler dans des moules appelés gueuses lorsqu'ils sont uniques (une sorte de longue barre pesant entre 700kg et une tonne) ou gueusets si la coulée est partagée dans différents moules.

De la production d'un bas foyer à méthode directe qui n'atteint que quelques kilos par jour, on passe alors avec la méthode indirecte à une production atteignant la tonne de fonte dans les premiers appareils, tonne qui sera transformée rapidement en 900 à 900kg de fer (il y a toujours une petite perte au feu). Nous ne sommes plus dans le même ordre de grandeur ! Le petit artisan forgeron qui officiait dans les forêts au milieu de ses compagnons charbonniers a changé de métier : il est devenu fondeur, un « maître du feu », souvent craint, mais respecté !

Il est probable que l'observation du fonctionnement des « Struckofen » ait pu conduire à l'idée que l'opération de transfert entre fonte et fer ne tenait qu'à un fil. Ainsi auraient pu naître les techniques de l'affinerie, ou l'art de transformer le fonte en fer. Car avec la méthode indirecte, tout ou presque de la capacité industrielle de production du fer va tenir dans la compétence des métallurgistes à concevoir des appareils et des méthodes pour opérer cette transformation dans des conditions de rentabilité en rapport avec le marché. Mais intéressons nous tout d'abord au haut fourneau, appareil de base de la méthode indirecte.

## Les Hauts Fourneaux

Une des spécificités des Forges de Paimpont est de pouvoir présenter au public deux hauts fourneaux qui se situent à une époque charnière de l'histoire de la métallurgie du fer, à savoir celle du passage de la méthode traditionnelle qui a prévalu depuis la naissance du haut fourneau, à la méthode dite « anglaise » en raison de son origine, méthode qui bouleverse considérablement les modes de production depuis son introduction en France, par exemple au Creusot dans la Loire comme à Abainville dans la Meuse, et cela dès 1820 .

Au vu des plans de 1820 conservés aux Archives nationales, il a été réalisé deux hauts fourneaux à bois mitoyens. (Fig. 58) Puis en 1842, l'un d'eux a été détruit et reconstruit à une dizaine de mètres sur un modèle plus moderne pouvant fonctionner au coke et se trouvant dès-lors en phase avec les appareils de la « forge à l'anglaise » qu'il va alimenter. Fours à puddler, marteaux frontaux ou squeezers, laminoirs et machines à vapeur peupleront désormais l'univers des halles de la sidérurgie. Pourtant, de la même façon qu'à Abainville, l'emploi de la force hydraulique, gratuite et abondante grâce à un étang réservoir important, coexistera quasiment avec celle de la vapeur jusqu'à la fin des forges.

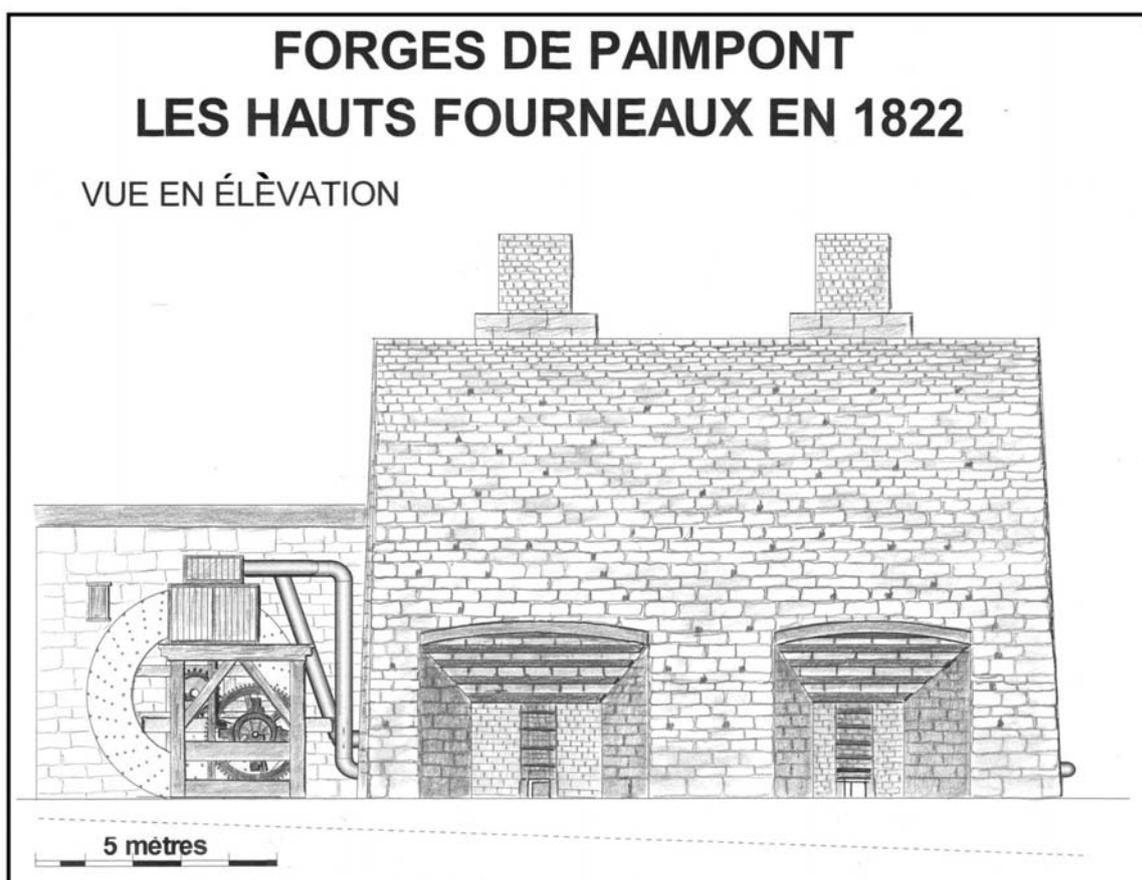


Fig. 58

Au moment fort de ces forges, vers 1850, Paimpont produisait 1500 tonnes de fonte par an. Dans les années 1820 la production moyenne journalière d'un haut fourneau se situe autour de 2 à 3 tonnes. Mais il ne faut pas perdre de vue qu'un appareil fonctionnant avec une soufflerie hydraulique chôme plusieurs mois par an pour insuffisance d'eau. Il doit être par ailleurs mis hors feu périodiquement pour réfection du creuset. Il est donc impossible de déduire une production annuelle à partir d'une production quotidienne (et vice et versa.)

## **Les hauts fourneaux au charbon de bois (1822-1832)**

### **Des appareils à poitrine ouverte**

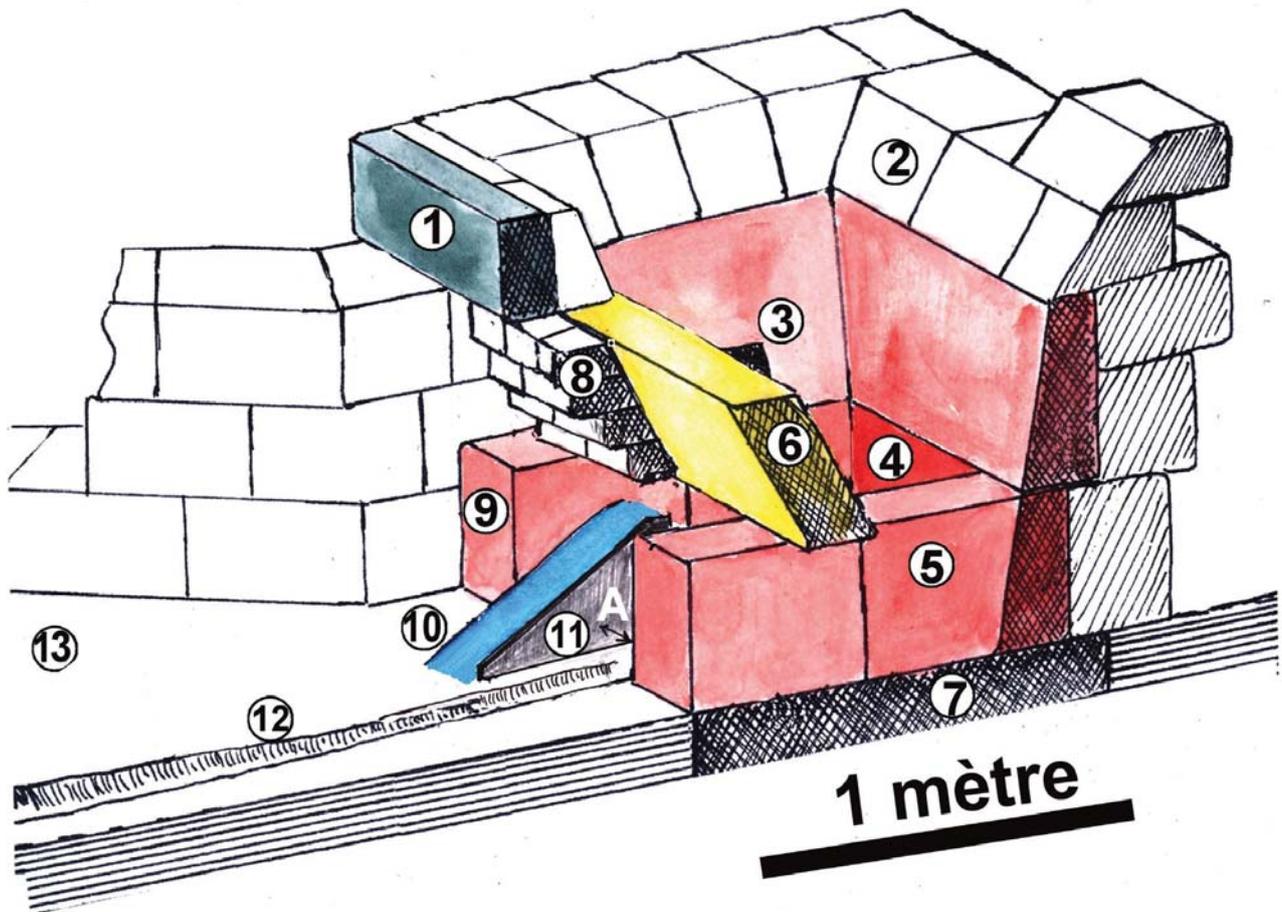
Dans l'histoire générale du haut fourneau il existe au moins deux grands types d'appareils. Le premier qui a prévalu depuis l'origine et qui a fonctionné jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle pour certains d'entre-eux est dit « à poitrine ouverte » ou encore « à avant creuset ». Dans ce cas de figure, le creuset se prolonge au-delà de l'espace où la fonte est produite, et ce à l'air libre, de sorte que la fonte comme le laitier sont directement accessibles aux fondeurs. Ils peuvent ainsi évacuer manuellement le laitier et puiser la fonte soit pour des moulages soit pour obtenir des échantillons. De plus ils peuvent même accéder à l'aide d'un ringard au fond du creuset pour décrocher des matières indésirables et éviter des encombrements qui perturberaient la marche du fourneau.

Ce creuset, de forme globalement parallélépipédique (Fig. 59) est formé de cinq plaques taillées et ajustées dans des matières très réfractaires (grès ou maçonnerie en briques de pisé damé), dont une plaque de fond ou sole plus épaisse et refroidie par-dessous grâce à des événements ou dans certains cas des canaux à circulation d'eau. La partie qui ferme le creuset, ou dame, présente la forme d'un plan incliné sur lequel les fondeurs évacueront le laitier. Toutefois elle ne ferme pas entièrement ce « réservoir » de l'avant creuset, laissant un petit espace entre elle et l'une des parois latérales du haut fourneau. C'est cet espace que les fondeurs boucheront avec une masse d'argile pour fermer le « réservoir » qu'ils perceront le moment venu pour faire couler la fonte.

C'est un creuset de cette nature qui équipe les hauts fourneaux de Paimpont (Fig. 60). Ensuite, particulièrement à partir des années 1870, les hauts fourneaux fonctionneront à poitrine fermée en raison notamment de la puissance du vent qui sera lancé dans le creuset par de multiples tuyères. Mais c'est une autre histoire...

## STRUCTURE D'UN CREUSET À AVANT CREUSET VERS 1820

(Éclaté)



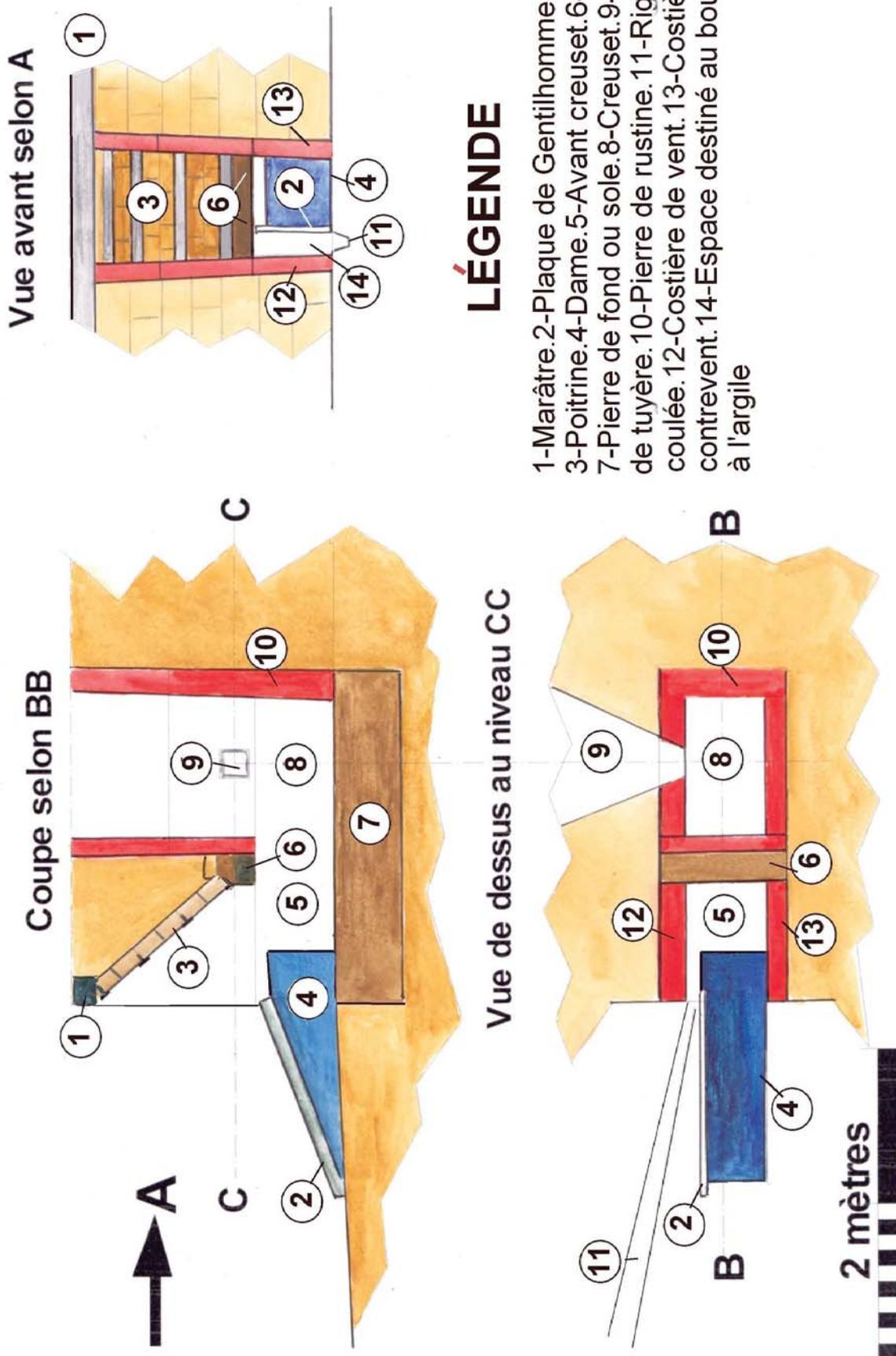
### LÉGENDE

1-Marâtre.2-Début des étalages.3-Chapelle de tuyère. 4-Pierre de rustine.5-Costièrre de contrevent.6-Tympe.7-Pierre de fond ou sole.8-Fausse tympe ou poitrine.9-Costièrre de vent.10-Dame.11-Plaque de gentilhomme.12-Rigole de coulée.13-Embrasure de travail

NB : La distance notée en A entre deux flèches figure l'espace libre dans lequel sera mis en place le bouchon d'argile fermant le creuset. Il devra ensuite être percé pour couler la fonte.

Fig. 59

STRUCTURE D'UN CREUSET DE HAUT FOURNEAU  
 À AVANT CREUSET VERS 1820



**LÉGENDE**

- 1-Marâtre. 2-Plaque de Gentilhomme.
- 3-Poitrine. 4-Dame. 5-Avant creuset. 6-Tympe.
- 7-Pierre de fond ou sole. 8-Creuset. 9-Chapelle de tuyère. 10-Pierre de rustine. 11-Rigole de coulée. 12-Costière de vent. 13-Costière de contrevent. 14-Espace destiné au bouchage à l'argile

Fig. 60

## L'appareil présenté (1822 et modernisé en 1832)

Demeuré en place côté digue, à la gauche de l'ancien massif détruit, il présente une forme légèrement tronc-pyramidale classique comparable à celle décrite dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert. Fonctionnant à poitrine ouverte comme décrit plus haut, il est surmonté d'une cheminée dite « à l'allemande », également assez classique à l'époque, destinée à faciliter la montée des gaz et à protéger les chargeurs de la flamme du gueulard.

La cheminée a été démolie, la cuve a été surbaissée, mais au vu des plans existants, le reste de l'édifice a connu peu de modifications depuis son origine. Seul le creuset a été légèrement redimensionné. On peut donc observer ici un appareil conforme à ceux qui fonctionnaient au début du XIX<sup>ème</sup> siècle.

La machine qui produisait le vent, placée entre le haut fourneau et la digue de l'étang fonctionnait grâce à une roue hydraulique desservie par le haut (modèle dit « à la capucine) et alimentée par un coursier provenant de l'étang. (Fig. 61). Elle sera modernisée en 1832.

Cette soufflerie fournissait environ 1 mètre cube d'air par seconde pour produire les gaz nécessaires à la réduction du minerai et à l'obtention d'une température de l'ordre de 1450° à 1500° au niveau de l'ouvrage, juste au-dessus de la tuyère. Mais en période d'étiage, lorsque le débit d'eau devenait insuffisant, il fallait mettre le fourneau hors feu. C'était bien là tout le drame des forges hydrauliques !

Toutefois, une marche continue aurait posé d'autres problèmes. Pour assurer le fonctionnement d'un tel appareil et ensuite la transformation de la fonte en fer, la consommation en combustible aurait atteint des proportions qui seraient vite devenues incompatibles avec les ressources forestières. En effet, les forges consommaient annuellement, donc en fonctionnement discontinu, environ 10000 cordes de bois demandant l'abattage de 15000 arbres en forêt de Brocéliande. Les replantations systématiques en conifères à la pousse rapide n'auraient fait que reculer l'échéance d'une difficulté d'exploitation insurmontable. Et les forges n'étaient pas les seules industries à consommer du bois en quantité significative ! (Marine, verreries, faïenceries, tuileries, fours à chaux...)

C'est sous forme de charbon de bois, -matériau plus léger et plus calorique que le bois- que les chargeurs effectuaient d'incessants va-et-vient entre la halle à charbons (aujourd'hui détruite) et la plate-forme du haut fourneau pour enfourner leurs hottes chargées de ce combustible, mais également de minerais déposés dans un parc au niveau de la digue. Ils devaient également charger parfois de la castine (calcaire) pour obtenir un bon lit de fusion propre à un fonctionnement optimal du fourneau.

Tous ces produits chargés en lits alternatifs descendaient lentement, se desséchant au niveau de la cuve, puis entrant graduellement en fusion au niveau du ventre jusqu'à atteindre la zone

la plus chaude au niveau de l'ouvrage où les atomes de fer vont se charger de carbone. Alors par cet alliage naît la FONTE, nouveau métal qui tombe en pluie au fond du creuset.

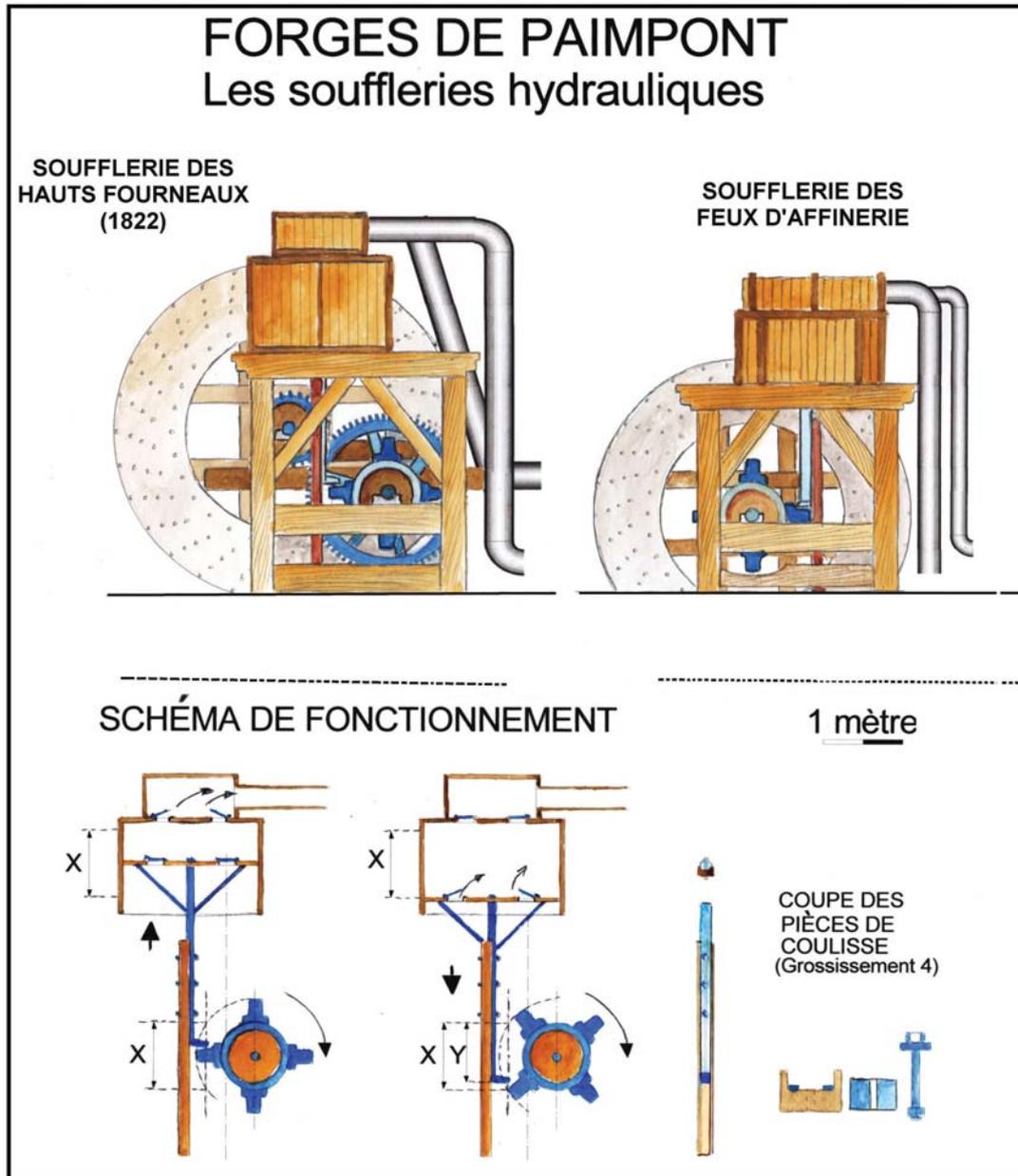


Fig. 61

Quant à la gangue du minerai, roche inutile, siliceuse ou calcaire, elle entre de même en fusion mais sa densité bien moindre que celle de la fonte (2,4 contre 7) la fait surnager sur le bain de métal qui s'accumule dans le creuset. Il appartient alors au second fondeur d'évacuer ce laitier au dessus du plan oblique de la dame qui ferme le creuset jusqu'à ce que ce dernier ne contienne plus que de la fonte. Alors, c'est l'heure de la coulée, moment toujours magique auquel le fondeur le plus chevronné ne s'habitue vraiment jamais tout à fait. On réalise généralement ici deux coulées par jour.

Une fois le creuset vidé de son précieux métal, il devient nécessaire de reboucher et réparer le trou de coulée à l'aide d'un tampon portant une masse d'argile. Chaque apport d'argile sera soigneusement damé et l'opération sera répétée jusqu'à réfection complète du bouchon. (Fig. 63 à 67).

Quant au laitier qui va refroidir au pied de la dame en se craquelant, il sera très fréquemment utilisé pour empierrier les chemins.

Les outils utilisés par les fondeurs paraissent à première vue assez rudimentaires (Fig. 62) mais tout l'art tient dans la façon de s'en servir ! Hormis les barres, ringards et marteaux dont on devine l'usage, la pelle à mouler, comme son nom ne l'indique pas, sert à barrer ou à ouvrir le chemin de la fonte dans les rigoles, et la charrue à tracer ces rigoles de coulée dans le sable du chantier.

Les fondeurs utilisent également, et c'est inattendu, de longues spatules en bois pour retenir ou évacuer le laitier. Si à une telle température (1300°), on pourrait s'attendre à une destruction par combustion rapide, ça n'est pas du tout le cas. Seul le point de contact entre en combustion mais en même temps se durcit. La spatule est immédiatement trempée dans un bac à eau après l'opération. Mais pourquoi le bois ? Parce qu'il ne fond ni ne colle aux matières tout en restant un mauvais conducteur de la chaleur !

Les hauts fourneaux travaillent 24 heures sur 24.

Il est difficile d'imaginer aujourd'hui les conditions de travail de ces hommes. Ils effectuent 10 à 12 heures de tâches pénibles par jour, sans repos hebdomadaire ni vacances. Par ailleurs l'emploi des enfants est alors de règle dans le milieu ouvrier. Il faudra attendre une loi de 1842 pour que ce travail soit réglementé. L'âge minimum d'embauche sera arrêté à 8 ans et la journée de travail limitée à 8h. Les plus âgés devront attendre 1904 pour avoir droit à un repos hebdomadaire, et 1936 pour profiter d'une semaine de congés payés !

La réfection du creuset et du chantier de coulée du haut fourneau de 1822 modernisé en 1832 est à l'étude en vue d'une restauration dans les configurations de l'époque.

# PRINCIPAUX OUTILS DU FONDEUR (XVIII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> s)

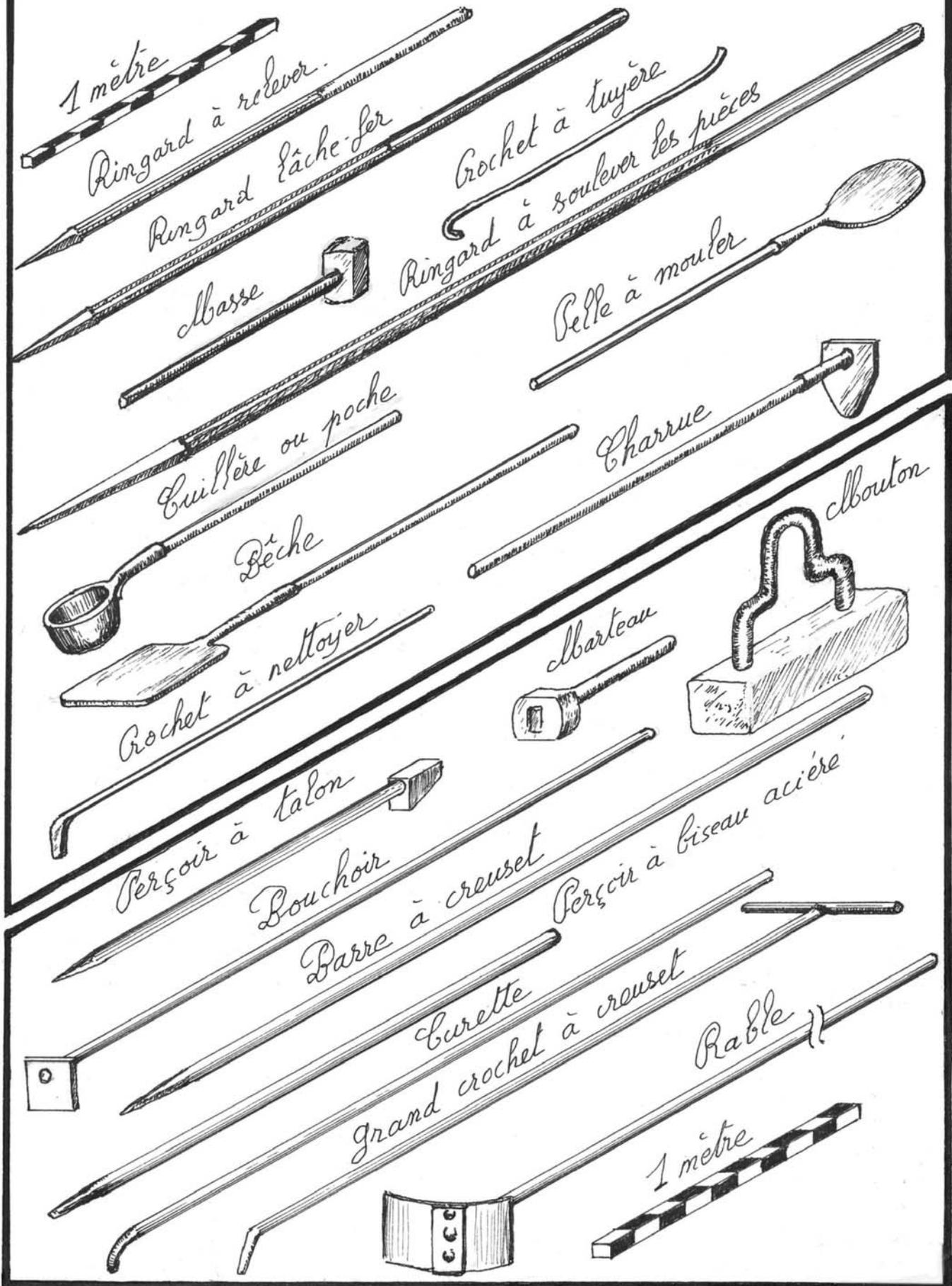


Fig. 62

**FORGES DE PAIMPONT**  
Coupe du haut fourneau de 1822

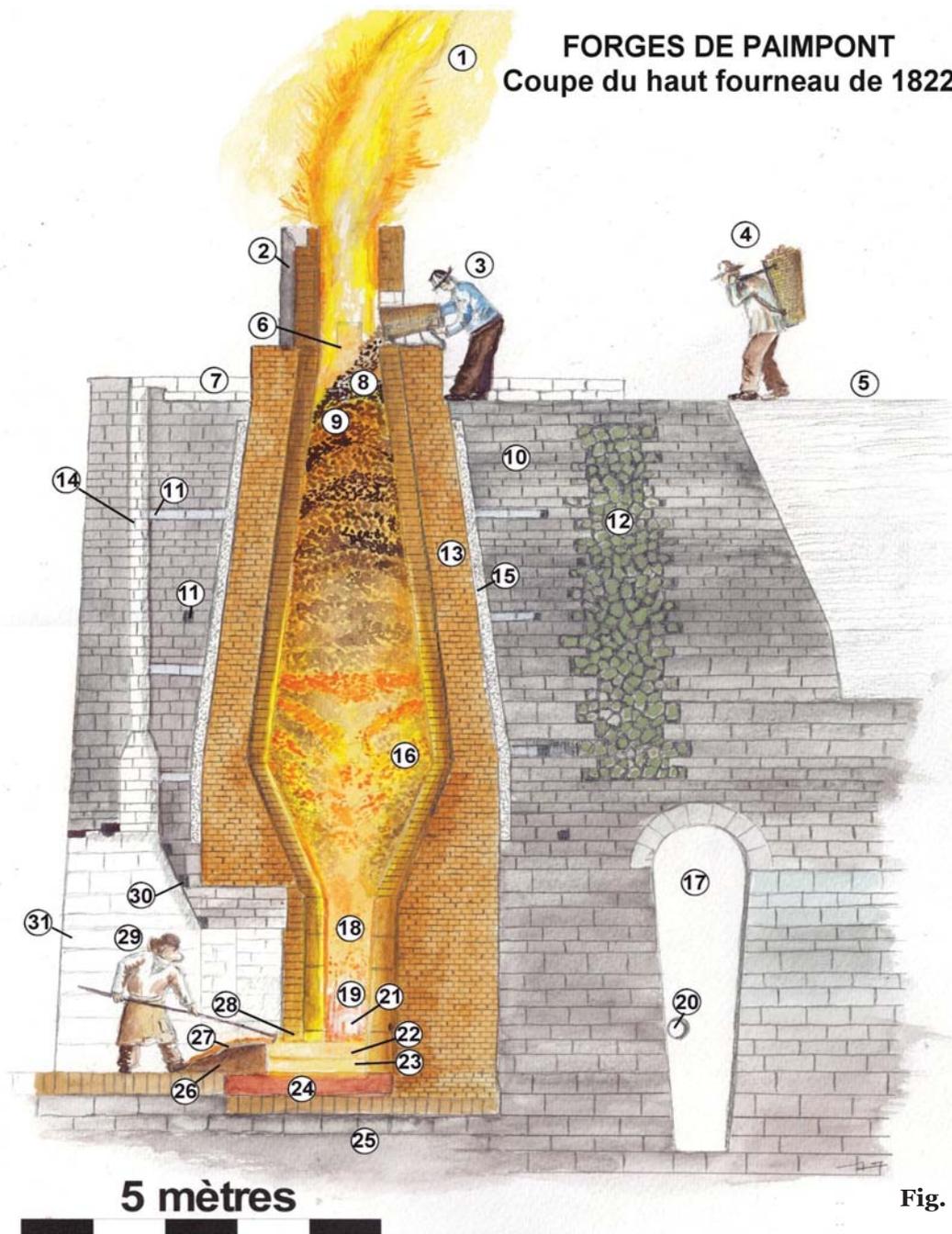


Fig. 63

**LÉGENDE DE LA PLANCHE**

1-Flamme du gueulard. 2-Cheminée. 3-Chargeur déchargeant une hotte de charbon de bois. 4-Chargeur provenant de la halle à charbons. 5-Chaussée. 6-Gueulard. 7-Batailles. 8-Lit de charbon de bois. 9-Lit de minerai de fer. 10-Double muraillement. 11-Évent (évacuation des vapeurs). 12-Espace tampon de dilatation. 13-Briquetage de cuve. 14-Cheminée exutoire. 15-Exutoire des vapeurs. 16-Ventre. 17-Couloir de sous bief de la roue de soufflerie. 18-Ouvrage. 19-Creuset. 20-Conduite de vent du fourneau jumeau. 21-Ceil de la tuyère. 22-Bain de laitier. 23-Bain de fonte. 24-Pierre de fond (sole). 25-Fondations. 26-Dame. 27-Écoulement de laitier. 28-Tympe. 29-Fondeur tirant le laitier. 30-Marâtre. 31-Embrasure de travail

## LE HAUT FOURNEAU DE 1822

### LES MATIÈRES

Le **MINERAI DE FER** se présente comme une pierre ordinaire, aux couleurs variant entre l'ocre et le gris. Il est composé d'une **matière pierreuse**, calcaire ou siliceuse en différentes proportions, appelée « gangue » et de **grains d'oxyde de fer** (mélange de fer et d'oxygène semblable à la rouille).

Le **CHARBON DE BOIS** provient de la calcination de bois à l'abri de l'air. Débarrassé de l'humidité du bois vert qui nuirait au bon fonctionnement du haut fourneau, des goudrons et autres matières inutiles constituant le bois, il est beaucoup plus **léger** et **maniab**le tout en possédant un **pouvoir calorifique** supérieur.

L'**air** insufflé en **grande** quantité et sous pression à la base du haut fourneau permet d'assurer la **combustion** du charbon de bois et la **formation du gaz** nécessaire à la transformation des matières, l'**oxyde de carbone** (mortel en quantité même en très faible quantité). La façon la plus efficace pour s'en protéger à cette époque, c'est de brûler son excédent au gueulard. Mieux vaut pour les chargeurs courir le risque de la brûlure que la prudence peut éviter, que celui, sournois, de l'empoisonnement.

### LE FONCTIONNEMENT

- 1- Les chargeurs **(3,4)** font la navette entre halle à charbon de bois ou le parc à minerai et le gueulard du haut fourneau
- 2- Ils versent dans ce gueulard des charges de charbon de bois et de minerai de fer, en alternance
- 3- Les lits de charbon et de minerai descendent lentement en s'échauffant dans la cuve **(13)**, perdant leur humidité
- 4- L'oxyde de carbone (le gaz) produit par la combustion du charbon de bois au niveau de la tuyère **(21)** qui insuffle l'air dans le creuset **(19)** monte à travers les charges.
- 5- La température qui règne au niveau du ventre **(16)**, soit 800 à 900°, alors que le minerai mélangé au charbon incandescent commence à fondre, permet au gaz d'entrer en réaction chimique avec le minerai pour le transformer en fer un peu pâteux (et non liquide car le fer ne fond qu'à **1538°**).
- 6- Mais dans sa descente au niveau de l'ouvrage **(18)** alors que la température augmente pour atteindre les 1200 à 1300°, le **FER** se mélange à un peu de **CARBONE** cédé par le charbon de bois, et se transforme en **FONTE** (carbure de fer), nouveau métal qui fond quant à lui vers 1100 à 1200° selon les variétés.
- 7- La fonte tombe alors en pluie continue pour s'amasser **(23)** dans le réservoir du creuset fermé du côté de l'embrasure de travail **(31)** par une pierre inclinée appelée « Dame » **(26)**
- 8- La gangue du minerai (calcaire, silice) fond de même au cours de la descente des charges et tombe également en pluie avec la fonte pour s'amasser au même endroit. Mais elle est plus légère que la fonte et constitue le **LAITIER (22)** qui surnage et que l'on peut comparer à une sorte de lave de volcan.
- 9- Produit en volume plus considérable que la fonte, (environ 3 à 4 fois selon les minerais), il est nécessaire de l'évacuer sans cesse pour que le niveau n'atteigne jamais la tuyère et que la fonte seule finisse par emplir tout le creuset. C'est l'opération que conduit sans cesse l'aide fondeur en tirant le laitier **(22)** au dessus de la dame **(26)**. Il s'écoule alors **(27)** sur la dame pour finir par se refroidir sur le chantier. Il y sera concassée pour constituer un excellent matériau, dur et peu friable, pour empierrer les chemins.

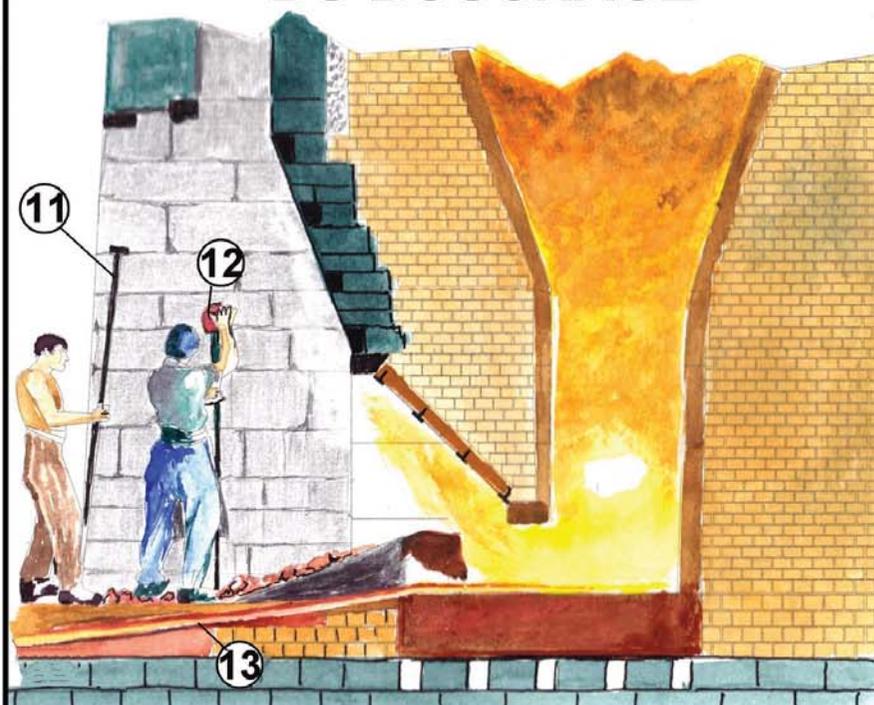
## PHASE DE LA PERCÉE



Le bain de fonte débarrassé du laitier est parvenu à remplir le creuset. Il faut impérativement couler pour que la fonte ne passe pas au dessus de la dame. Le premier fondeur met un ringard en place pour percer le bouchon d'argile qui ferme le creuset. Il est aidé par son second qui frappe sur le ringard à l'extrémité biseautée en le faisant tourner d'un quart de tour à chaque frappe. Et cela jusqu'au percement complet du bouchon qui libère ainsi la fonte.

Fig. 64

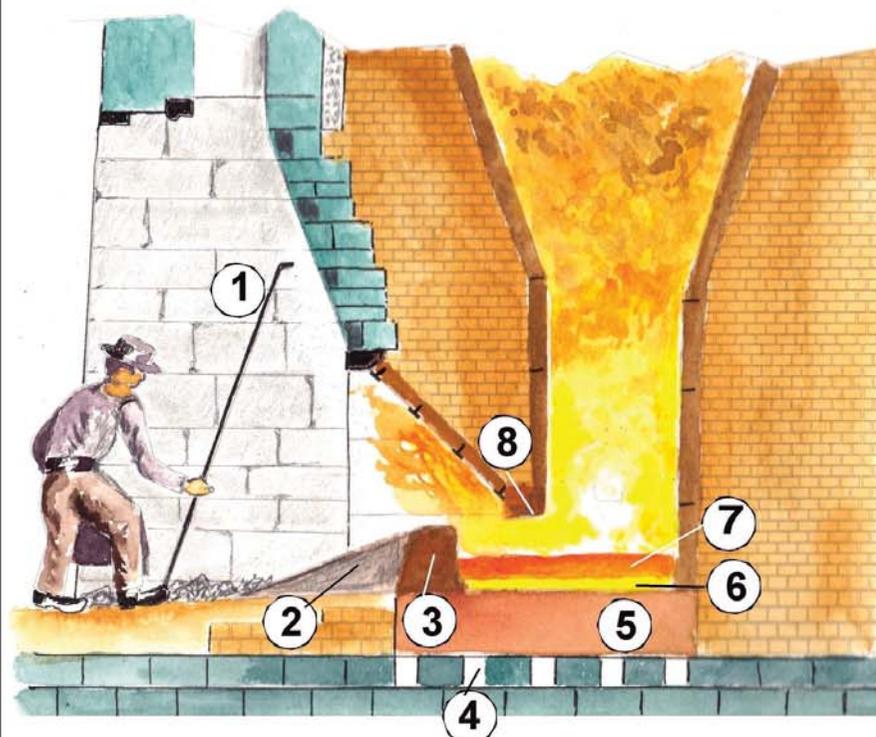
## COULÉE ET PRÉPARATION DU BOUCHAGE



Le creuset est maintenant quasiment vide. La fonte s'est répandue dans les moules à gueusets modelés dans le sol de l'usine. Il faut préparer une nouvelle fondée et donc réparer soigneusement le trou de coulée ouvert au ringard. Le premier fondeur place une masse d'argile au bout d'un tampon Tandis que son aide s'apprête à la damer au fond du trou détérioré par la coulée.

Fig. 65

## PHASE DE FONDÉE



Démarrage d'une nouvelle fondée. La fonte et le laitier commencent à tomber en gouttes au fond du creuset à travers les charbons ardents. Le second fondeur observe la montée du laitier qui surnage sur la fonte.

## PHASE DE DÉCRASSAGE



Dès que le laitier apparaît sous la tympe, prêt à déborder au dessus de la dame, le second fondeur écrème le bain en tirant le laitier au dessus de la dame sur laquelle il va descendre et commencer à se refroidir.

### PETIT LEXIQUE DES VIGNETTES :

1-Crochet à laitier. 2-Dame.3-Bouchon du creuset. 4-Carnaux d'assèchement.5-Pierre de fond. 6-Fonte en fusion.7-Laitier en fusion.8-Tympe.9-Masse.10-Ringard à percer.11-Outil à damer. 12-Bouchoir au tampon.13-Fin de coulée

Fig. 66

Fig. 67

## La période de modernisation

Avec le développement de la méthode anglaise utilisant la houille et le coke comme combustible et la vapeur comme source d'énergie en remplacement de l'énergie hydraulique, le paysage industriel subit une véritable mutation partout en Europe et Outre-Atlantique. Mais chaque usine partie prenante de cette évolution l'adapte à sa situation et au patrimoine industriel déjà existant. À Paimpont qui, à partir de 1836, développe cette méthode au niveau de la fabrication du fer avec les fours à puddler et les laminoirs, la partie consacrée à la fabrication de la fonte, donc les hauts fourneaux, évolue peu. En effet, la ressource en bois est encore suffisante et la capacité hydraulique due à la retenue d'eau, dont la puissance globale est estimée à 100 chevaux, est encore intéressante à exploiter. (Et quasiment gratuite alors que le prix de la houille reste élevé).

Nous ne possédons malheureusement qu'un seul plan assez sommaire mettant en évidence les travaux de modernisation (Fig. 68), mais suffisamment clair pour en déduire le genre d'installations en fonctionnement.

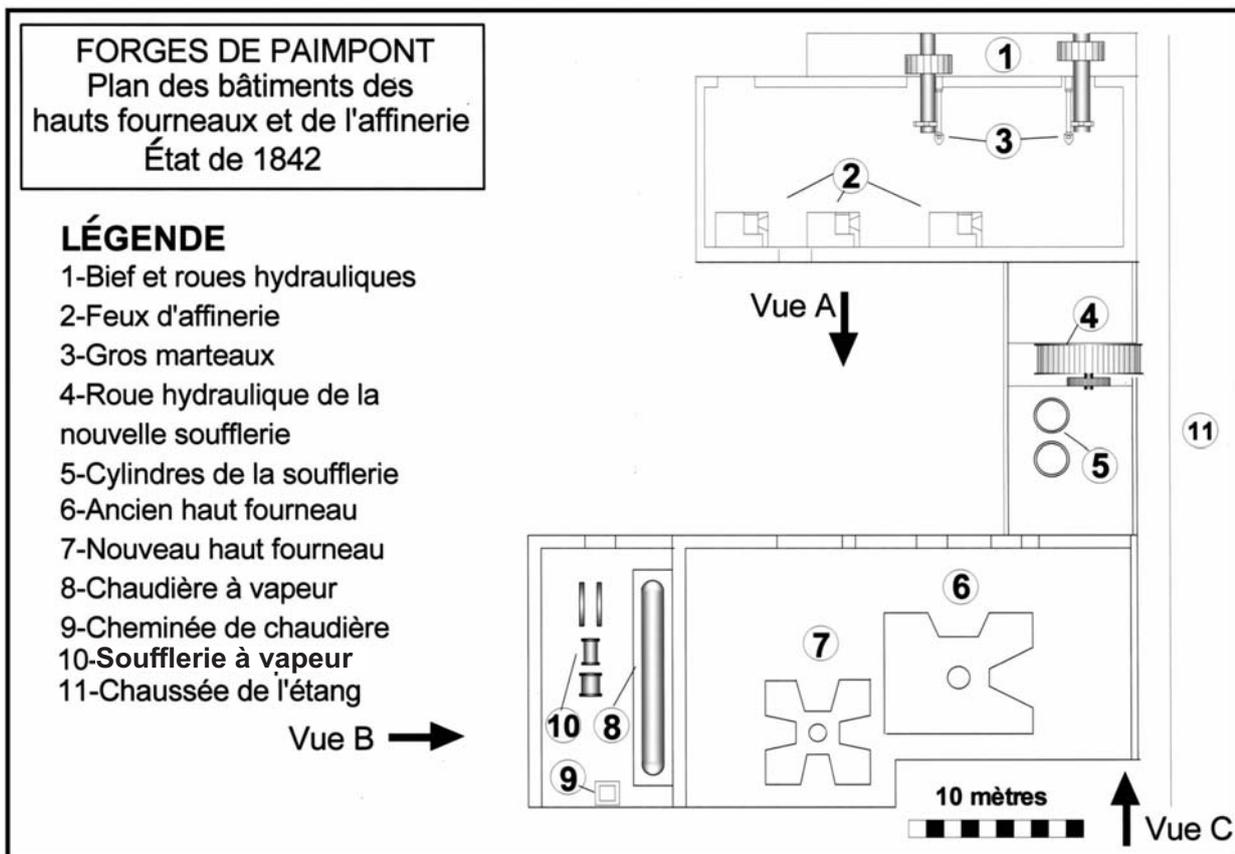


Fig. 68

Toutefois, une amélioration notable dans la production du vent est mise en œuvre en même temps que la réfection d'un haut fourneau côté digue. Il s'agit de la mise en service d'une soufflerie à cylindres en fonte de grande capacité mue par une roue hydraulique de 6m de diamètre. Cette roue actionne les pistons des cylindres à travers un ensemble mécanique constitué de pignons et de balanciers (Fig. 69). Le plan général permet de repérer cette soufflerie encore en situation de fonctionnement alors que l'énergie de la vapeur a déjà fait son entrée avec une soufflante de 90 chevaux produisant le vent destiné à un nouveau haut fourneau.

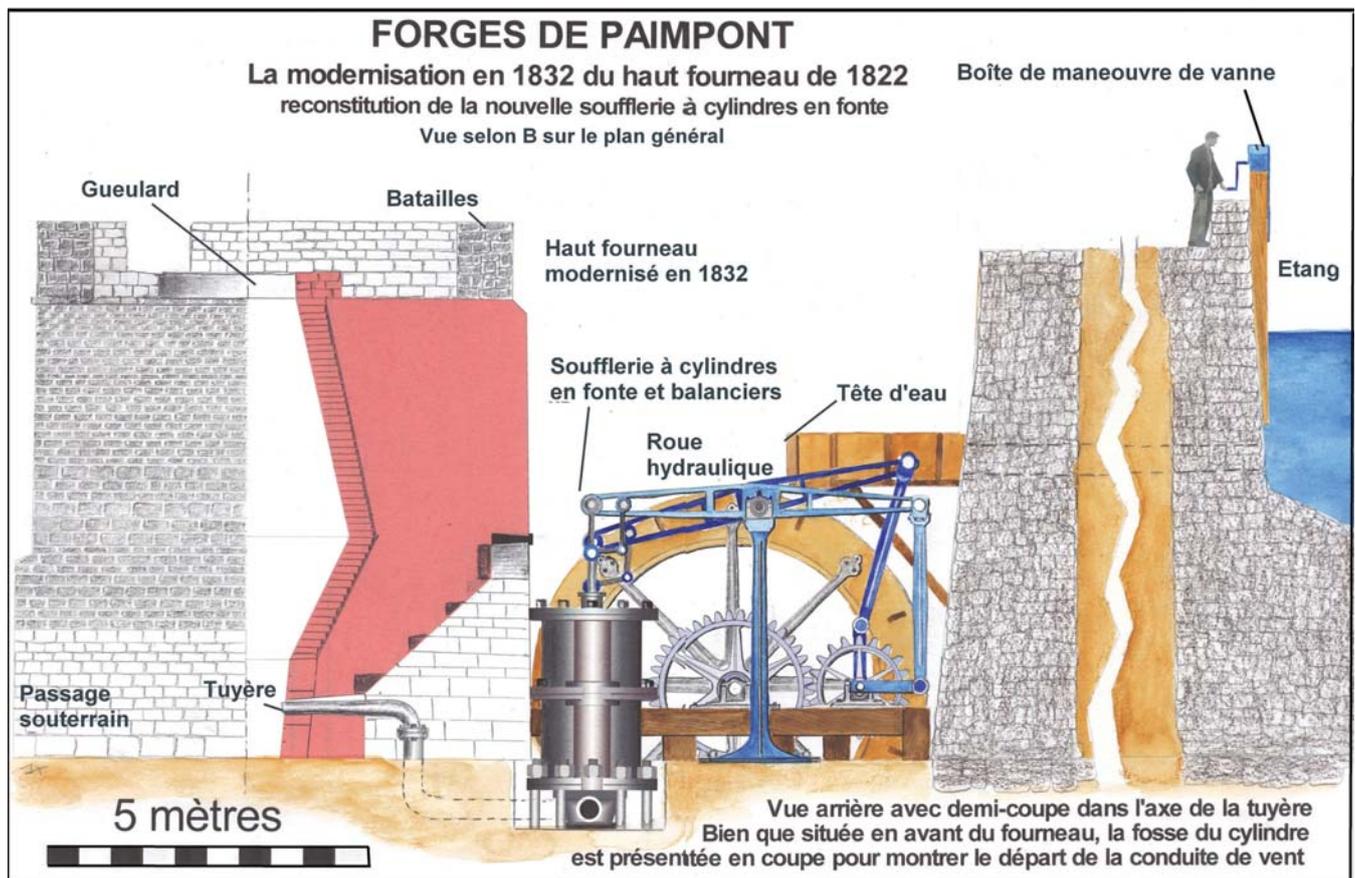


Fig. 69

## Le haut fourneau de 1842

Construit en 1842 après démolition du fourneau jumelé à celui modernisé côté digue, cet appareil garde encore une part de mystère. En effet, s'il a été entièrement construit en pleine époque de développement des forges « à l'anglaise », c'est-à-dire utilisant essentiellement le coke dans les hauts fourneaux, les sources historiques quant à l'emploi de ce combustible sont contradictoires. Par exemple dans l'ouvrage « La Grande forge » (voir bibliographie) de Christian Sütterlin, toutes les forges de Bretagne fonctionnent au bois, sauf celle de Paimpont alors que dans le Glossaire du haut fourneau de Jacques Corbion (voir bibliographie), les hauts fourneaux de Paimpont fonctionnent uniquement au bois.

Son architecture quant à elle traduit une étape de l'évolution des hauts fourneaux, avec l'abandon du double muraillement caractéristique des modèles décrits par l'Encyclopédie et encore répandus dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, comme l'appareil de 1822, au profit d'une cuve généralement tronc conique assise sur une base encore héritée de l'ancien modèle.(Fig. 70) L'embrasure de coulée reste caractéristique des hauts fourneaux à poitrine ouverte et la structure de creuset ne diffère pas sensiblement de celle de son prédécesseur (rappel Fig. 59 et 60)

Ce haut fourneau semble bien avoir été conçu pour fonctionner au coke, avec un creuset élargi et trois tuyères dont le vent produit par une soufflante à vapeur (Fig. 71) permet, dans cette configuration, de traverser une colonne de matières plus importante, ce qui devient plus difficile avec du charbon de bois.

Il est vrai que certaines grandes forges à l'anglaise comme Abainville (Meuse) utilisaient encore le charbon de bois à la même époque pour produire la fonte destinée aux fours à puddler, mais avec un type de haut fourneau proche de celui de 1822.

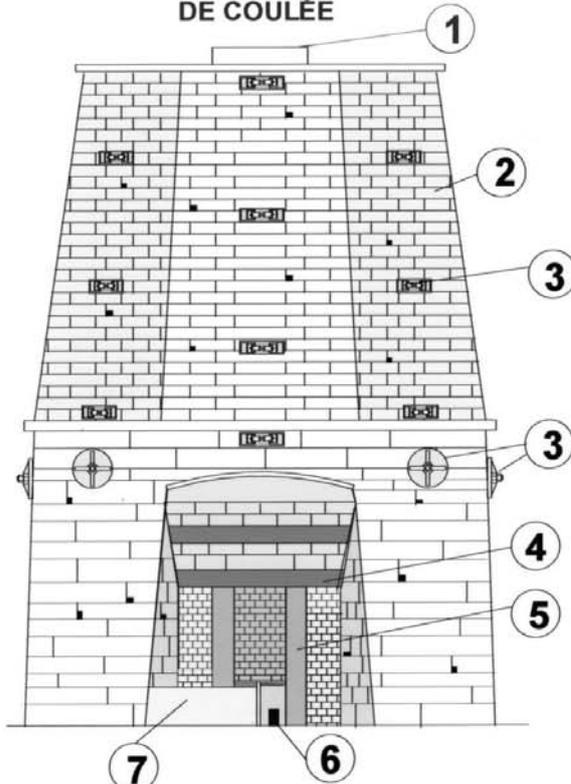
En définitive, dans l'état actuel des archives, seuls les travaux de restauration projetés, avec une analyse des matières fouillées, permettront de lever les doutes.

La soufflerie qui développe une puissance de 90 chevaux est caractéristique des machines horizontales type « Farcot » de l'époque avec une production de vent efficace en aller comme en retour de cylindre (compression alternative). La vitesse de rotation de ce type de machine s'établit généralement entre 30 et 60 tours par minute, ce qui est déjà très impressionnant avec la rotation de deux volants d'inertie de 4m de diamètre pesant chacun plusieurs tonnes ! L'énergie hydraulique se trouve ici définitivement dépassée avec une puissance multipliée par 2 par rapport à la soufflerie initiale de 1822 ! La production de vent pouvait être de l'ordre de 90 à 100 mètres cubes par minute. (Fig. 72)

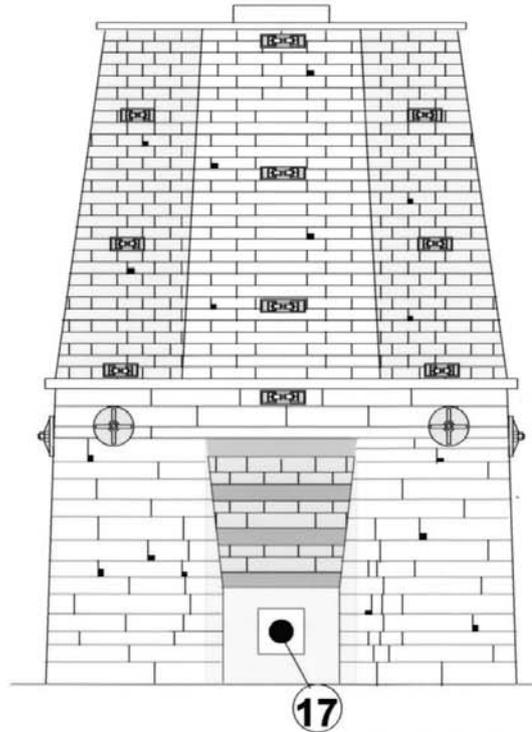
# FORGES DE PAIMPONT HAUT FOURNEAU DE 1842

Présentation dans le cadre d'un projet de restauration

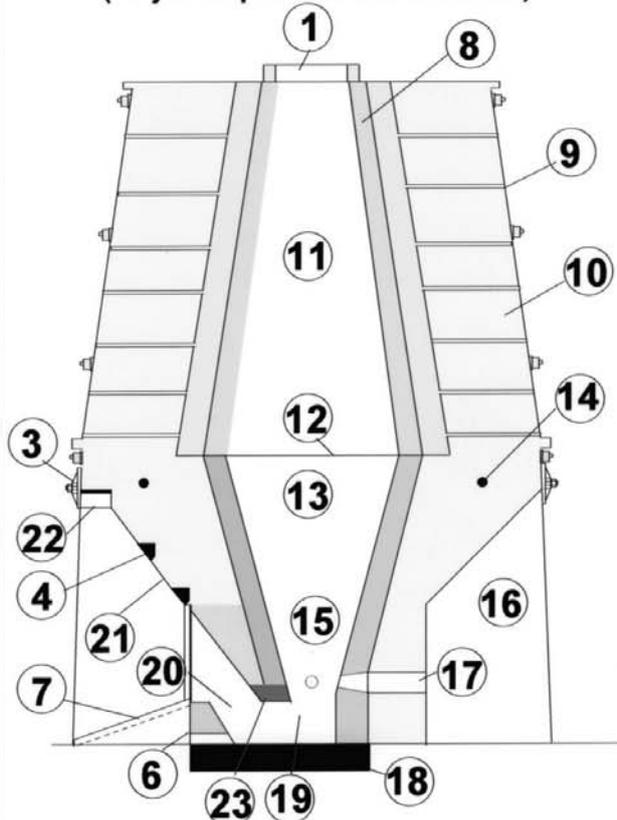
VUE CÔTÉ EMBRASURE  
DE COULÉE



VUE CÔTÉ EMBRASURE  
DE VENT SUD



VUE EN COUPE PAR  
L'EMBRASURE DE COULÉE  
(Projection provisoire avant fouilles)



## LÉGENDE

- 1- Gueulard
- 2- Cuve
- 3- Têtes de tirants
- 4- Marâtre
- 5- Gendarme
- 6- Trou de coulée
- 7- Dame
- 8- Chemise de cuve
- 9- Évent
- 10- Muraillement
- 11- Cuve intérieure
- 12- Ventre
- 13- Étalages
- 14- Tige de tirant
- 15- Ouvrage
- 16- Embrasure de vent
- 17- Chapelle de tuyère
- 18- Sole ou pierre de fond
- 19- Creuset
- 20- Avant-creuset
- 21- Poitrine
- 22- Cintre porteur
- 23- Tympe

Fig. 70

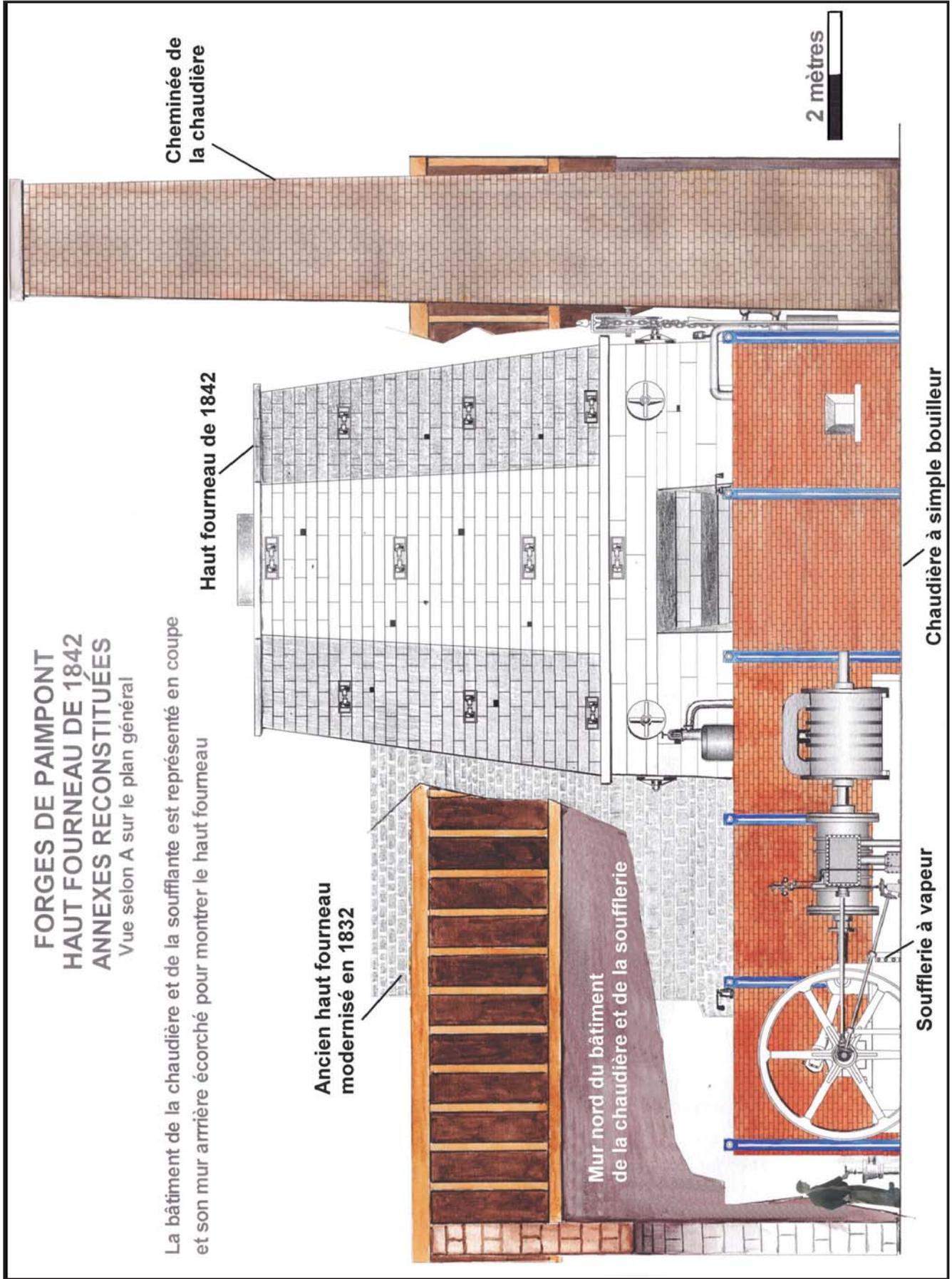


Fig. 71

# SOUFFLERIE À VAPEUR POUR HAUT FOURNEAU

Modèle utilisé aux forges de Paimpont

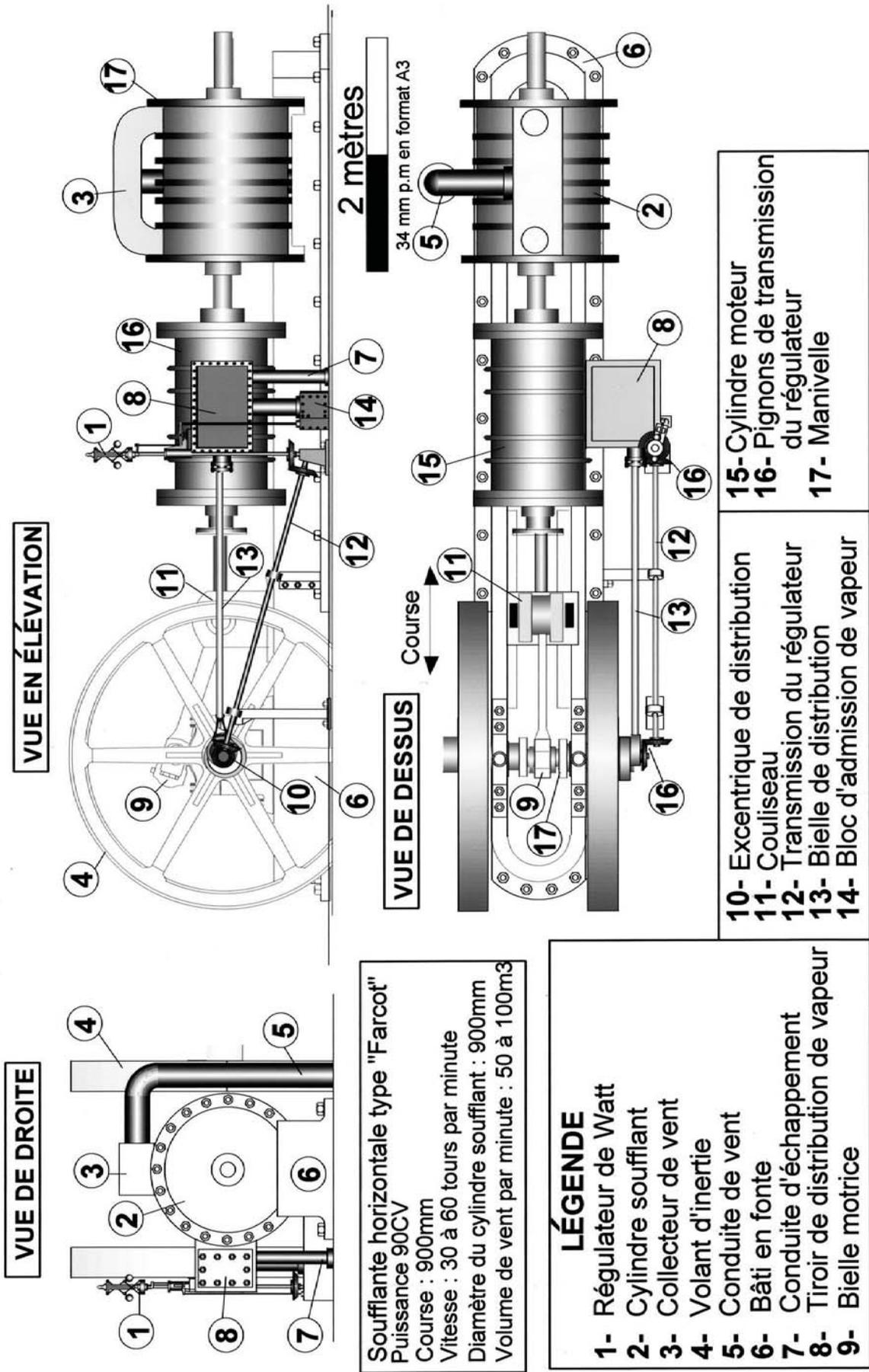


Fig. 72

# CHAUDIÈRE À SIMPLE BOUILLEUR DE PREMIÈRE GÉNÉRATION

VERS 1830

TYPE DE GÉNÉRATEUR UTILISÉ AUX FORGES DE PAIMPONT

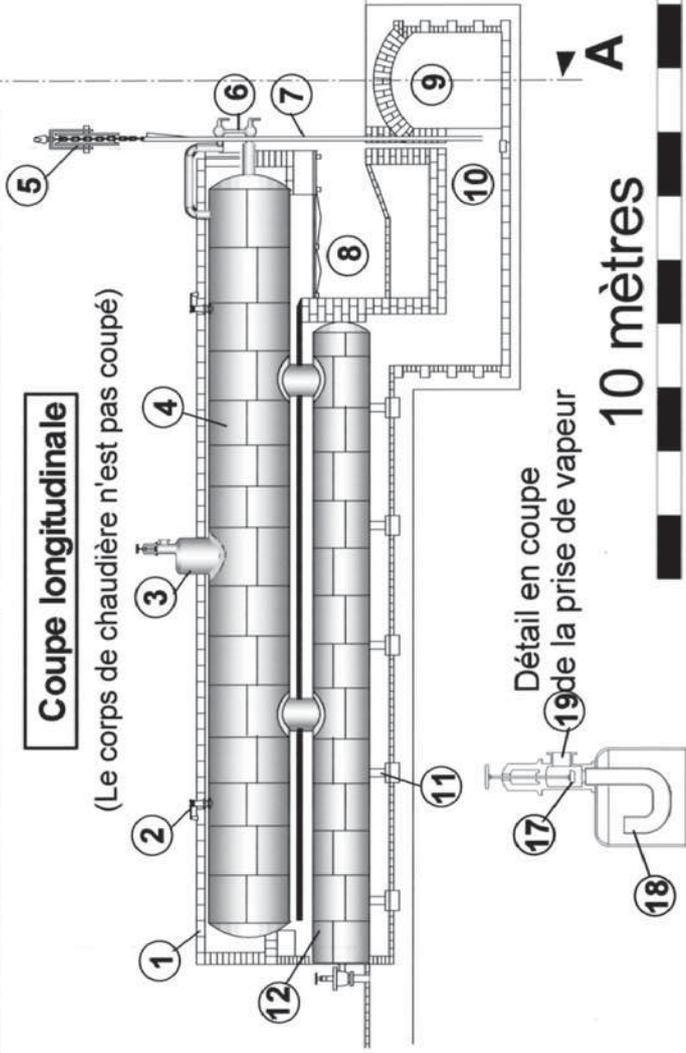
## LÉGENDE

- 1- Enveloppe en briques
- 2- Soupape de sécurité
- 3- Dôme de prise de vapeur
- 4- Corps de chaudière
- 5- Poulie
- 6- Témoin de niveau deau
- 7- Cadre du registre
- 8- Foyer
- 9- Collecteur des fumées
- 10- Rampant

- 11- Sommier des corps de chauffe
- 12- Bouilleur ou réchauffeur
- 13- Contrepoids du registre
- 14- Registre de tirage
- 15- Cheminée
- 16- Rampant de cheminée
- 17- Clapet
- 18- Canne de prise de vaeur
- 19- Prise de vapeur
- 20- Contrepoids de soupape
- 21- Tige de soupape
- 22- Levier d'équilibrage

## Coupe longitudinale

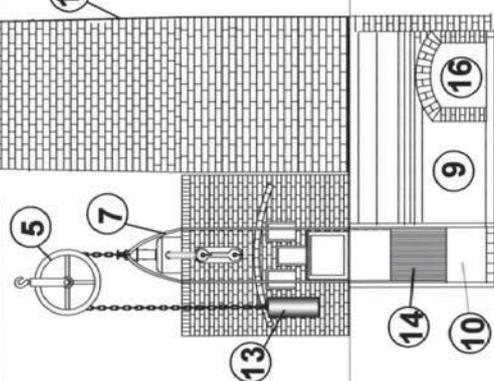
(Le corps de chaudière n'est pas coupé)



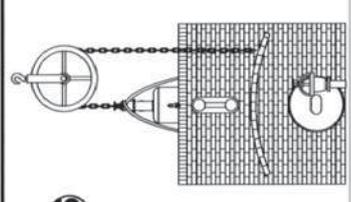
Détail en coupe  
de la prise de vapeur

10 mètres

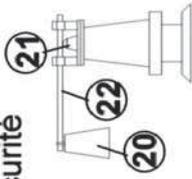
## Coupe selon AA



## Vue de gauche



Détail d'une soupape  
de sécurité



La hauteur de la cheminée a été  
réduite pour pouvoir entrer dans le dessin

Fig. 73

L'énergie de la vapeur est fournie par une longue chaudière à simple bouilleur, également caractéristique des premiers grands générateurs de vapeur (Fig. 73) dont la technologie sera assez rapidement améliorée par des chaudières tubulaires moins encombrantes et plus puissantes.

Le principe est simple (Fig. 74) : il s'agit de faire effectuer à la flamme produite par le foyer à la houille un aller-retour qui enveloppe les corps de chauffe, le bouilleur à la partie inférieure d'où va monter par deux cuissards une production de vapeur à travers l'eau bouillante jusqu'au grand corps de chauffe où elle est emmagasinée et collectée sous un dôme. Des soupapes équilibrées assurent la sécurité pour éviter les risques d'explosion qui ont fait à l'époque des dégâts assez considérables dans différentes usines et sur quelques machines locomotives. C'est pourquoi un certain nombre de contemporains de cette nouvelle technologie demeurent méfiants sinon craintifs vis-à-vis de l'utilisation de la vapeur.

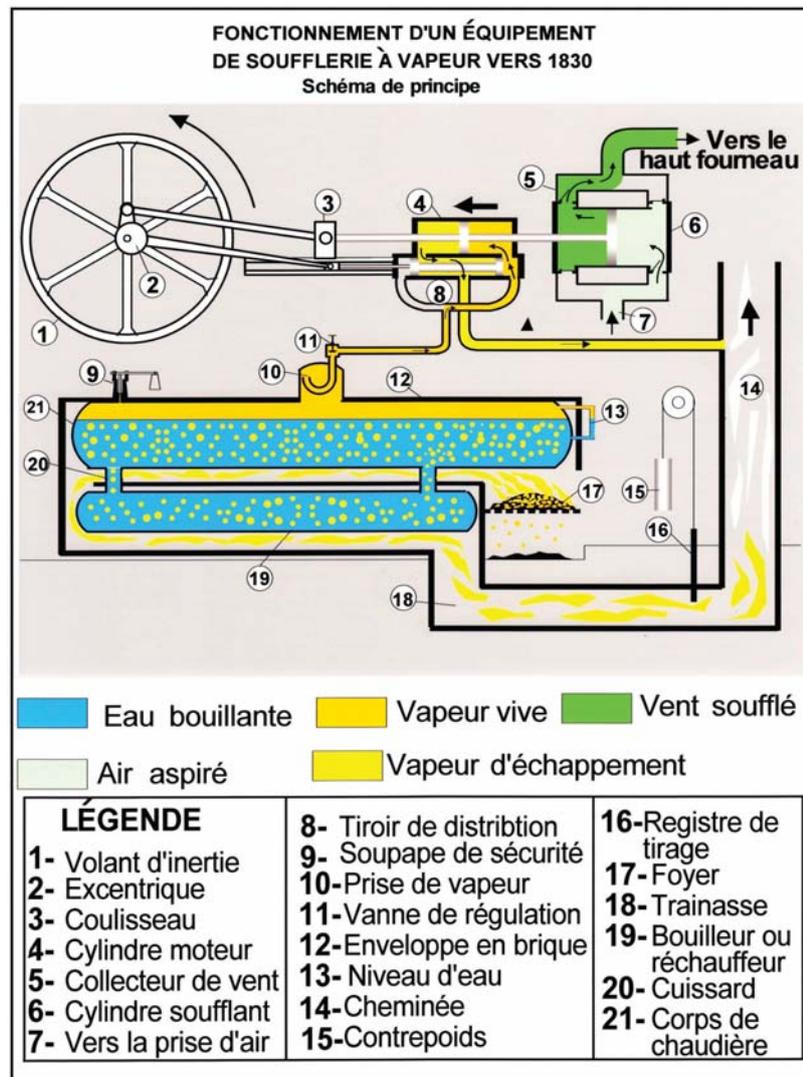


Fig. 74

En définitive nous trouvons dans cette disposition une préfiguration des futures usines à fonte avec la séparation des fonctions essentielles qui peuvent maintenant s'éloigner des domaine de réserve hydraulique, à savoir la production d'énergie avec les chaufferies produisant le vapeur, et les machines soufflantes. (Fig. 75).

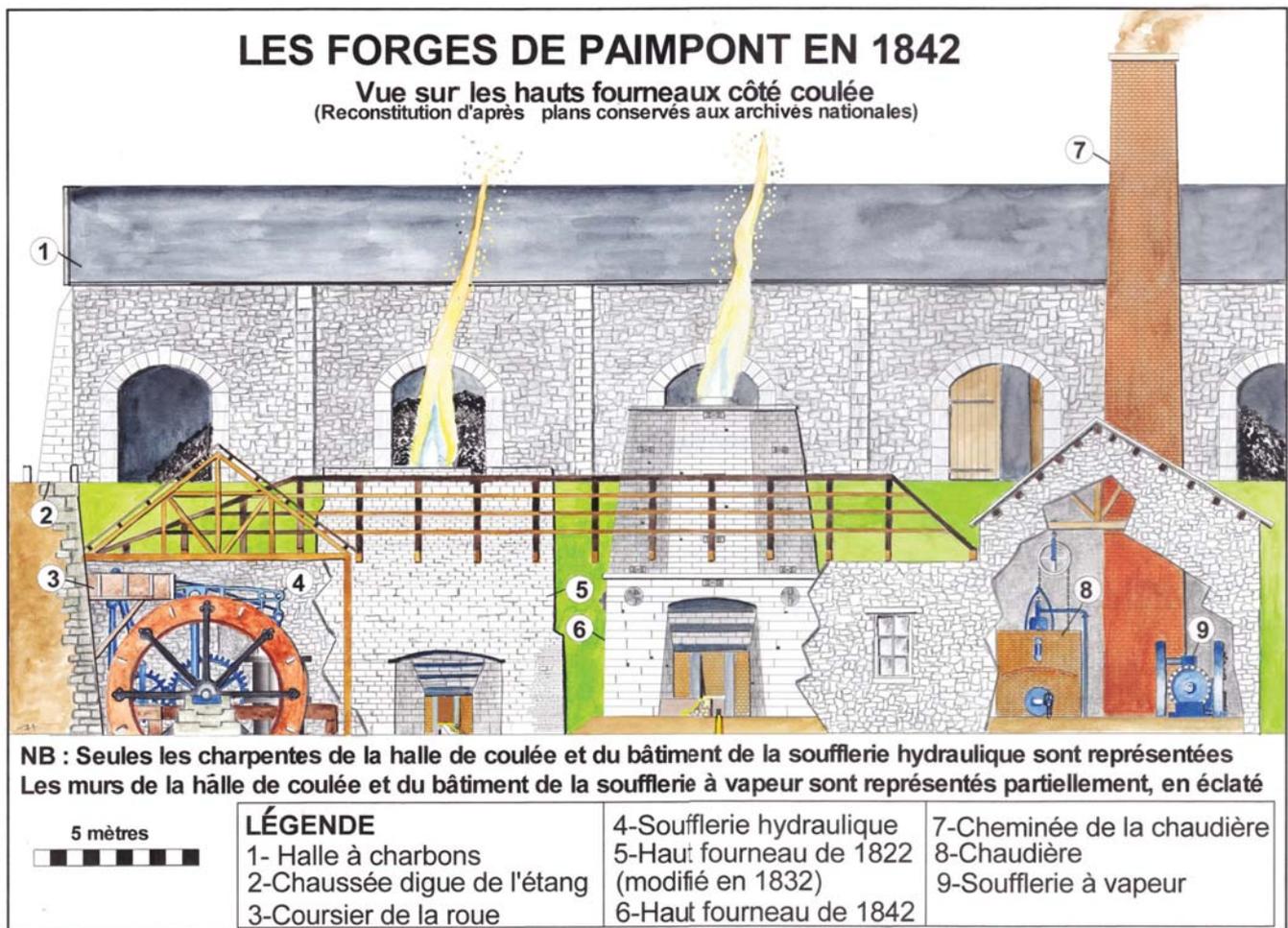


Fig. 75

## L’AFFINERIE

L’idée paraît simple quand on raisonne dans le cadre d’une connaissance élémentaire des réactions de la chimie. Mais la réalité se présente dans une opération longue, complexe et pénible. Une fois encore le sens aigu de l’observation, l’intelligence pragmatique et la puissante envie de réussir avec la construction d’un savoir faire qui s’étend sur plusieurs siècles va amener à la conception d’un four particulier, ou feu d’affinerie « à géométrie variable » dans lequel la fonte va abandonner son carbone et ainsi se transformer en fer.

L’opération chimique globale du procédé indirect est schématisée ici (Fig. 76) avec les mêmes symboles que dans les figures précédentes concernant le même sujet.

Aux forges de Paimpont, l’affinerie constitue le bâtiment le plus ancien. Toutes les forges ne disposaient pas de l’ensemble des appareils, notamment des hauts fourneaux et certaines se spécialisaient dans l’affinage, dans la fonderie, la fenderie.. Ici le bâtiment date de l’époque de Louis XIV. Il a été transformé en blanchisserie industrielle dans les années 1960. Un incendie l’a partiellement détruit dans les années 1980 et ce qu’il en reste a été laissé à l’abandon.

Grâce aux plans de 1820 des Archives nationales et des photographies, il sera possible de la restaurer à l’identique, au moins dans son volume. Cet atelier était spécialisé dans la fabrication de fers marchands. Il comprend quatre fours d’affinerie, une soufflerie hydraulique à caisses et pistons et deux gros marteaux. Il s’agit donc d’une affinerie de bonne taille.

### **Mais quelle activité abritait ce bâtiment ?**

La gueuse de fonte extraite du chantier de coulée du haut fourneau pèse entre 500 et 700 kg. Elle est introduite sur un plan légèrement incliné dans un four où l’on maintient une température élevée, vers 1450°, de façon à ce que son extrémité alors mise en fusion soit placée juste au-dessus de la nappe de vent d’une tuyère. Ainsi l’oxygène de cette nappe va pouvoir brûler le carbone des gouttes de fonte qui vont la traverser en tombant au fond du foyer. C’est ainsi que se forment de nouvelles masses d’un métal pâteux qui, une fois réunies par l’affineur à l’aide d’un ringard, vont constituer une loupe de fer. Mais ce travail qui s’effectue en plusieurs étapes demande un savoir faire très particulier et parfois des « tours de main » avec de « petits secrets » issus de l’expérience qui révèle à l’affineur, bien avant la naissance de la chimie, la magie des réactions entre certaines matières.

Tout d’abord, il demandera parfois de faire varier à l’aide de cales certains angles d’éléments du four, dont la plaque de fond et l’inclinaison ou l’avancement de la ou des tuyères. Le maître affineur doit donc déjà connaître parfaitement toute la logique de fonctionnement de son outil.

# PRODUCTION DU FER PROCÉDÉ INDIRECT

Opérations chimiques de réduction,  
de carburation et de décarburation

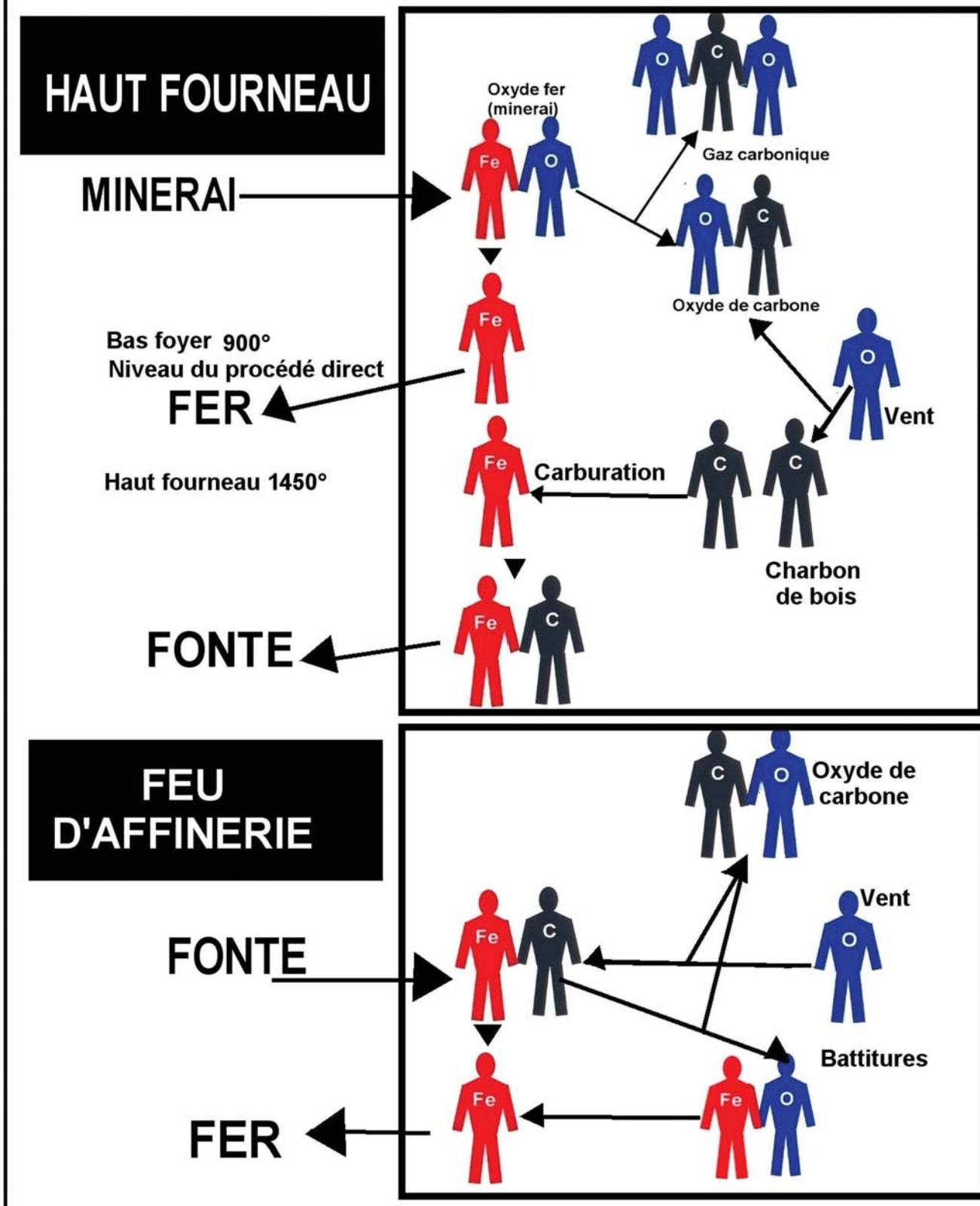


Fig. 76

Le foyer du four est composé de cinq plaques de fonte de 3 à 4cm d'épaisseur formant une sorte de caisse (Vignette M10). Elles sont assemblées et bloquées à l'aide de coins de façon à pouvoir en faire varier un peu la géométrie, et également remplacer aisément la plaque de fond chaque semaine. De plus cette plaque de fond, également appelée sole, est refroidie par eau et par le dessous. Sur cette plaque sont posées pour former le rectangle de la caisse, la plaque nommée varme portant la ou les tuyères sur un côté, la plaque nommée haire ou rustine, au-dessus de laquelle on introduit la gueuse en fond de four, la plaque de contrevent opposée à la tuyère et la plaque de devant nommée chio ou laiterol munie des trous de chio par lesquels s'écouleront les scories et le laitier. On retrouve quasiment le vocabulaire et les éléments formant le creuset du haut fourneau. La plaque de fond est légèrement inclinée vers l'avant afin de faciliter le rassemblement et l'écoulement des scories par les orifices de chio. L'opération qui va aboutir au forgeage d'une barre de fer dure plus de deux heures et s'effectue en une dizaine d'étapes ou davantage selon la nature des fontes. Certaines, notamment les fontes blanches, se laissent affiner presque entièrement dès un premier passage dans le vent, d'autres au contraire, plus riches en carbone, vont demander un traitement beaucoup plus long.

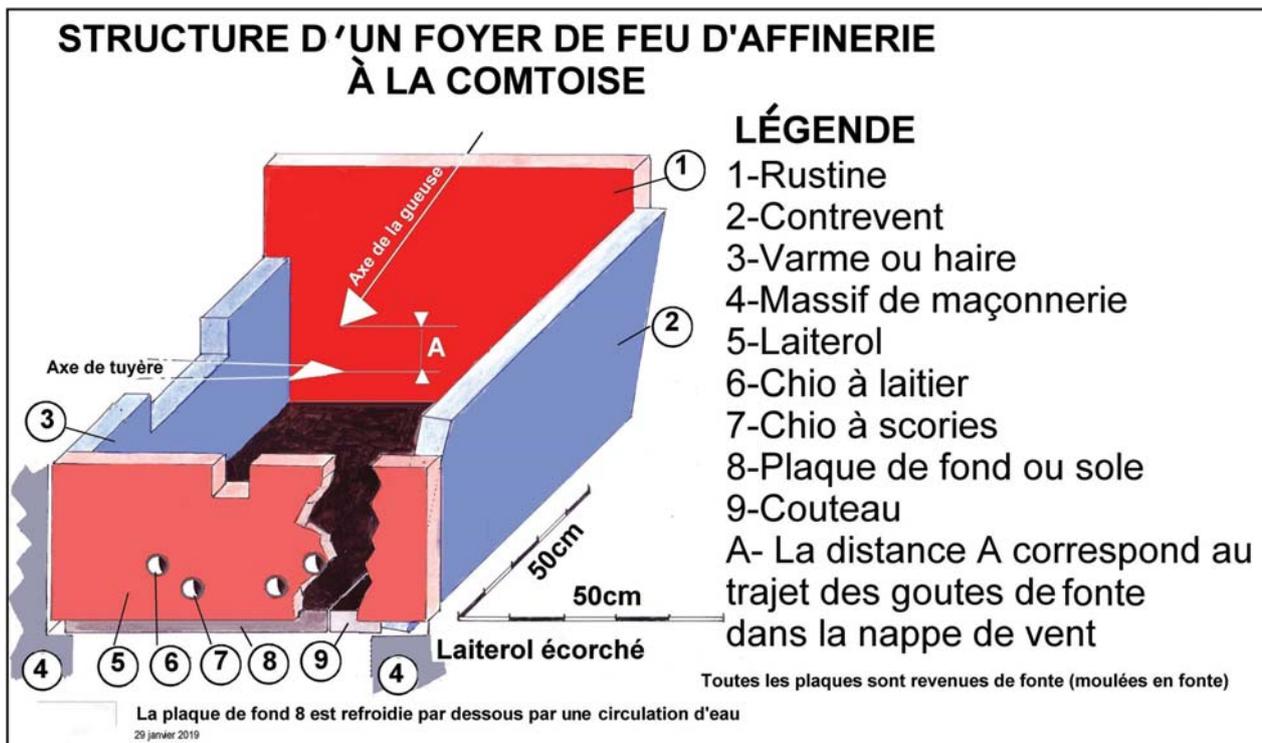


Fig. 77

La Fig. 78 propose la plan général d'un feu d'affinerie type « à la comtoise »

Si les plans aident à comprendre le fonctionnement général du four, en revanche, la description des opérations d'affinage seraient bien trop longue à décrire.

On peut en schématiser ainsi les principales phases sur la Fig. 79.

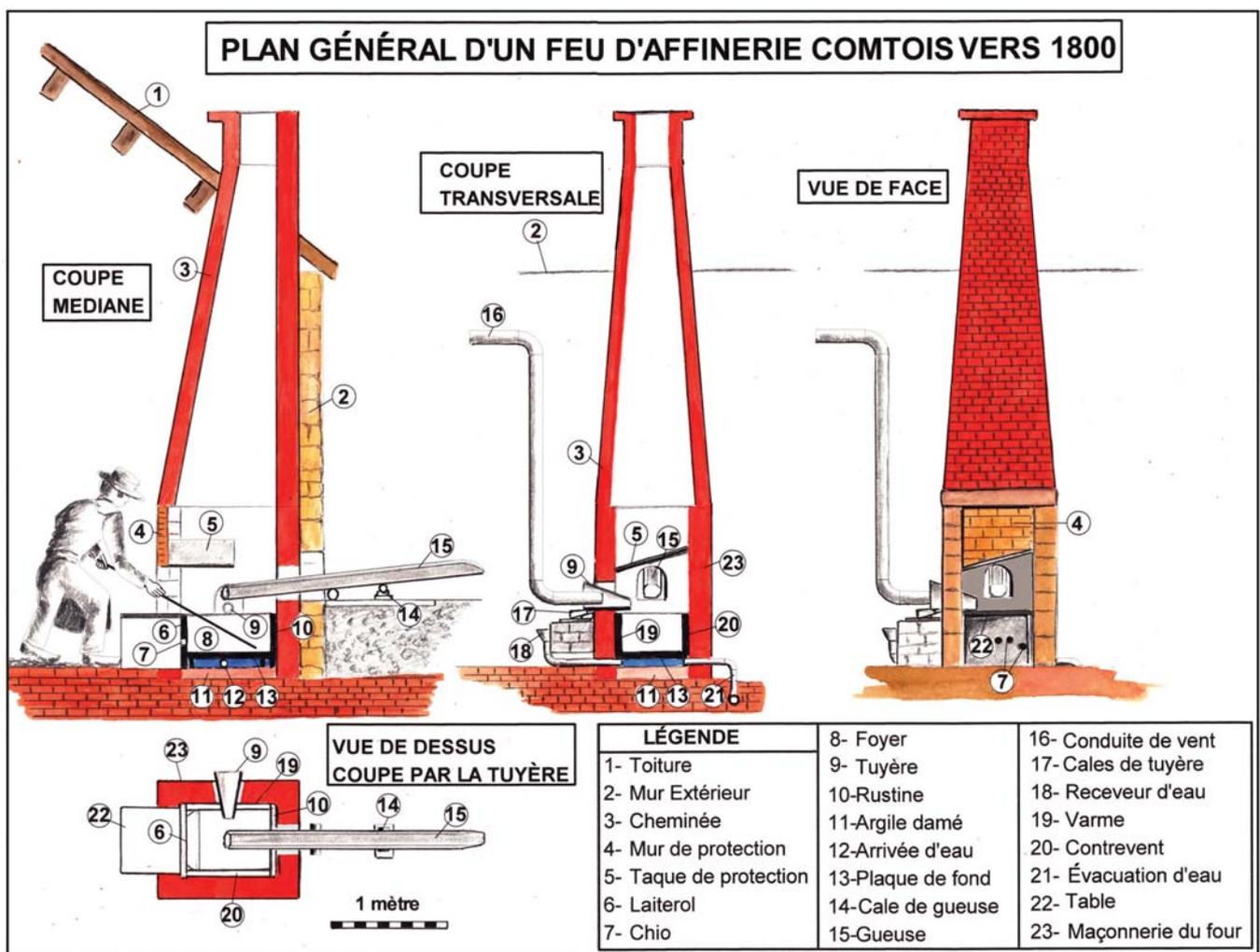
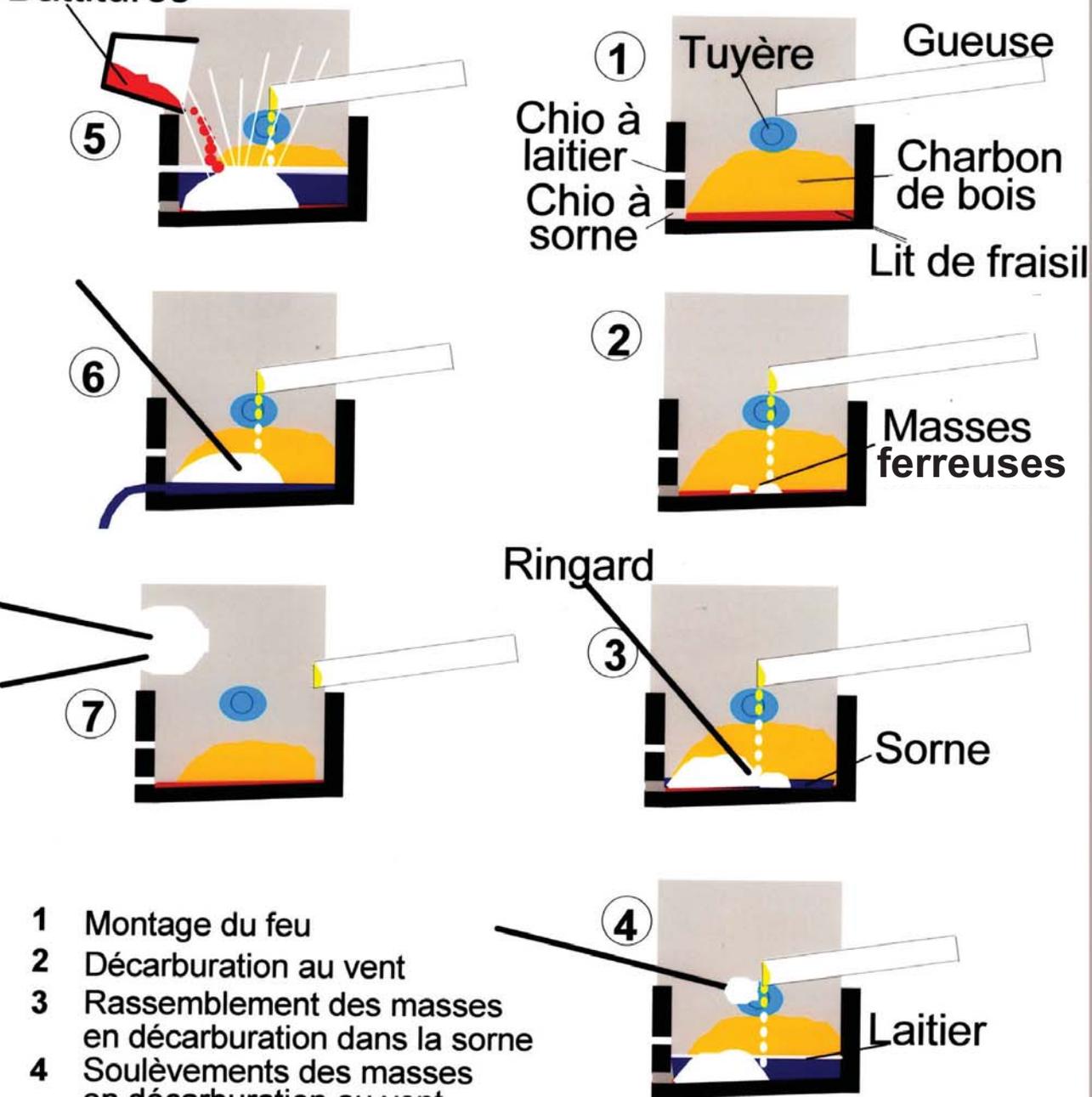


Fig. 78

# AFFINAGE DE LA FONTE

Principales phases de l'affinage  
au feu d'affinerie

Battitures



- 1 Montage du feu
- 2 Décarburation au vent
- 3 Rassemblement des masses en décarburation dans la sorne
- 4 Soulèvements des masses en décarburation au vent
- 5 Décarburation aux battitures et coulée du laitier
- 6 Formation de la loupe et récupération des sornes
- 7 Extraction de la loupe

Le schéma du foyer est présenté en coupe par l'axe de la gueuse

Fig. 79

Comme il a été dit précédemment, la gueuse est mise en fusion au-dessus de la nappe de vent. Les gouttes de métal traversent cette nappe dans laquelle l'oxygène brûle le carbone. L'affineur peut ainsi récolter au fond du four un amas pâteux de fonte décarburée, c'est-à-dire transformée en fer. Mais ce serait trop simple de pouvoir obtenir ainsi un affinage qui se fait de lui-même. Cette première opération s'avère insuffisante. L'affineur dispose de plusieurs méthodes pour éliminer tout de carbone de la fonte. La première consiste à reprendre des fragments de la masse obtenue après première fusion pour les présenter à nouveau dans le vent de la tuyère. C'est l'opération de soulèvement. Il y procédera souvent plusieurs fois.

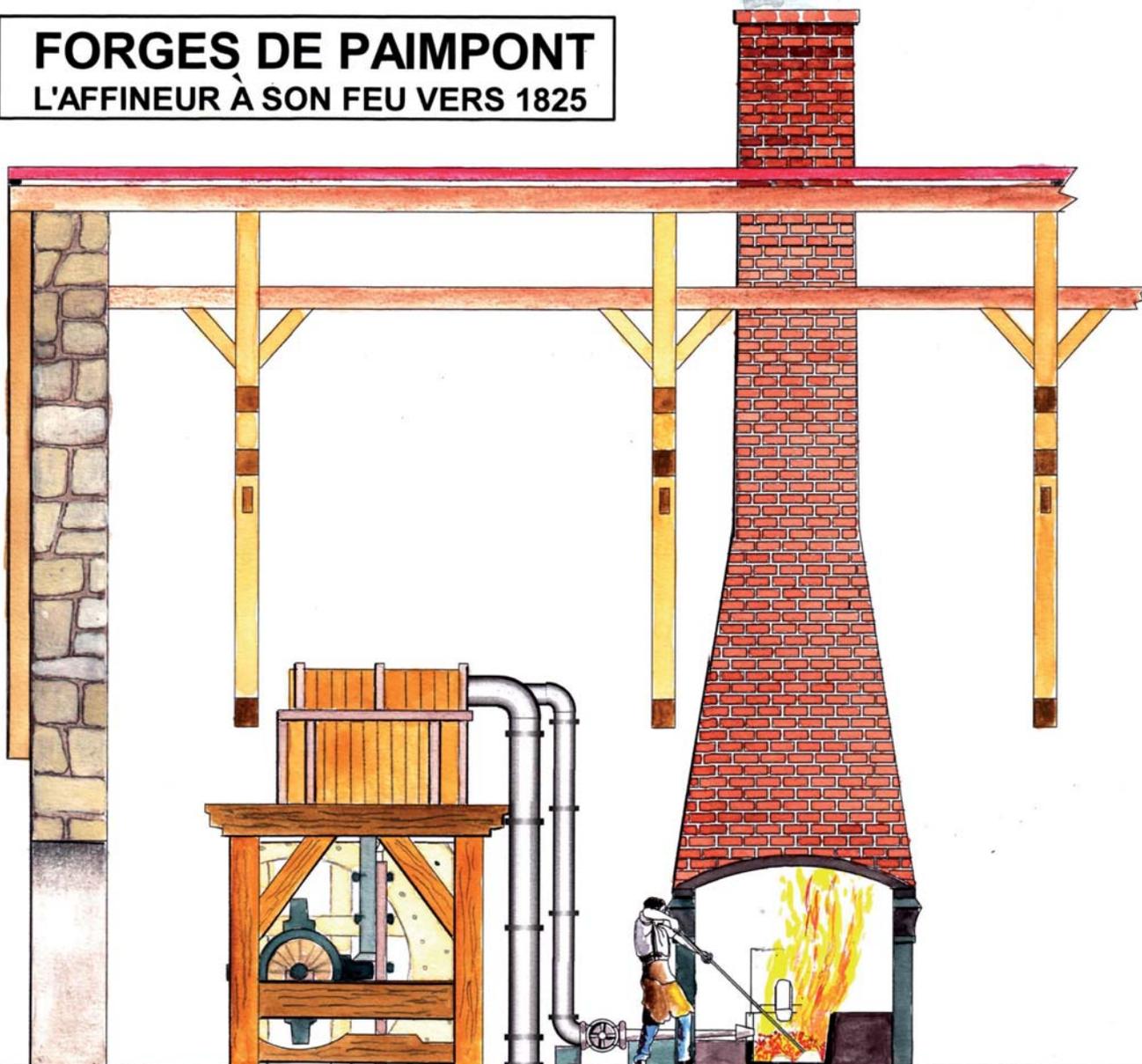
Il dispose cependant d'une aide naturelle. La gueuse à l'état brut contient des matières étrangères, notamment du laitier encore parfois riche en fer, de la silice du chantier de coulée. Ces matières vont se séparer de la fonte pour former une sorte de bain, la sorne, qui contient quelques oxydes de fer, c'est-à-dire de l'oxygène. C'est en séparant et en déplaçant les masses de fer en formation dans ce bain que l'affineur va ainsi poursuivre l'opération de décarburation. Enfin, pour parvenir à un produit satisfaisant il lui reste la possibilité de recourir à l'action chimique des battitures, c'est-à-dire des plaques ressemblant à de la rouille qu'abandonnent les lingots de fer lors du cinglage au gros marteau ou du passage entre les cylindres des laminoirs.

Un four travaille jour et nuit et produit en moyenne 8 à 9 loupes de fer de 150kg par opération, et cela de 8 à 10 fois par journée. Pour produire une tonne de fer, il faut consommer 1,3 tonne de fonte et 1,5 tonne de charbon. Si l'on fait le bilan général au niveau du charbon depuis le haut fourneau, il faudra consommer quasiment trois tonnes de charbon de bois (équivalent à 13 stères !) pour obtenir une tonne de fer ! On comprend que l'exploitation des forêts commence à poser problème !

La Fig. 80 présente un affineur à son poste sur un four des forges de Paimpont tandis que la Fig. 81 présente un four en fonctionnement vu de face et les Fig. 82 et 83 les plans généraux du dispositif hydraulique de la soufflerie qui dessert les fours. La plus grosse conduite issue de la soufflante va desservir par voie souterraine les autres fours disposés contre le mur opposé.

# FORGES DE PAIMPONT

L'AFFINEUR À SON FEU VERS 1825



Le foyer du four est représenté en coupe pour en montrer la structure

5 mètres

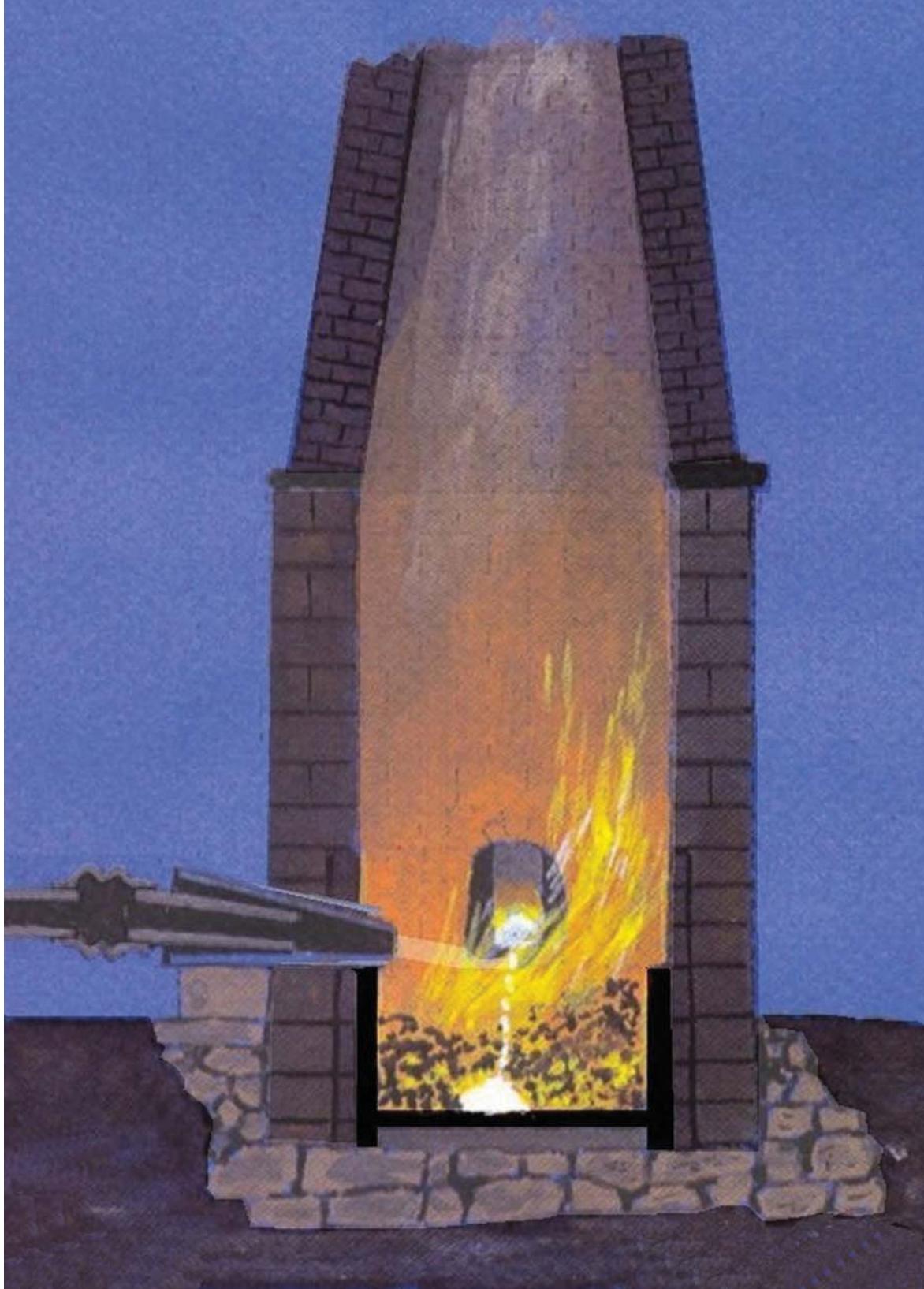


Fig. 80

# L'AFFINAGE DE LA FONTE

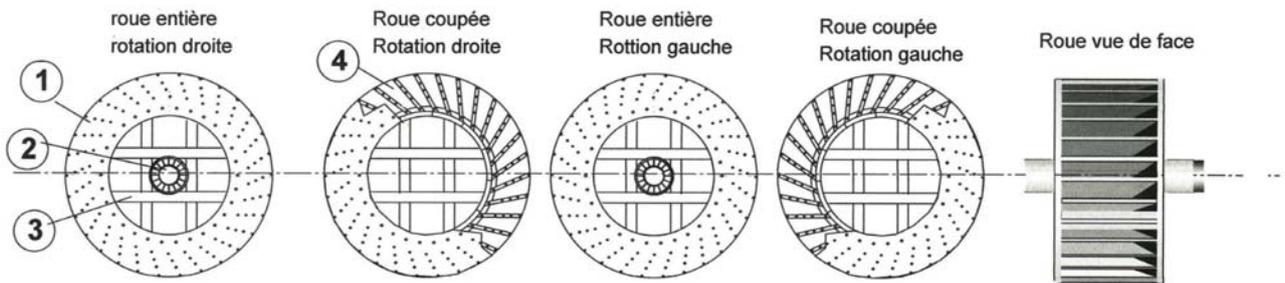
## La méthode comtoise

Coupe d'un feu d'affinerie du XVIIIème siècle

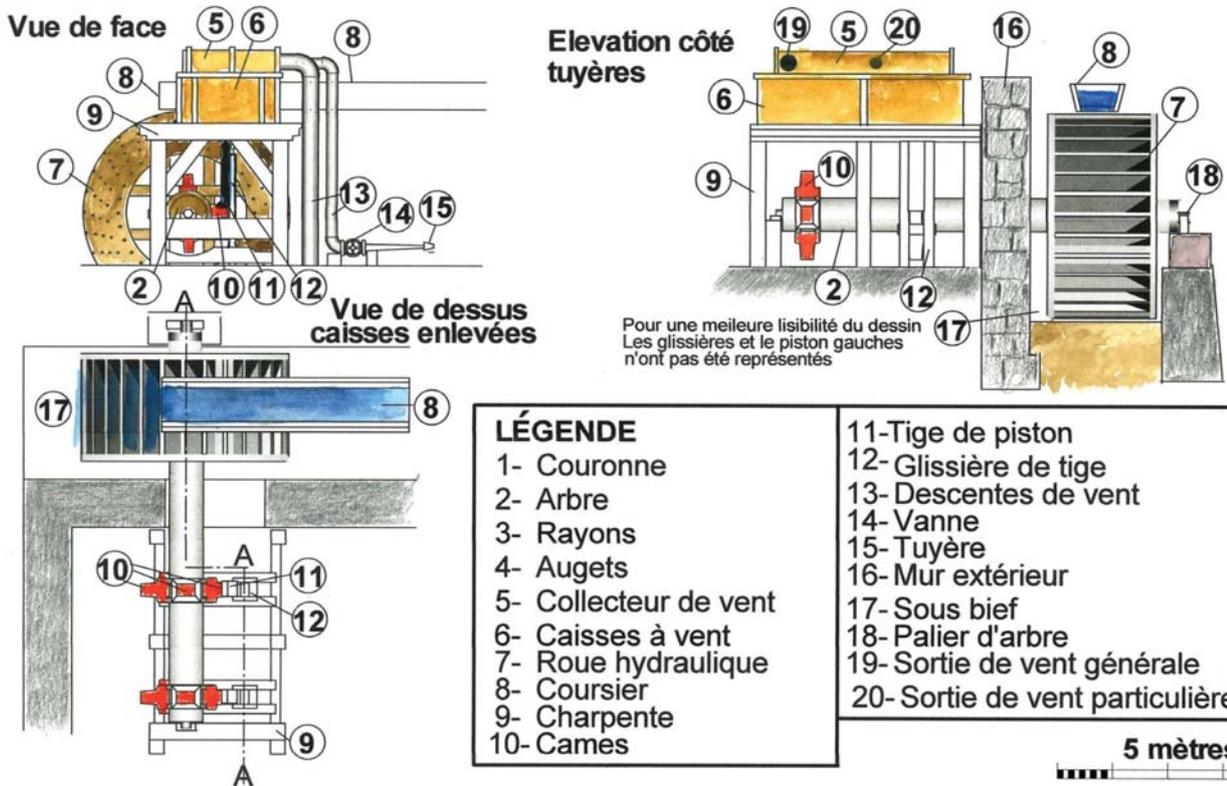


## FORGES DE PAIMPONT SOUFFLERIE DES FEUX D'AFFINERIE

### TYPE DE ROUE "A LA CAPUCINE" DITE AUSSI "PAR LE HAUT"



### VUES GÉNÉRALES D'UNE SOUFFLERIE HYDRAULIQUE DE FEU D'AFFINERIE



LÉGENDE	
1- Couronne	11-Tige de piston
2- Arbre	12- Glissière de tige
3- Rayons	13- Descentes de vent
4- Augets	14- Vanne
5- Collecteur de vent	15- Tuyère
6- Caisses à vent	16- Mur extérieur
7- Roue hydraulique	17- Sous bief
8- Coursier	18- Palier d'arbre
9- Charpente	19- Sortie de vent générale
10- Cames	20- Sortie de vent particulière

5 mètres

Fig. 82

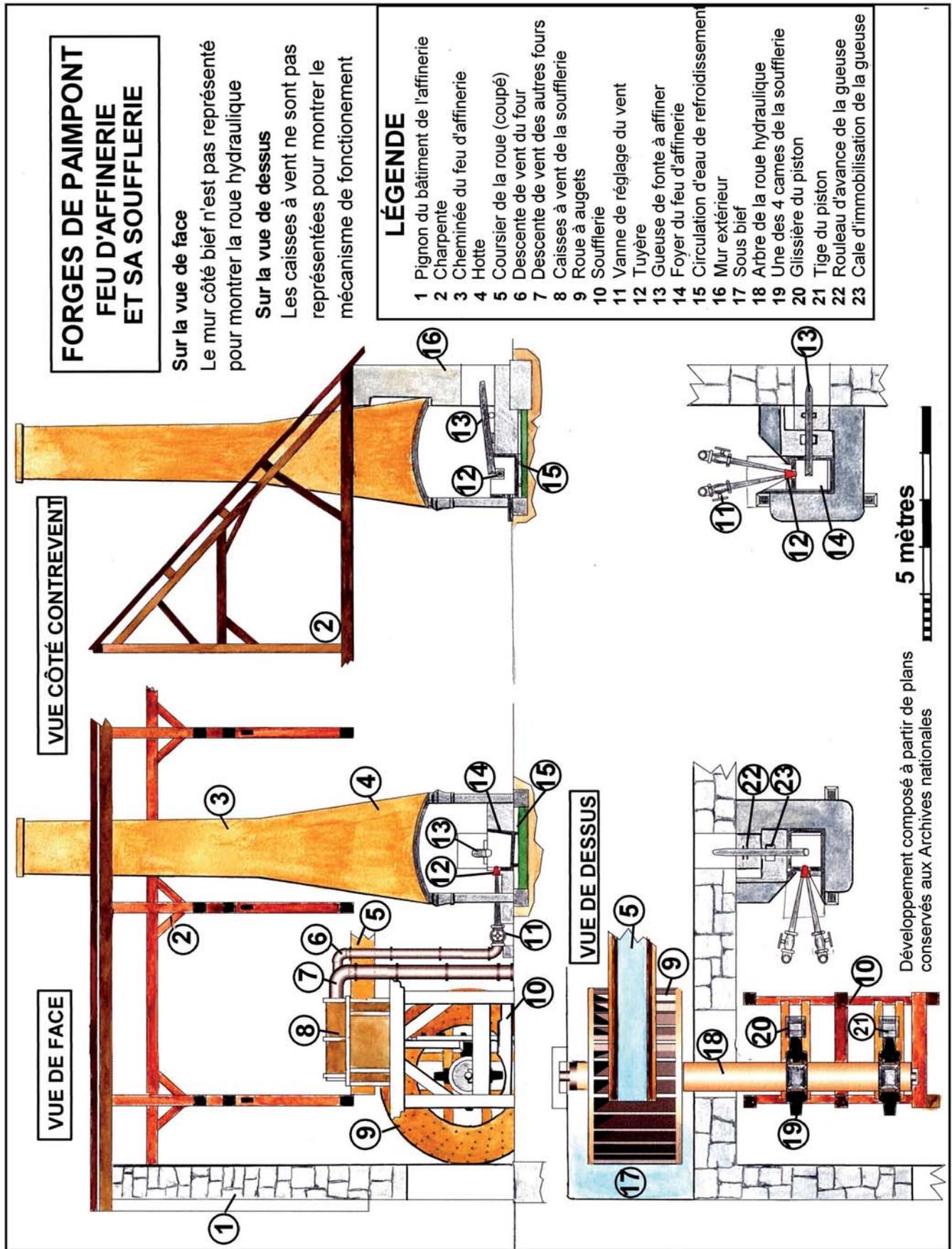


Fig. 83

## Cinglage et forgeage au gros marteau

Enfin le four d'affinerie fait également fonction de four à réchauffer. La loupe une fois sortie du four doit être cinglée grâce à un outil assez impressionnant né avec les forges hydrauliques : Le gros marteau ou maka qui fait trembler le sol de la forge plusieurs fois par minute.

La charpente du gros marteau est très massive car il faut maintenir en mouvement un outil dont la tête pèse plus de 200 kilos et qui s'abat sur l'enclume plus de dix fois par minute (généralement de 30 à 40 fois, mais avec une fréquence réglable en agissant sur la vanne de la roue).

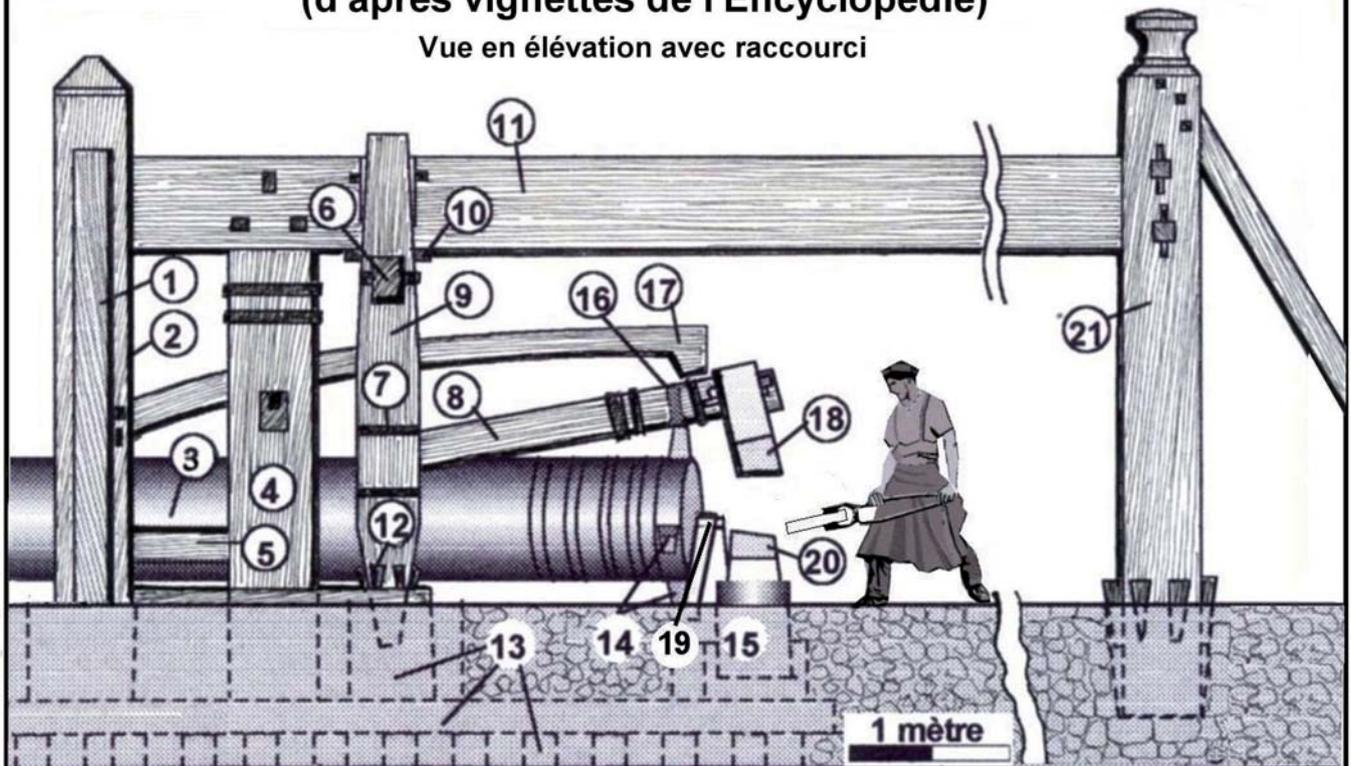
Il s'agit d'un marteau géant dont l'extrémité postérieure est fixée à un axe et dont l'extrémité antérieure est soulevée alternativement par une roue à cames portée par l'arbre de la roue hydraulique.

La Fig. 84 en porte le plan général en élévation tandis que la Fig. 85 montre l'outil en action dans une scène tirée des descriptions de l'Encyclopédie.

La loupe une fois extraite du four est tirée vers le marteau pour être cinglée de façon à en expulser les scories résiduelles, puis coupée en deux massiaux égaux grâce à un outil ressemblant à un hachoir La Fig. 86 présente les différents outils utilisés en affinerie. Le marteleur va ensuite saisir alternativement ces deux massiaux à l'aide d'une longue pince pour obtenir une barre en cinq étapes. Et à chaque phase de travail sur l'un des deux massiaux, il va ramener l'autre au four et en plonger la partie à reforge dans le bain de sorne entre la gueuse et la tuyère. Il l'en retirera ensuite à une température permettant le forgeage en ramenant la partie en cours de martelage pour lui donner une nouvelle « chaude », soit l'amener au blanc soudant. La Fig. 87 résume les principales phases de forgeage qui permettront d'obtenir une barre.

**GROS MARTEAU À ORDON. XVème-XIXème siècle  
(d'après vignettes de l'Encyclopédie)**

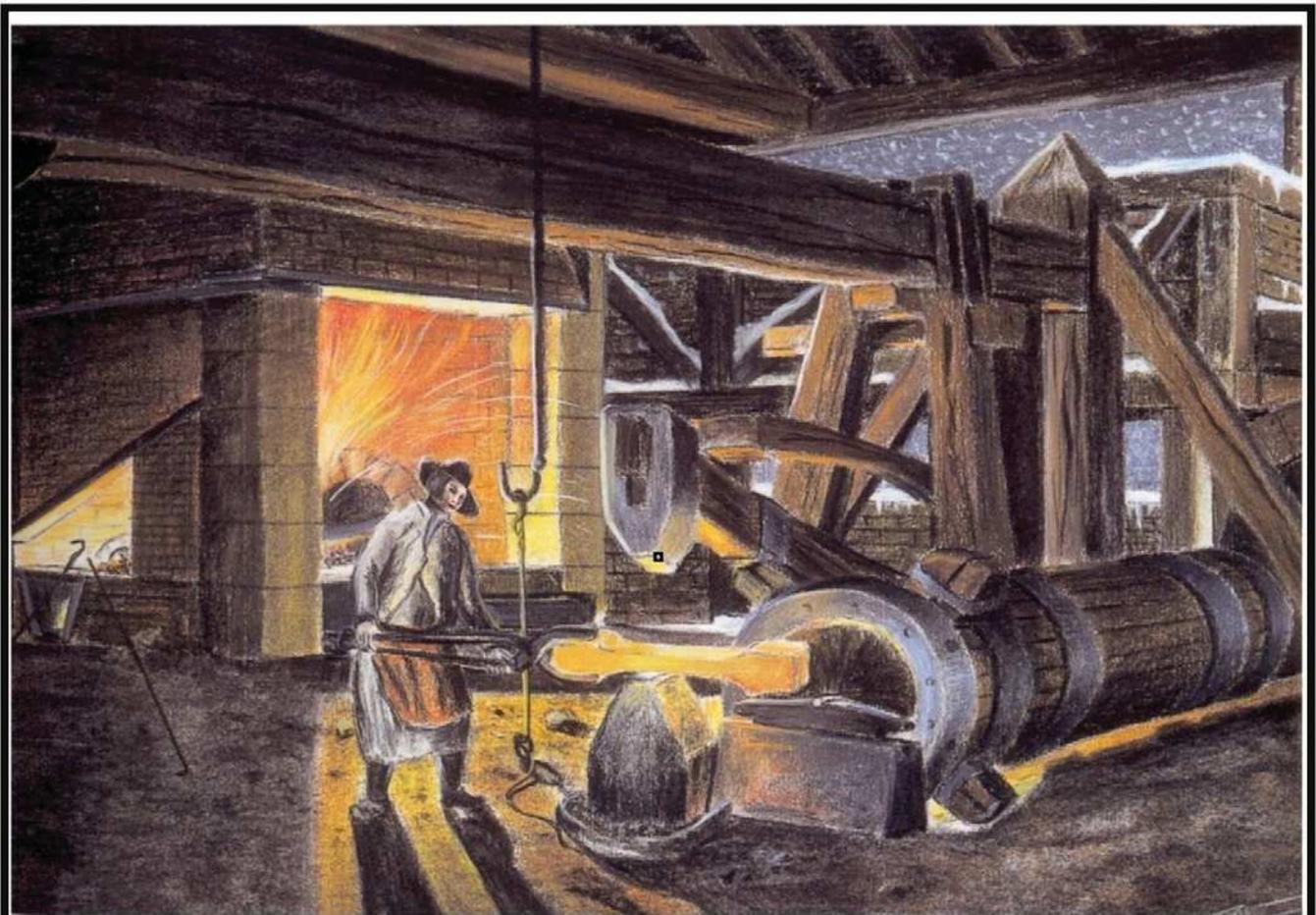
Vue en élévation avec raccourci



**LÉGENDE**

- 1. Bras buttant de grande attache -2. Grande attache -3. Arbre de la roue hydraulique -4. Court carreau -5. Culard -6. Clé tirante -7. Fixation de la crapaudine en fonte recevant la hurasse -8. Manche du marteau -9. Jambe sous la main -10. Tabarin -11. Drôme -12. Coins de calage -13. Poutres de fondation -14. sabots -15. Stock de l'enclume -16. Braye -17. Ressort en hêtre -18. Panne du marteau -19. Empoisse et tourillon de l'arbre -20. Enclume -21. Petite attache.

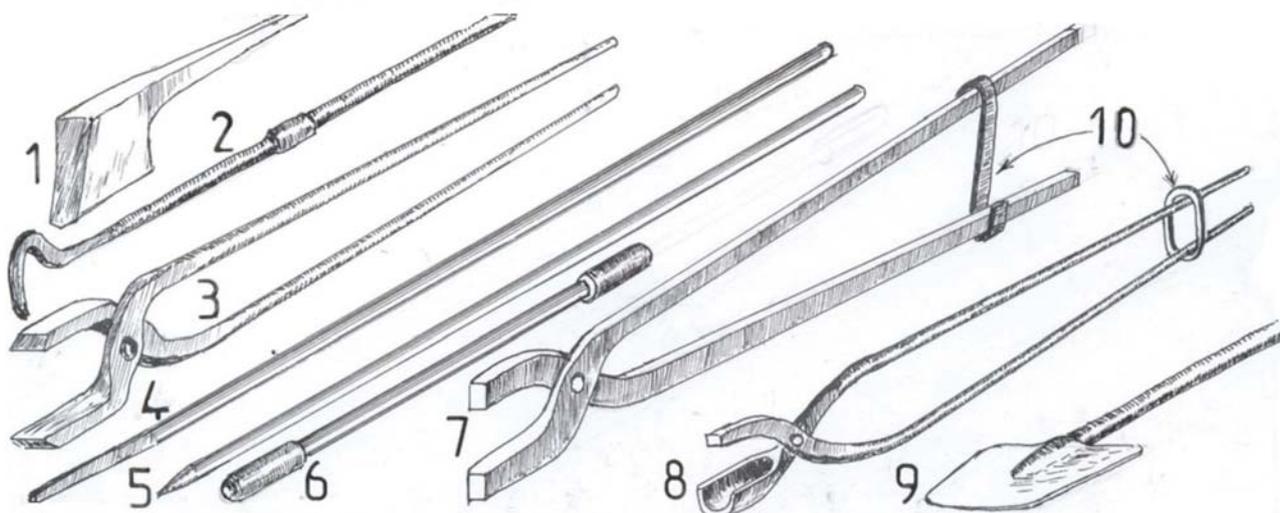
Fig. 84



**Le marteleur forgeant l'écrénée au gros marteau. Au second plan le feu d'affinerie  
(Scène inspirée de l'Encyclopédie. Pastel sec)**

**Fig. 85**

## Principaux outils utilisés à l'affinerie (vers 1820)



### Légende

- 1.Hacheron (pour le coupage de la loupe sous le marteau)-2.Crochet (pour extraire la loupe)
- 3.Grande tenaille à cingler ou écrevisse -4.Gros ringard (pour soulever -la loupe) -5.Pique laitier (pour débouchage du chio)
- 6.Levier (pour porter la loupe sous le marteau) -7.Tenaille à chauffer les pièces -8.Tenaille à coquille -9.Pelle de chauffeur -10.Clame

Fig. 86

## PRINCIPALES ÉTAPES DE FABRICATION D'UNE BARRE AU XVIII<sup>e</sup> siècle

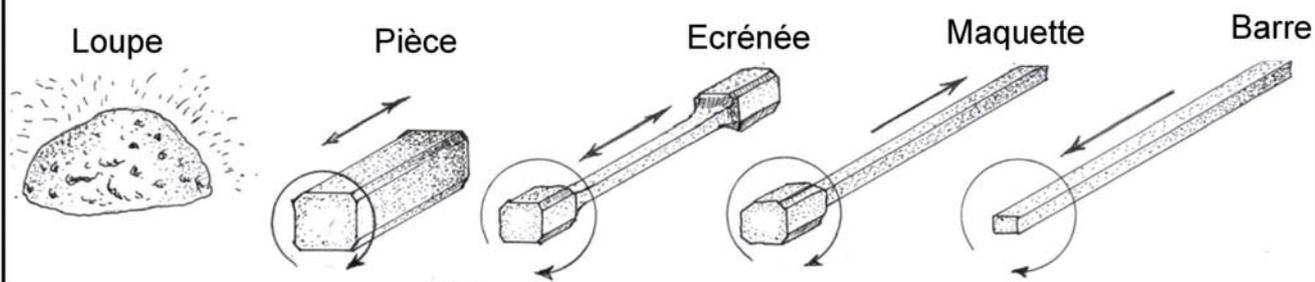


Fig. 87

## Organisation du travail

Affineur et marteleur demeurent sans cesse en contact et cette réalité aboutit à une polyvalence entre les deux hommes, l'affineur prenant en charge des travaux de martelage et le marteleur des travaux d'affinage, cela bien que chacun garde un savoir faire spécifique. Le four est desservi par une équipe de trois hommes qui travaillent en deux postes de 8 à 10 heures, deux forgerons (un à l'affinage et un au marteau) et un valet ou goujat chargé de toutes les tâches annexes, dont l'approvisionnement en matières, l'avancement de la gueuse, l'aide manuelle au marteau...Le goujat dont le nom a pris aujourd'hui, à tort, une connotation péjorative, n'était autre qu'un apprenti, le plus souvent âgé de 10 à 14 ans. L'organisation est schématisée sur la Fig. 88a tandis que les Fig. 87 et 88b résument les principales phases du processus de fabrication. Celle correspondant au forgeage de l'écrénée n'y a pas été portée pour ne pas surcharger le dessin. Mais cela permet de prendre conscience du nombre d'opérations nécessaires à la fabrication d'une simple barre et de l'extrême dextérité dont devait faire preuve le marteleur pour obtenir une forme presque parfaite sous un outil tel que le gros marteau.

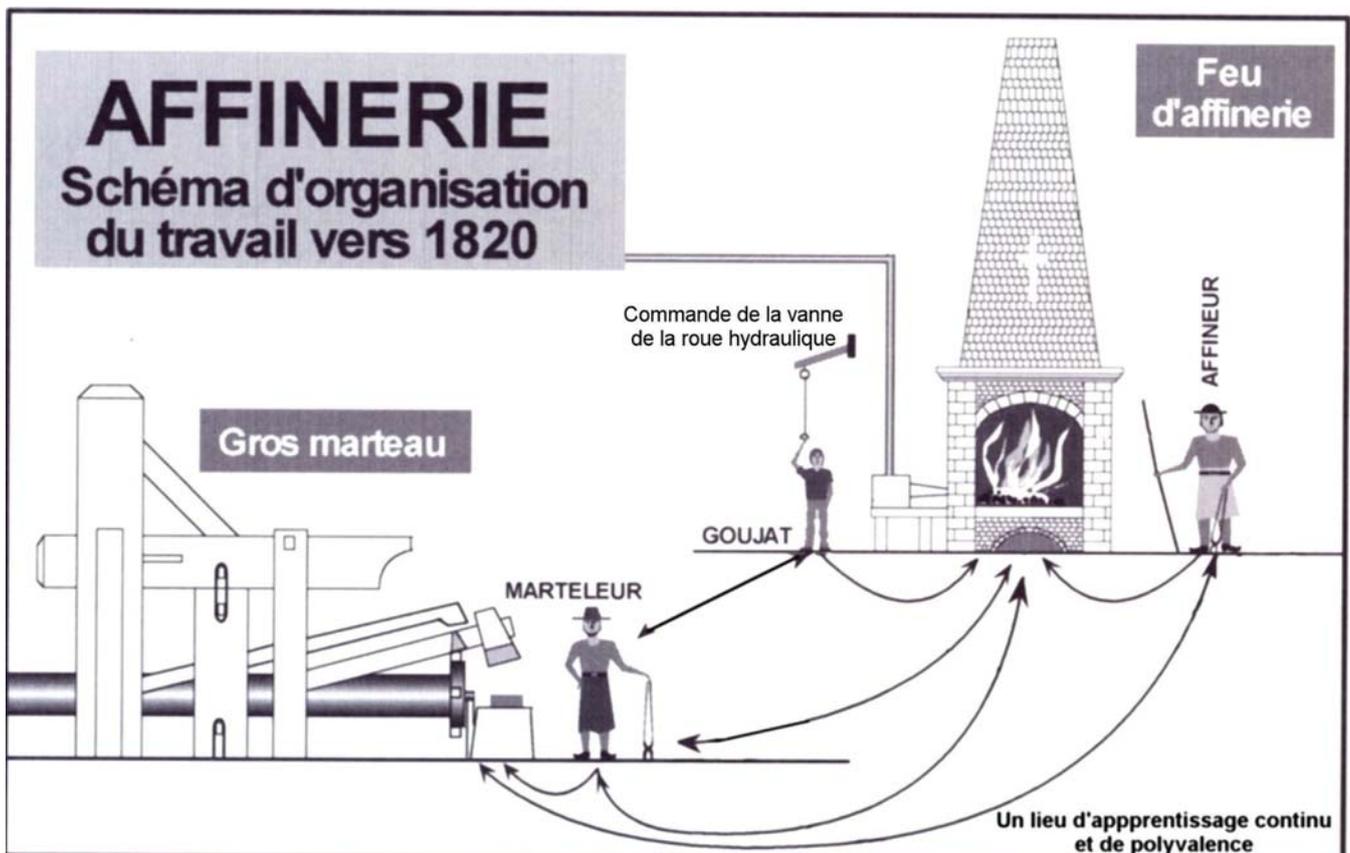


Fig. 88a

Et il ne faut pas perdre de vue qu'un four et son gros marteau produisent environ 700kg de fer en 24H soit 2,8 tonnes de fer sur 4 fours à partir de loupes de 150kg. C'est dire l'animation qui règne dans une affinerie. On ne chôme pas, 24h sur 24 et 7 jours sur sept !

Il existe de plus petits marteaux, généralement munis d'un axe au milieu du manche et soulevés par l'arrière. Leur cadence est plus élevée et ils sont destinés à la fabrication de petits fers plats en tôlerie, par exemple des lames de faux. Mais avant leur modernisation à l'anglaise les forges de Paimpont ne produisent que des fers marchands destinés ensuite aux industries de transformation, ainsi que des pièces de fonte moulée, objet du chapitre suivant.

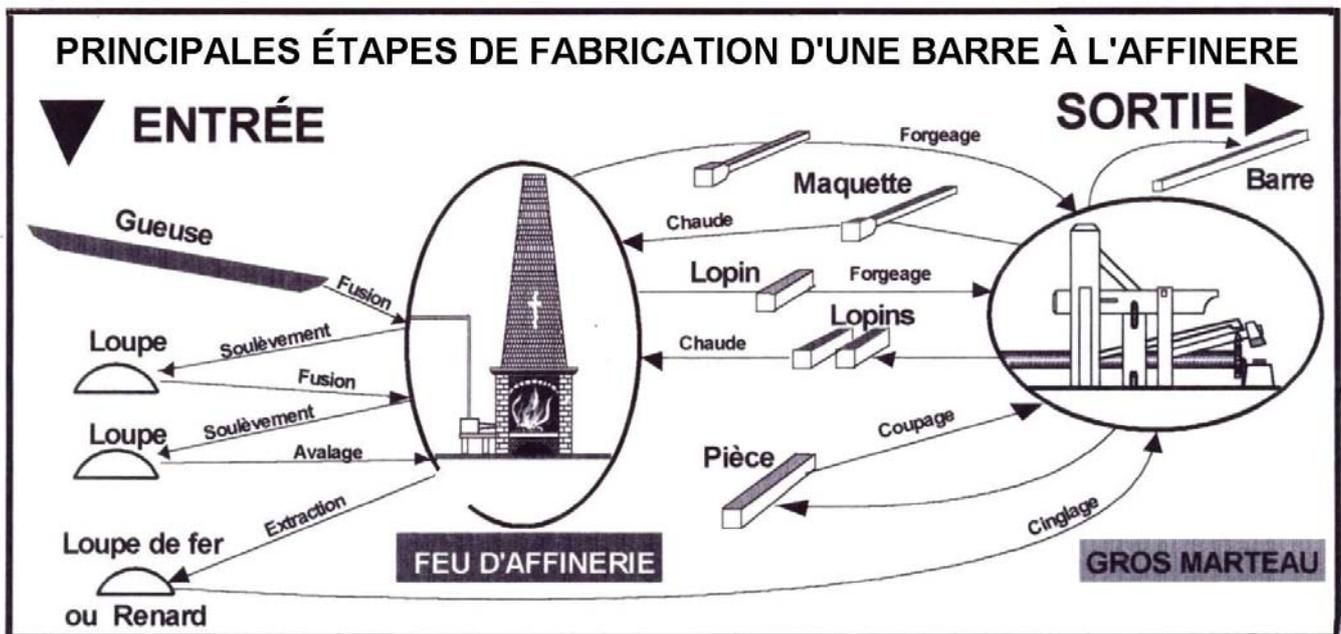


Fig. 88b

## **La Fonderie ou Moulerie**

De toutes les activités de la métallurgie du fer, la fonderie de fonte (métal nommé parfois fer cru au XIX<sup>ème</sup> siècle) est la première dans l'histoire de cette industrie. C'est en effet dès le IV<sup>ème</sup> siècle avant JC que les Chinois moulaient de la poterie en fonte, métal qu'ils savaient produire avec de petits hauts fourneaux (de 1 à 2m). L'un des secrets de cette avancée tient au fait qu'ils utilisaient déjà la force hydraulique pour souffler leurs fours, avec des dispositifs particuliers.

En Occident, la fonderie ou moulerie appelée parfois « l'art de jeter en moule » est apparue naturellement avec le haut fourneau, et n'a pas cessé de se développer jusqu'à nos jours. L'activité de production des pièces en fonte à partir de modèles, soit qu'il s'agisse de reproduire directement une pièce existante apte à constituer un modèle, soit qu'il s'agisse de créer une pièce en fonte à partir d'un modèle réalisé dans une autre matière, parfois du plâtre, souvent du bois, appartient à l'art du modelleur, véritable « sculpteur sur bois » des fonderies, et aux fondeurs chargés de confectionner les moules et d'assurer la coulée. Mais des contraintes incontournables s'imposent aux travailleurs de cet atelier.

Ici encore il s'agit de l'aboutissement d'un savoir faire très particulier acquis lentement au cours des siècles. La fonte en fusion, c'est-à-dire entre 1135° et 1350° selon les nuances constitue un métal fougueux et toute erreur d'appréciation conduit à des conséquences fâcheuses, sur le résultat du moulage, mais aussi sur les hommes. Les colères de la fonte laissent toujours des traces. Une première difficulté se présente aux fondeurs : le métal en fusion réagit violemment en présence d'humidité. Et justement, à cette époque, il n'est pas possible de réaliser des moulages en nombre, et souvent de grande taille, avec des matières sèches. Seul le sable de coulée, appelé couramment sable vert, constitué d'un mélange d'argile et de silice dans des proportions définies avec précision, ne peut constituer une matière apte à prendre des empreintes fines et à résister aux pressions de la fonte à l'état sec dans lequel il se désagrégerait. La « pâte à modeler » du fondeur est donc forcément humide.

Alors tout l'art du mouleur et du fondeur va tenir dans l'aptitude à gérer une forme de compromis.

### **La fonderie de seconde fusion**

#### **Le four à réverbère**

La fonderie dite « de première fusion » se pratique au pied du haut fourneau, avec une arrivée directe de la fonte dans les empreintes pratiquées à même le sol de l'usine. C'est ainsi que l'on moule généralement les taques de cheminée et même les canons dans des fosses de coulée. Mais l'activité la plus importante en fonderie se pratique en deuxième fusion dans des ateliers

spécialisés. Il s'agit alors de fondre une seconde fois le métal livré brut en gueusets ou bris de fonte dans des appareils qui ne modifient pas sa structure, mais peuvent en revanche améliorer sa qualité.

C'est alors que la méthode anglaise s'impose à nouveau avec un type de four fonctionnant au « charbon de terre », c'est-à-dire à la houille. L'appareil présente notamment l'avantage de pouvoir se passer de soufflerie, ce qui était rarement le cas jusqu'alors. Il s'agit du four dit « à réverbère » (Fig. 89) dont la partie supérieure en forme de voûte permet de réverbérer la chaleur produite par le foyer, semblablement à ce que ferait un miroir concave pour la lumière. Ainsi la chaleur concentrée sur la sole va permettre de fondre rapidement le métal enfourné, tandis qu'une haute cheminée fournit un tirage tel qu'il n'y a plus lieu de disposer d'une soufflerie. La sole en pente permet à la fonte mise en fusion de s'écouler vers une sorte de réservoir qui, une fois rempli, sera vidé par le percement d'un trou de coulée situé à l'arrière du four (Fig. 89. N° 20 de légende).

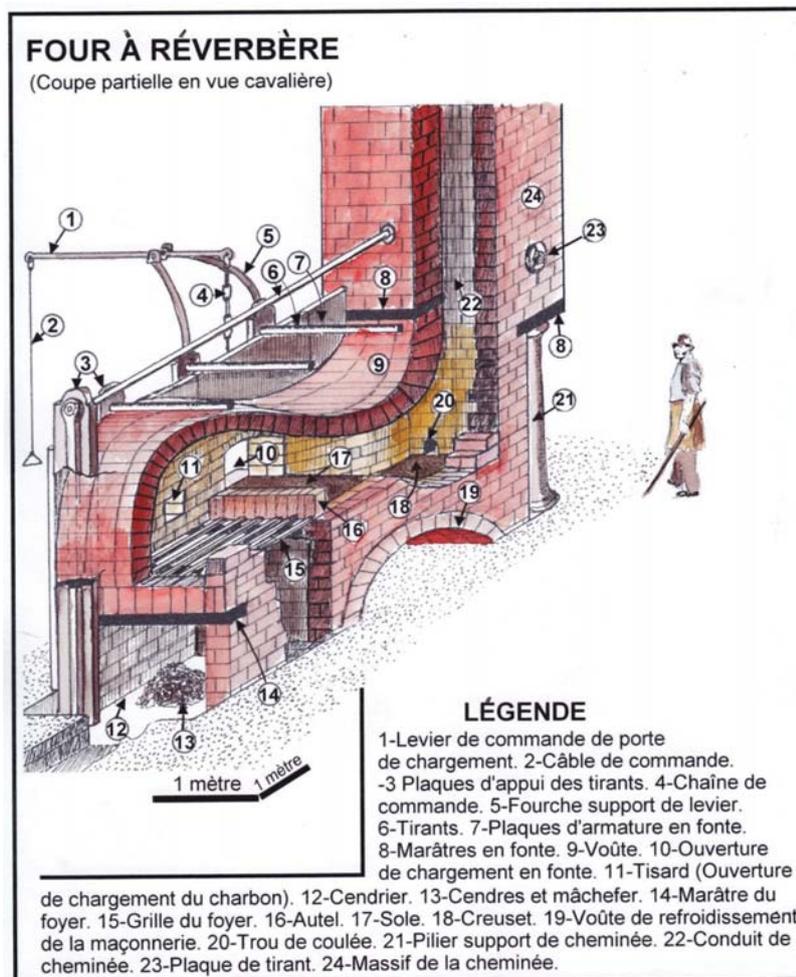


Fig. 89

La fonderie de Paimpont utilise un four double tiré par une cheminée unique, disposition qui permet un gain thermique appréciable (Fig. 90) Le métal est enfourné par une porte coulissante munie d'un revêtement réfractaire (briques), équilibrée par un contrepoids, ce qui permet à l'ouvrier de fournir un minimum d'effort pour la soulever lors du chargement. Du côté du foyer l'ouverture libre du tisard permet au chauffeur de surveiller le feu et de nettoyer la grille avec un tisonnier. Les cendres tombent dans une fosse à laquelle il accède par un petit escalier.

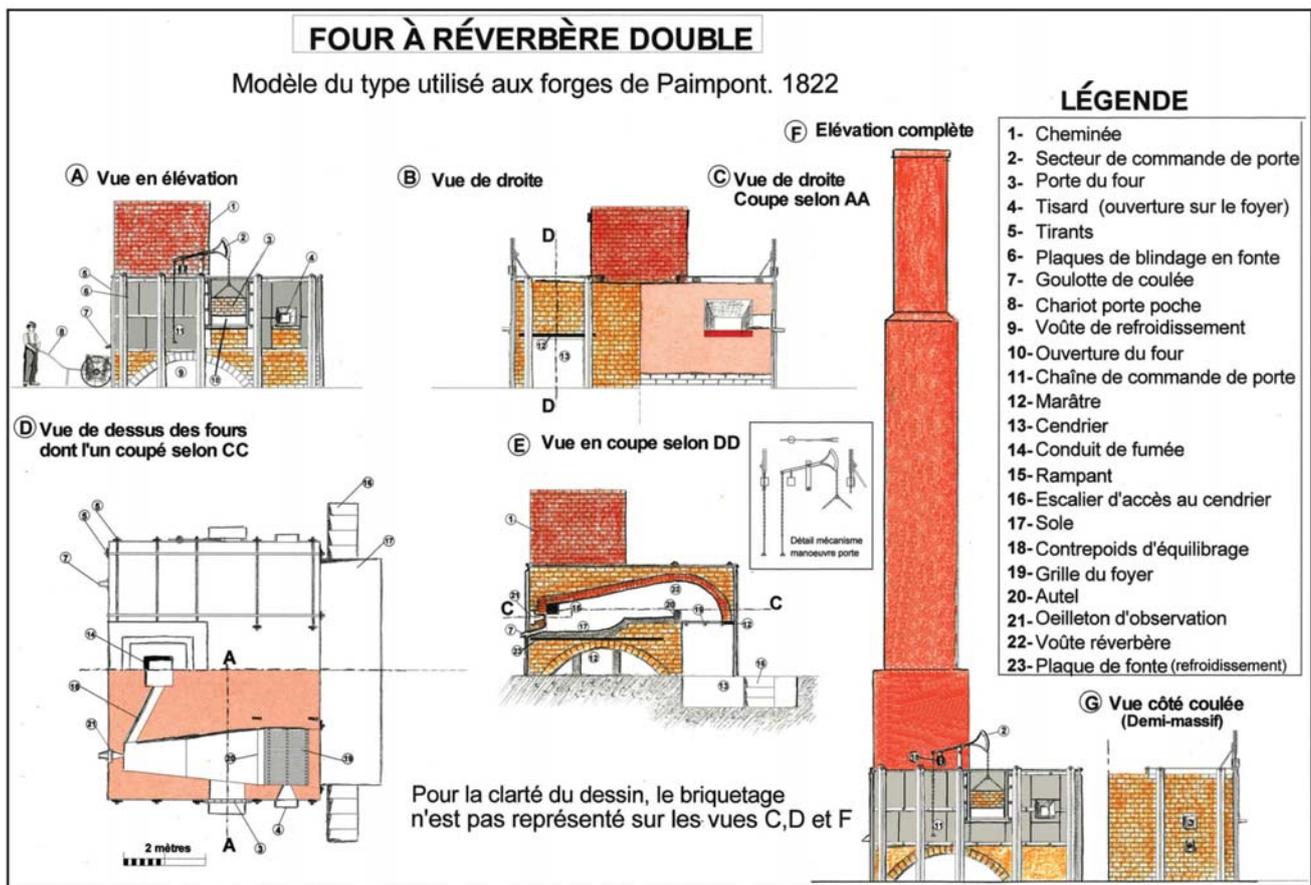


Fig. 90

La sole située sous l'autel, lieu où s'opère la fusion, est refroidie par air grâce à une voûte pratiquée dans la maçonnerie et quelquefois une plaque de fonte jouant le rôle d'échangeur entre cette voûte et la sole constituée d'un lit de matière réfractaire (sable de fonderie).

### Le transport de la fonte en fusion.

Une première difficulté s'impose aux fondeurs : transporter une matière de densité 7 (soit 70kg pour seulement 10 litres !) à une température entre 1200° à 1300°. La moindre erreur ne pardonne pas.

Les premières représentations explicites du transport de la fonte en fusion datent du milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle avec l'Encyclopédie. Il s'agissait alors de la transporter dans de grosses louches en fer garnies de matière réfractaire (argile) qui servaient à puiser directement le métal dans l'avant creuset du haut fourneau avant de le couler rapidement dans les moules disposés sur le chantier de coulée.

Avec le développement des forges à l'anglaise et la moulure de deuxième fusion qui prend de l'importance, la fonte sera transportée d'abord manuellement par deux fondeurs dans des poches appelées aussi chaudières (Fig. 91). Il s'agit d'un récipient en tôle, en forme de seau, toujours garni d'argile. Le poids de ce récipient muni de deux manches à chaque extrémité dépasse parfois 100kg lorsqu'il est chargé de fonte. Ensuite, pour produire des pièces plus importantes, on utilise des poches de plus grande capacité souvent garnies d'un briquetage réfractaire. Elles sont alors transportées sur un chariot particulier (Fig. 92) et reprises par des grues pour assurer la coulée avant l'apparition des réducteurs mécaniques à pignons qui constitueront le dernier dispositif de manœuvre encore utilisé. (Poche pivotante. Fig. 93) Ici, à Paimpont, nous nous trouvons dans le cas de transport manuel ou sur chariot vers une grue de coulée.

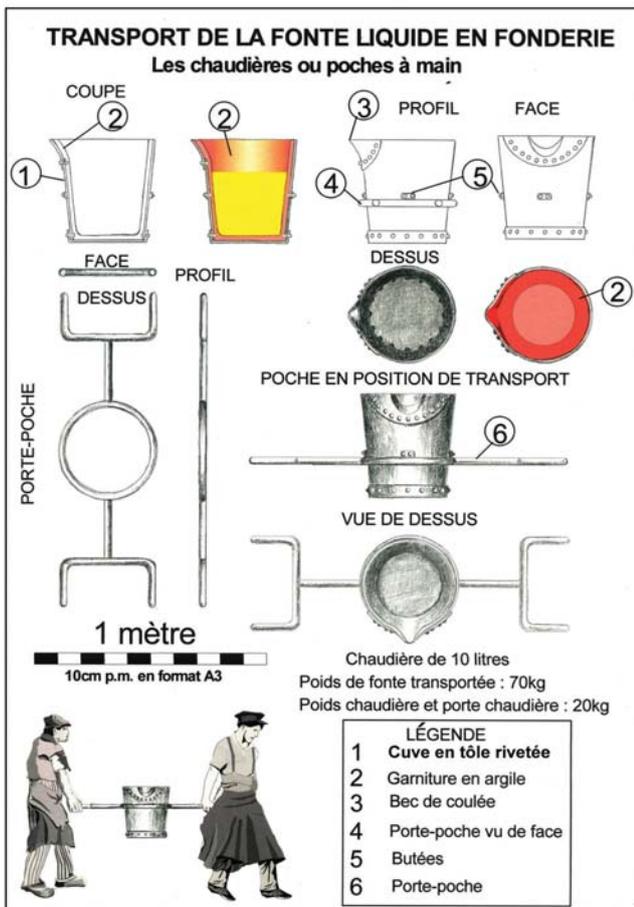


Fig. 91

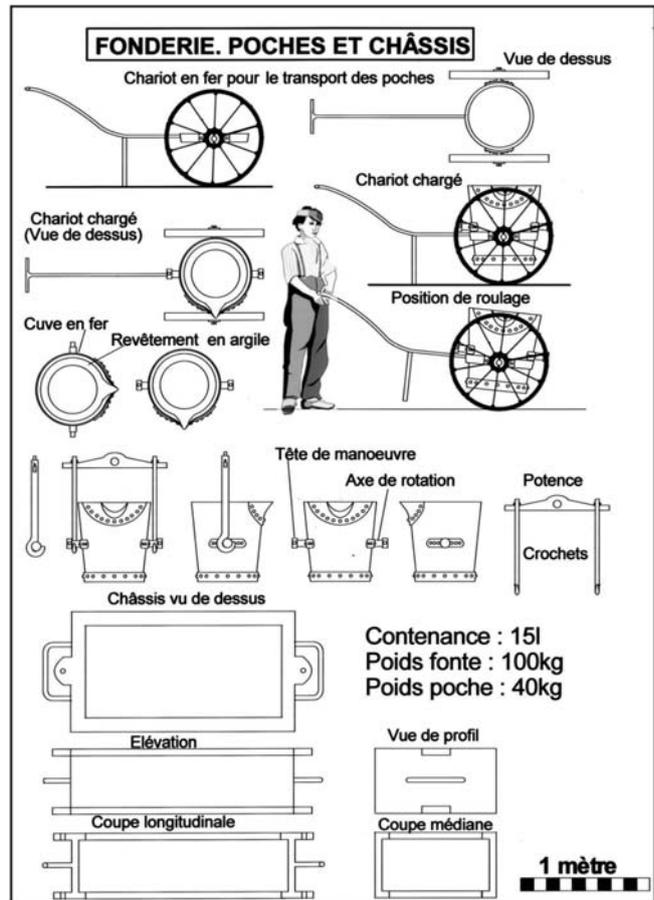
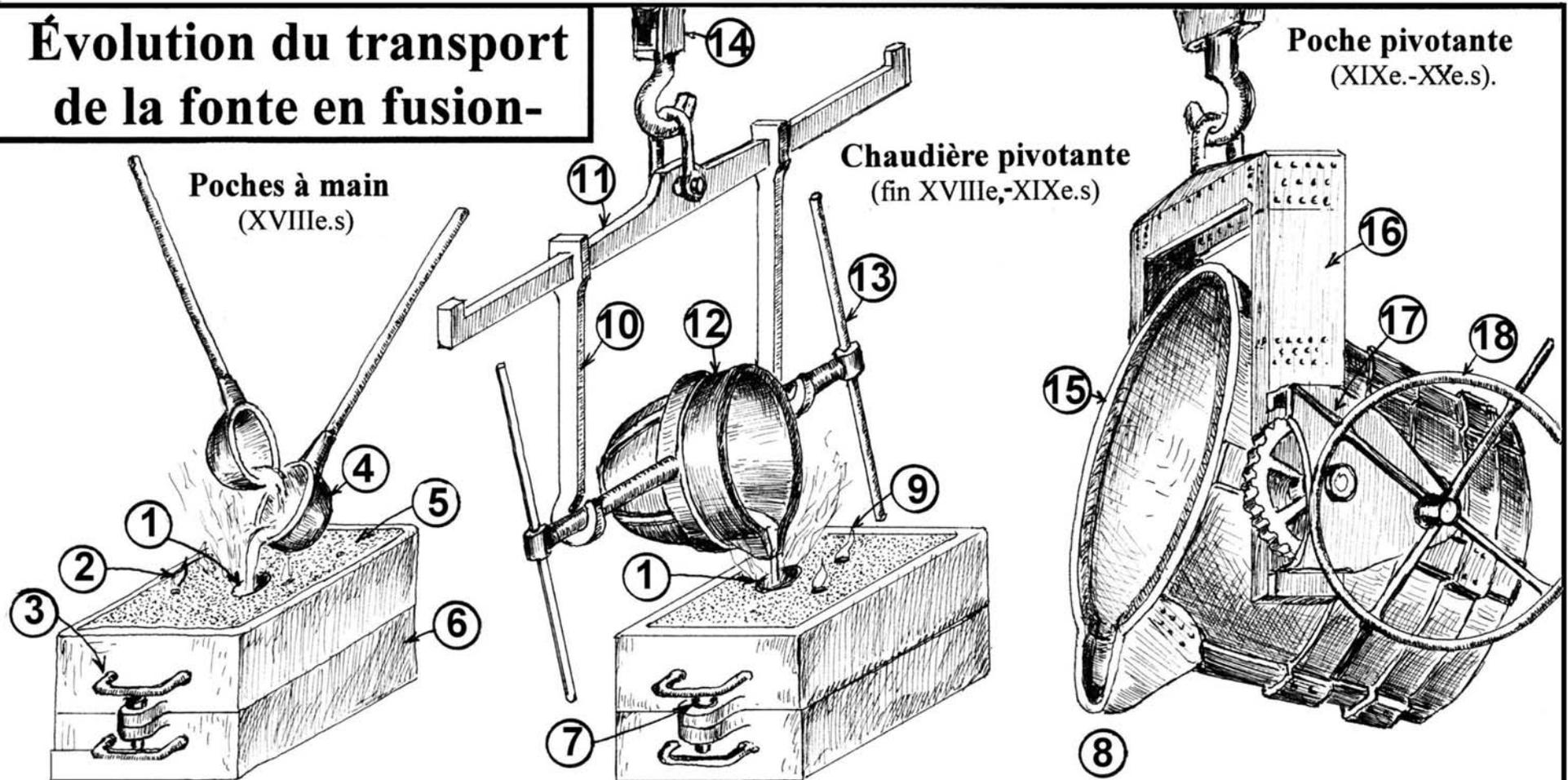


Fig. 92

# Évolution du transport de la fonte en fusion-



1-Jet de coulée. 2-Évent. 3-Poignée de châssis. 4-Petite chaudière à manche  
 5-Sable de coulée. 6-Châssis. 7-Goupille de liaison des châssis. 8-Bec de coulée.  
 9-Sortie des gaz enflammés. 10-Crochets. 11-Poutre. 12-Chaudière. 13-Bras de manoeuvre.  
 14-Crochet de palan. 15-Poche. 16-Chape porte poche. 17-Réducteur  
 18-Volant de manoeuvre.

## L'art de jeter en moule

Selon l'expression consacrée à l'époque, la fonte en fusion transportée dans des chaudières ou des poches est destinée à être « jetée » en moule pour fabriquer une multitude de pièces. Mais certainement pas « jetée » dans n'importe quelles conditions !

La confection du moule présente des contraintes incontournables. On peut soit reproduire un objet existant en prenant ses empreintes, soit le réaliser à partir d'un modèle fabriqué dans une matière assez solide, soit du plâtre, particulièrement pour la statuaire, soit plus généralement du bois. C'est l'art du modelleur, véritable sculpteur d'objets industriels, mais aussi usuels, et artistiques.

Une première contrainte apparaît à ce niveau de fabrication : la dépouille. Il est bien entendu impératif de pouvoir retirer le modèle de la matière à mouler (généralement du sable vert, comparable à une forme de « pâte à modeler » mais aux réactions non plastiques) sans détériorer l'empreinte, d'où la nécessité de lui donner certains angles facilitant ce retrait (Fig. 94). Ces angles constituent la « dépouille ».

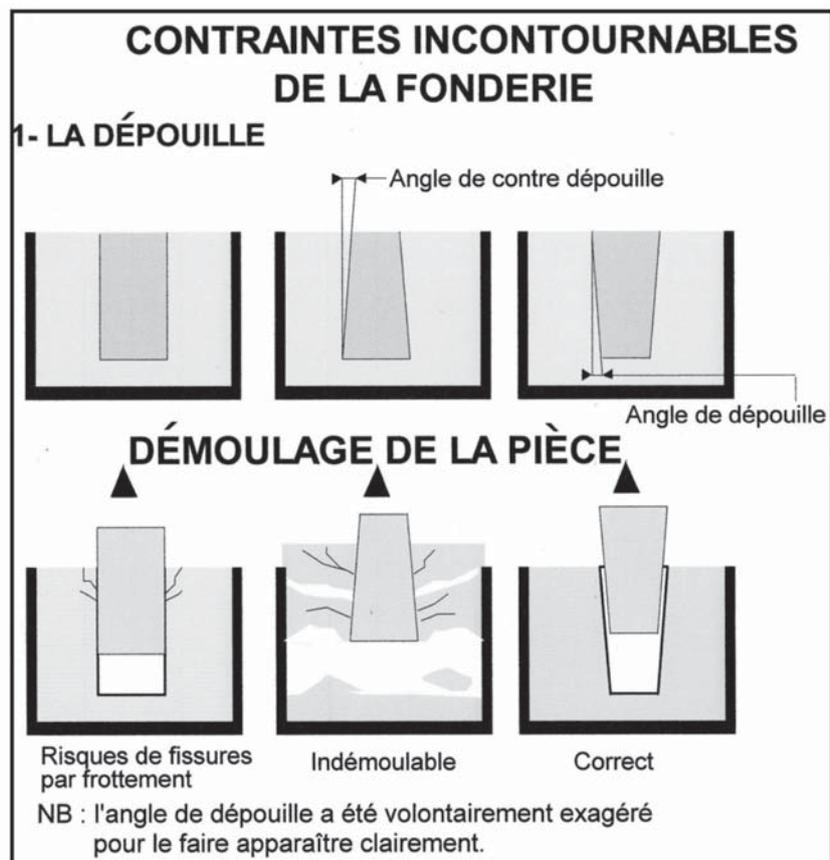


Fig. 94

La deuxième contrainte est liée à la densité de la fonte. Densité 7. Sept fois plus lourde que l'eau ! On imagine bien les dégâts qu'elle pourrait causer en se trouvant jetée à 1260° directement sur la surface à mouler ! Détérioration immédiate garantie. Aussi tout moule comporte un talon de coulée, sorte de petite poche creusée dans le sable de coulée à partir de laquelle une petite rigole va conduire sagement mais rapidement la fonte jusqu'à l'endroit où elle va pouvoir remplir ce moule. (Fig. 95)

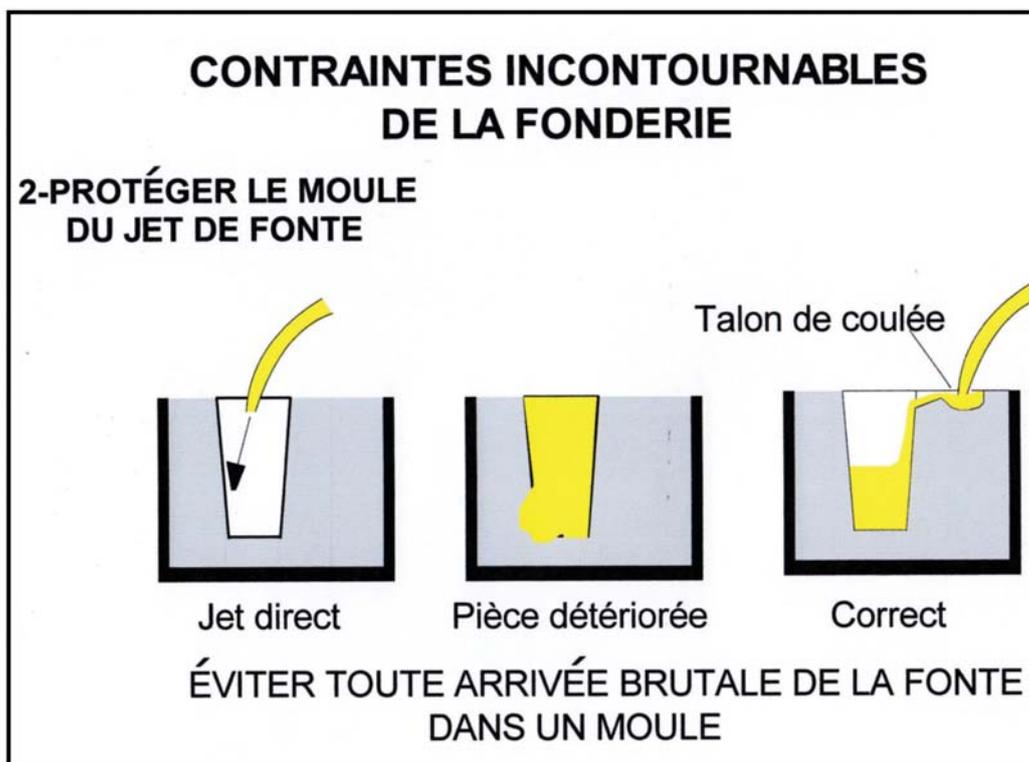


Fig. 95

Enfin, la matière du moule comporte forcément un taux d'humidité pour lier assez solidement la matière et ainsi résister à la pression de la fonte. Or cette dernière a horreur de l'humidité et produit aussitôt à son contact une émanation de gaz assez violente. Le moule doit impérativement résister à cette réaction. La seule possibilité consiste alors à canaliser les gaz afin que cette pression ne devienne pas destructrice, car un défaut d'évacuation des gaz provoquerait l'explosion du moule, cas sinon fréquent, du moins pas rarissime.

Le mouleur dispose alors de deux solutions qu'il met en œuvre ensemble. En premier lieu il ménage une cheminée d'évent à l'endroit le plus approprié en fonction de la forme de la pièce, cheminée qui permettra d'évacuer une bonne partie des gaz. Puis il réalise dans la matière du moule un certain nombre de piquages à l'aide d'une longue et fine aiguille, et ce jusqu'au modèle de la pièce et autour, afin d'augmenter la perméabilité de la matière à la pénétration des gaz.

Il faut donc disposer à chaque moulage d'une intelligence totale du comportement de la fonte afin de lui ménager un trajet qui ne détériore pas le moule et le remplisse entièrement sans risquer de laisser des zones mal desservies. On ne s'improvise pas mouleur sans une solide expérience ! (Fig. 96)

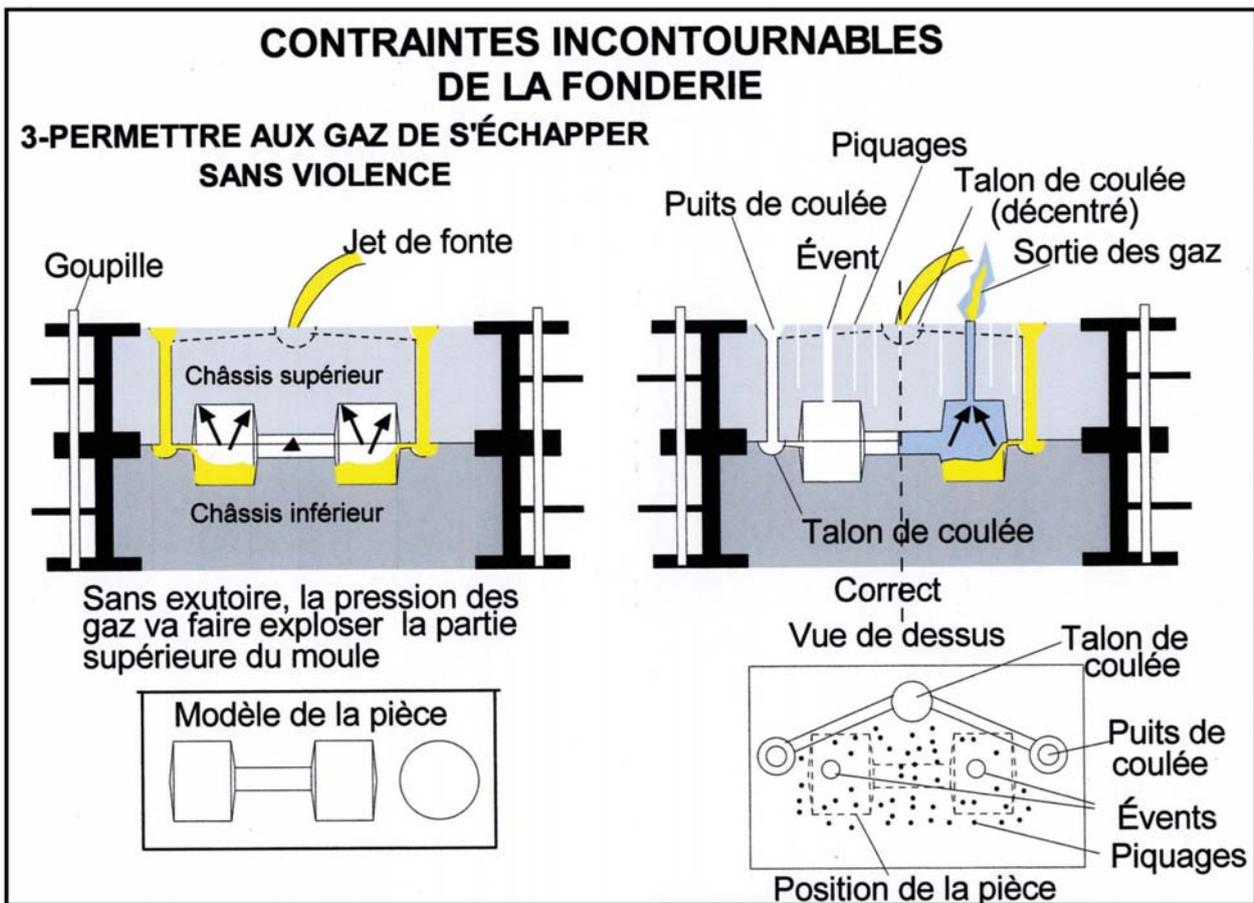


Fig. 96

Pour réaliser son moule, toujours avec cette sorte de « pâte à modeler » qui se lisse à la perfection sans réaction plastique, le mouleur dispose d'outils (Fig. 97) dont un certain nombre rappellent bien ceux du sculpteur. En dehors de ces outils assez classiques, le châssis est destiné à recevoir les différentes parties du moule, le tamis à apporter une matière plus fine pour prendre les empreintes, et l'isolant (poudres de charbon et farines) pour éviter que les différentes parties du moule partagé dans deux voire trois châssis n'adhèrent entre-elles.

Si le moulage ne pose aucune difficulté pour des pièces simples comme un motif plan du type taque de cheminée, en revanche la plupart des pièces de fonderie demandent une étude particulière tenant compte de toutes les contraintes, et se moulent dans une superposition de châssis qui respectent les axes de symétrie. L'exemple donné pour une simple manivelle montre

à quel point on exerce une réflexion spécifique de fonderie pour parvenir à un résultat acceptable. (Fig. 98). Disposition des châssis avec le respect de la symétrie de moulage, talons de coulée, trou d'évent et piquages répondent aux contraintes de coulée en sablerie dont le fondeur ne peut pas s'affranchir. (Fig. 99). On peut dès lors s'imaginer la complexité des moules qui doivent accueillir des modèles de statues ou autres reliefs complexes dans lesquelles on ne trouve de symétries que sur un grand nombre de parties de la pièce ! Le modèle doit alors être exécuté en plusieurs éléments qui devront être démoulés l'une après l'autre et dans un certain ordre.

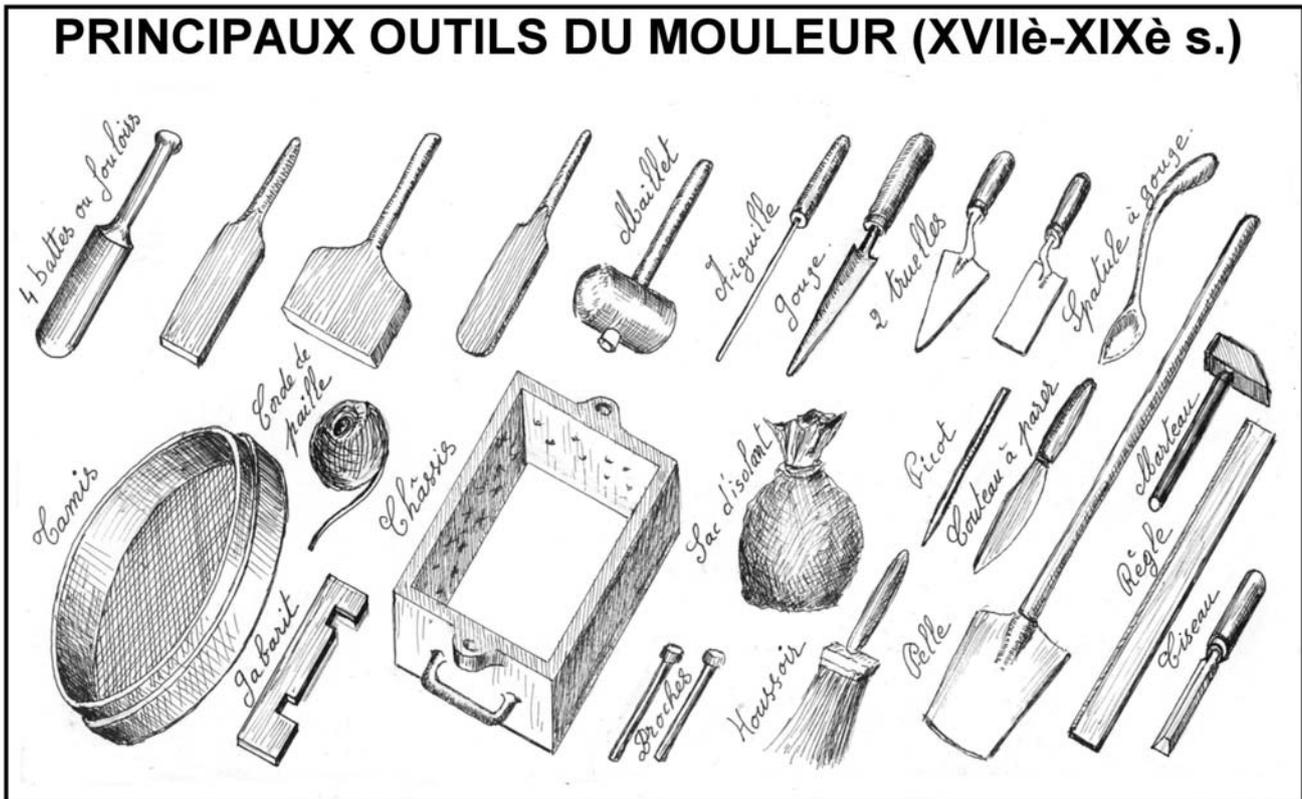


Fig. 97

## PRINCIPALES PHASES DU MOULAGE D'UNE MANIVELLE EN SABLIERIE

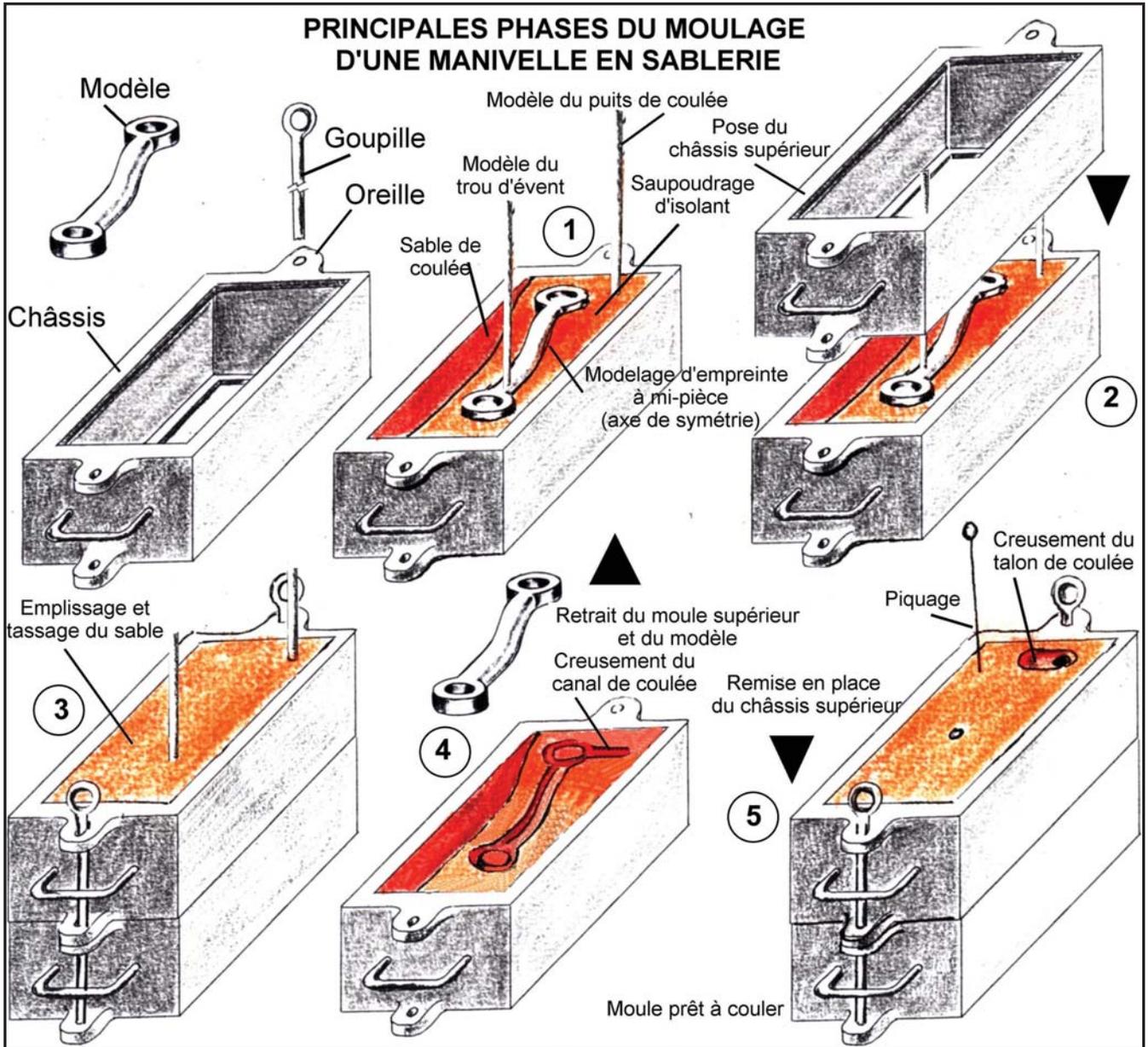


Fig. 98

# MOULAGE D'UNE MANIVELLE EN SABLIERIE

Détails et coupes du modèle et du moule

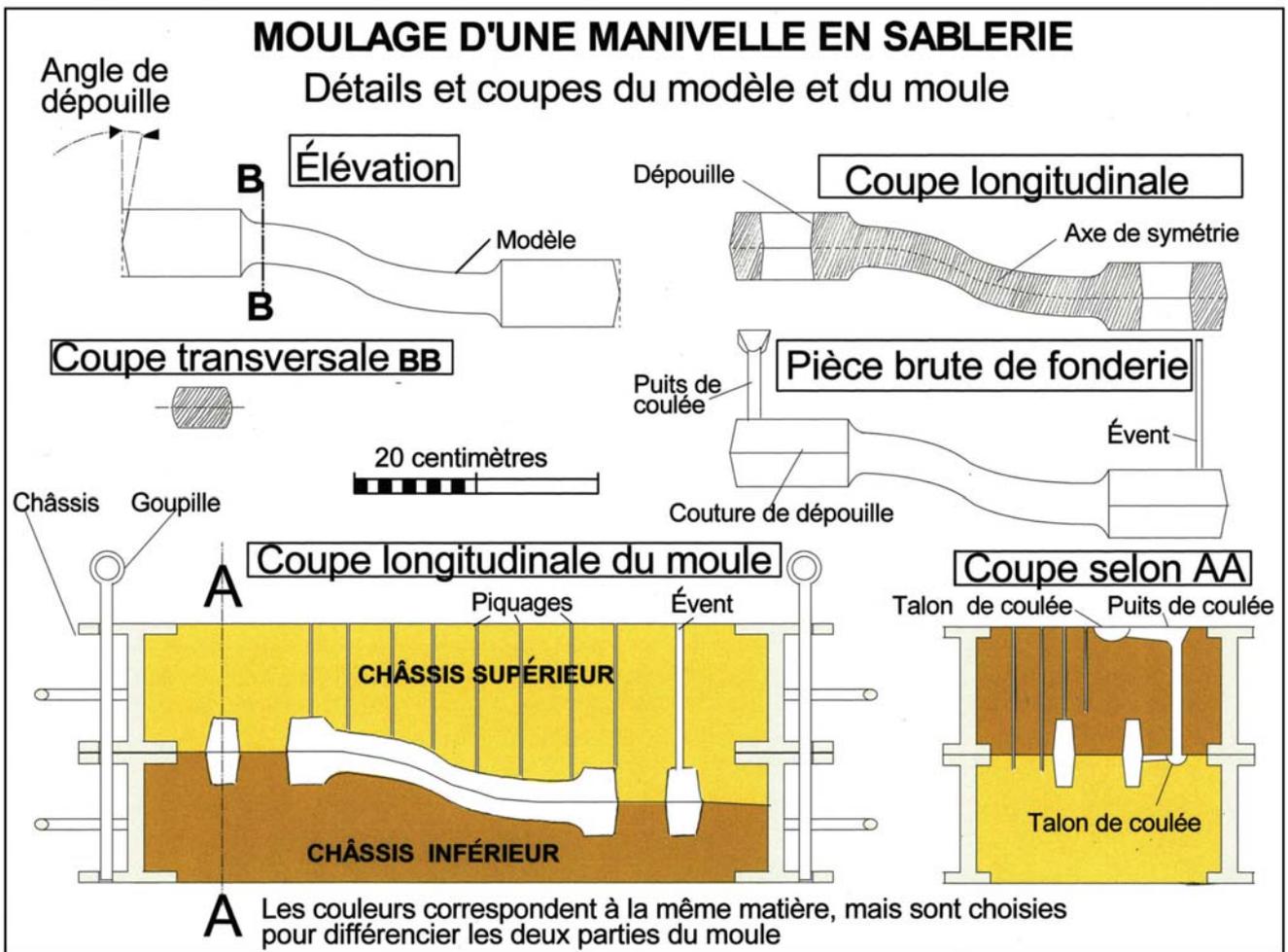


Fig. 99

## **La fonderie de Paimpont. Chantier de coulée, grue et fosse de coulée.**

Le bâtiment qui abrite l'activité de fonderie de Paimpont est édifié sur une hauteur dans la mesure où il n'a aucun besoin de force hydraulique pour accueillir l'activité qu'il abrite. Sa construction remonte d'une façon certaine au moins à l'année 1822, année du contrôle administratif de « l'ingénieur des Mines ». Toutefois une date inscrite sur un chapiteau de colonne indique l'année 1819. On imagine mal comment une fonderie aurait pu fonctionner avant la construction des hauts fourneaux. Mais comme il s'agit de seconde fusion, cette activité s'avérerait possible à partir de fontes produites en d'autres lieux.

Le bâtiment offre une architecture particulière et très fonctionnelle, quoique probablement pas la moins coûteuse au niveau de la construction de la charpente de toiture. Le toit demi-cônique est couvert d'ardoises et supporté par une charpente assez complexe. Il est édifié sur un plan circulaire répondant au balayage utile de la grue, ce qui limite les angles inutiles, tandis que les deux fours accolés occupent un simple appentis qui les met directement au contact avec l'extérieur pour alimenter leur tirage. Le plan conservé aux Archives nationales permet d'apprécier le degré de complexité de la charpente de toiture qui a dû peser dans le coût final de construction du bâtiment. Mais au plan esthétique, elle demeure remarquable dans le genre. Ce même plan des Archives nationales présente une grue à balayage sans translation comme les fondeurs en utilisaient au XVIII<sup>ème</sup> siècle. Mais les plans d'archives de l'époque ne constituent pas, sauf exception (et ça n'est pas le cas ici), des plans d'exécution. Leur destination est administrative pour apprécier les conséquences de l'activité. Il suffit donc pour le dessinateur de plan d'y porter des natures d'appareils et des dimensions. Si on se fie à la description de ce document, la grue ne peut desservir qu'une ligne représentée en AA sur la Fig. 100, (grue représentée en Fig. 101) Or la largeur de la fosse de coulée, qui permet de créer dans le sol de l'usine des moules encombrants en hauteur tels des tuyaux de gros diamètre, demanderait une disponibilité de balayage beaucoup plus ample.

Aussi est-il probable que la fonderie de Paimpont ait été équipée comme ses consœurs de l'époque. Un beau modèle du genre existe à Dommartin-le-Franc. Celui de l'usine du bas intégré à Métallurgic Park (Haute-Marne) est complet. Il s'agit d'une grue à chariotage qui permet d'élargir considérablement les possibilités de positionnement, et de passer d'une simple ligne de service à une aire de balayage, soit une multiplicité de points de service.(aire représentée en grisé clair sur la Fig. 100.)

Toutefois, en respectant la configuration décrite sur le plan des archives nationales, avec une grue sans chariotage, il est tout à fait possible de mouler en fosse de coulée (Fig. 101) à condition de bien disposer le moule, notamment son talon de coulée, et de bien manœuvrer la poche qui va forcément amorcer un mouvement d'avancée lors du versage.

# FORGES DE PAIMPONT

Plan raisonné de la fonderie  
vers 1830

## PLAN DU BÂTIMENT

(Développement d'un plan  
des archives nationales)

Fours à réverbère jumelés  
(dont l'un en coupe horizontale)

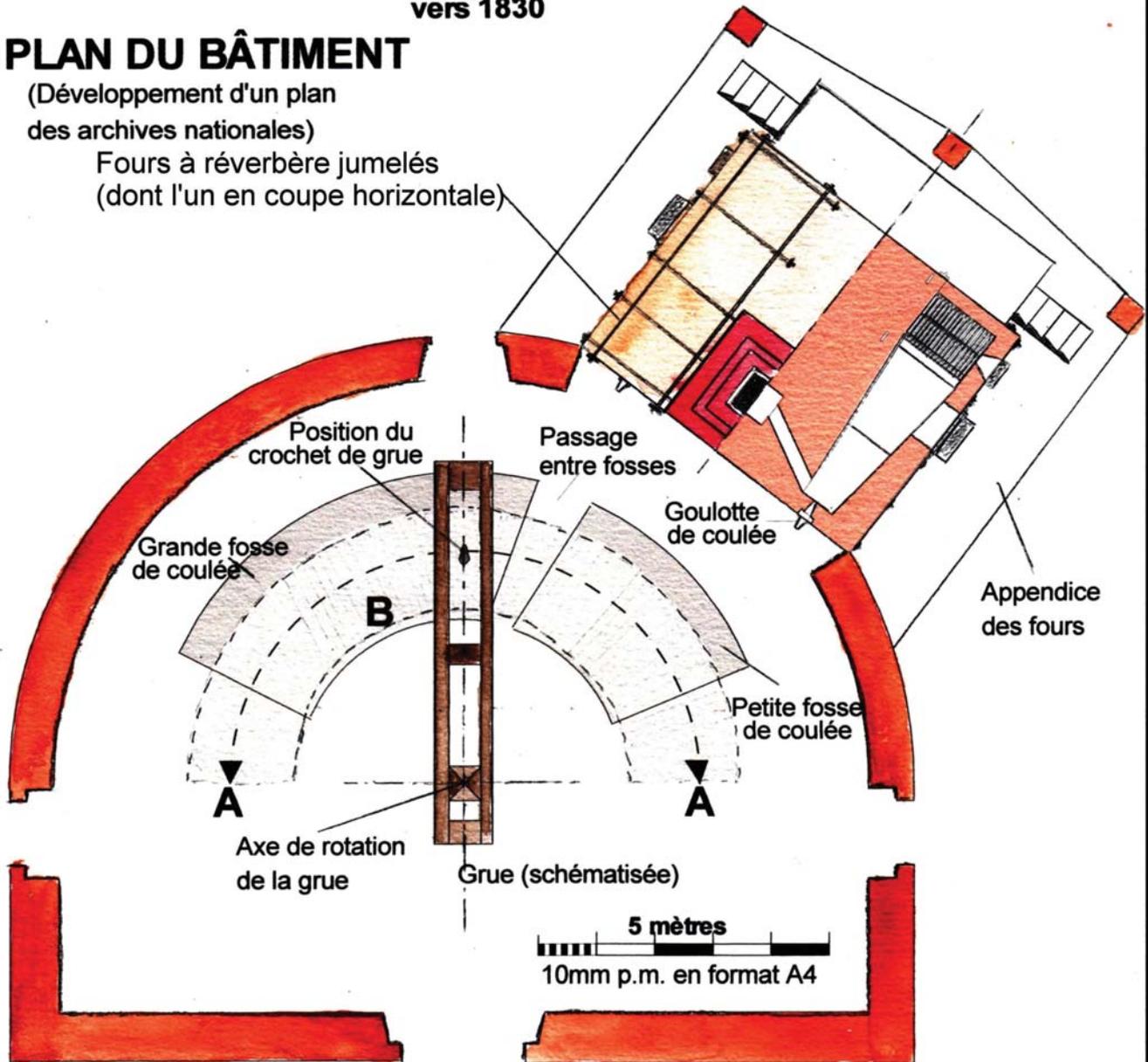


Fig. 100

# LA FONDERIE

## Grue et fosse de coulée

### Disposition adoptée aux forges de Paimpont

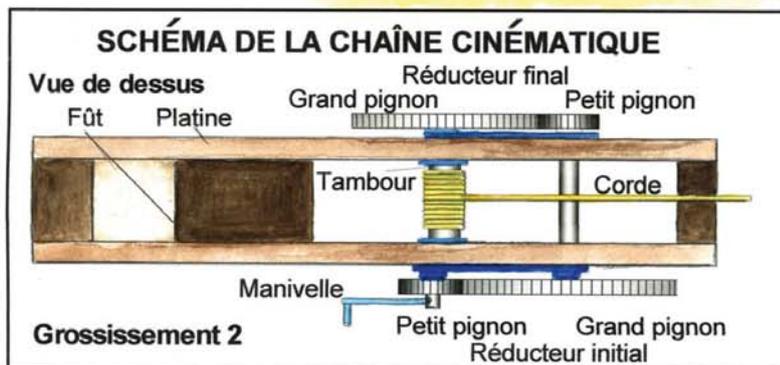
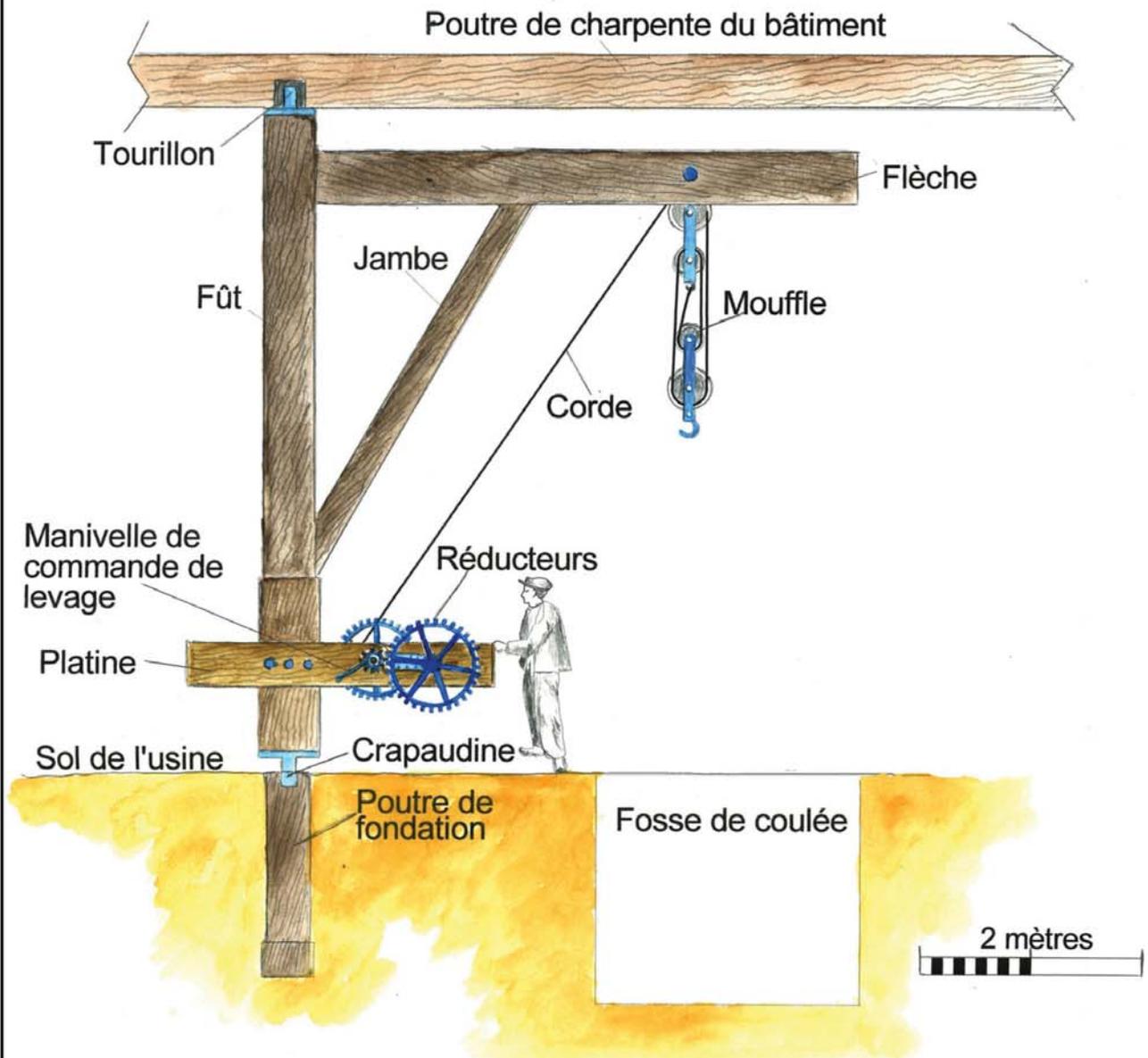


Fig. 101

Dans le cas de fosse de coulée, c'est à dire de fosse maçonnée pratiquée dans le sol de l'usine pour couler des pièces d'une certaine hauteur (principalement des tuyaux et des colonnes), on ne se contente pas de prendre l'empreinte externe de la pièce, ce qui demanderait une quantité de fonte très importante dans le cas d'une colonne, donc un poids de pièce énorme autant qu'inutile. On fabrique alors parallèlement au modèle un noyau qui va permettre de laisser un vide au centre de la pièce, disposition strictement nécessaire pour un tuyau. Le modèle lui-même comprend une extension qui va permettre le centrage de ce noyau.

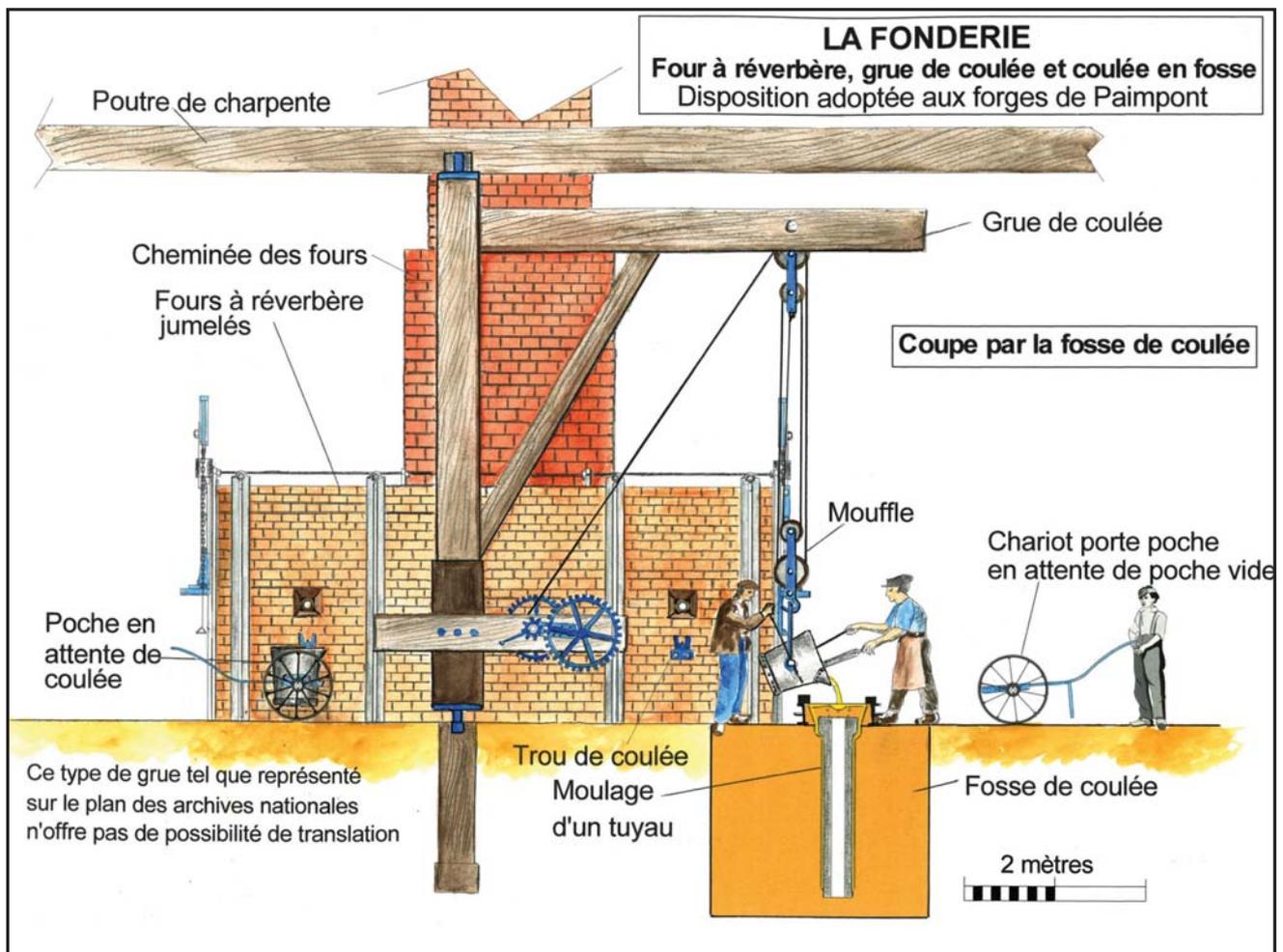


Fig. 102

Ce noyau qui équipe nombre de moules est fabriqué sur un modèle tourné sur l'établi de potier. Généralement composé à l'époque d'une couche d'argile appliquée sur une forme dressée en treillis de paille (Fig. 103), il est destiné à être détruit après démoulage pour laisser place au vide souhaité. Par ailleurs sa structure permet également une évacuation des gaz qui traversent son parement de moindre épaisseur pour gagner sa partie creuse. Il existe une grande variété de forme des noyaux selon la configuration des pièces à mouler. En fonction de la composition de la matière de la chape contenant généralement de l'argile et de la silice, ces noyaux seront soit soumis à un séchage naturel, soit cuits dans une étuve.

Après que les différentes pièces (modèle, noyau, châssis) ont été placées dans la fosse de coulée (Fig. 104), la poche de fonte pourra être amenée pour verser le métal dans les talons de coulée.

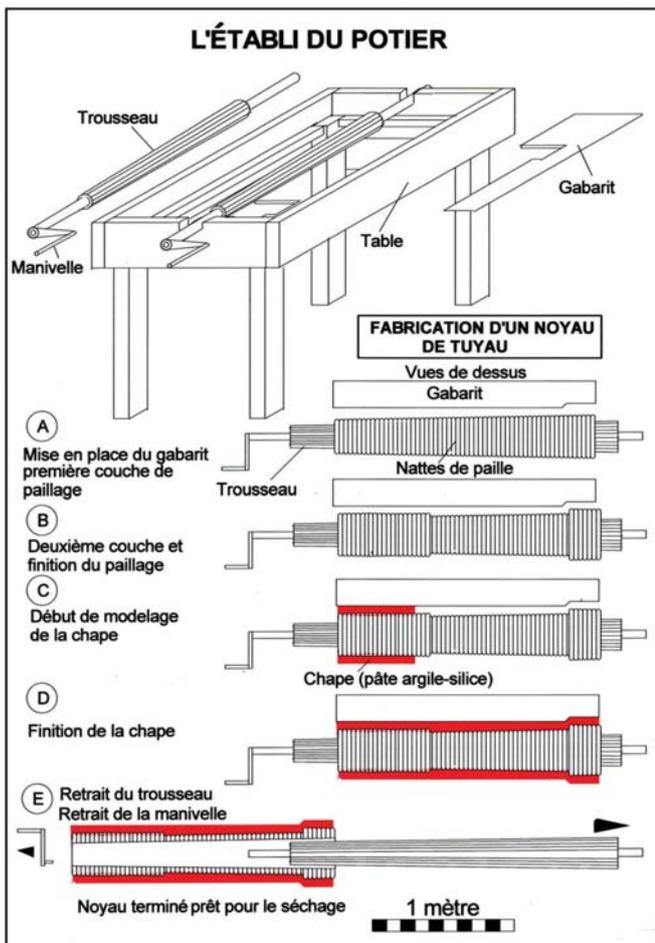


Fig. 103

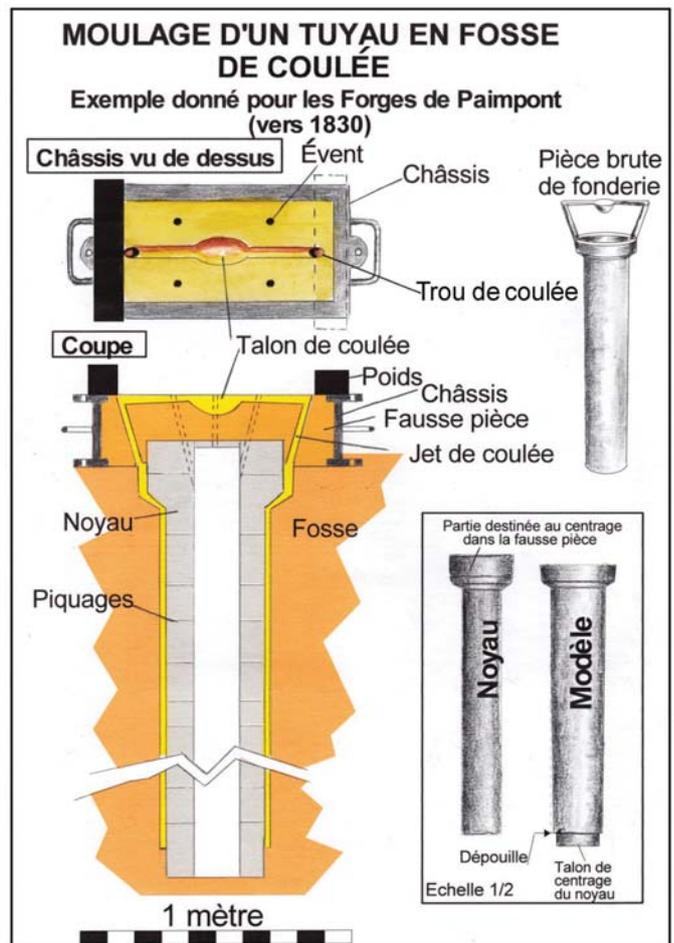


Fig. 104

En revanche la grue à chariotage telle qu'elle a du logiquement desservir la fonderie de Paimpont, balaye une aire qui permet aux fondeurs de réaliser les moulages au sol dans toutes les positions possibles situées dans cette aire, ce qui constitue un progrès très appréciable. (Fig. 105).

C'est dans cet atelier qu'ont été coulés certains éléments d'architecture du site, notamment les colonnes, chapiteaux de la fonderie ainsi que les dix arches du bâtiment des laminaires.

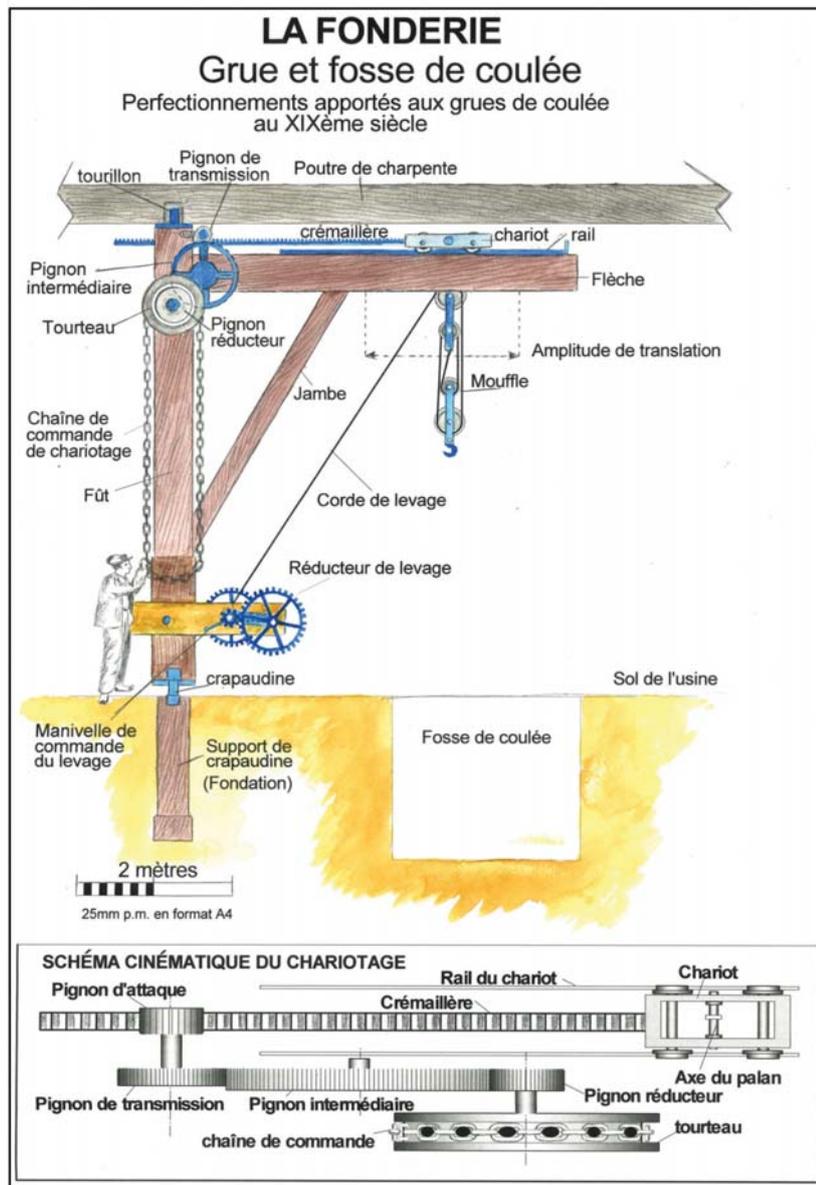


Fig. 105

## **LE FOUR À PUDDLER OUTIL CENTRAL DE LA PRODUCTION DU FER À L'ANGLAISE**

Comme il a déjà été dit, l'Angleterre souffre d'un déficit important en bois et utilise dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle le charbon de terre comme combustible, essentiellement la houille dont elle dispose de gisements importants.

Mais l'affinage à la houille par le procédé traditionnel souffre de graves défauts en raison des matières indésirables libérées par la combustion du charbon (soufre, goudrons, composés organiques volatils), ce qui n'était pas le cas avec l'utilisation du charbon de bois.

C'est ainsi que les Anglais Henri CORT et Peter ONION eurent l'idée d'utiliser le four à réverbère, destiné à l'origine à la seconde fusion de la fonte, pour fabriquer le fer. En effet, dans ce cas de figure, le métal n'est pas en contact avec le combustible ! Les inconvénients dus aux matières indésirables contenues dans la houille disparaissent. Seule demeure une chaleur supérieure à celle permise par les anciens feux d'affinerie, et le passage d'une flamme oxydante qui va pouvoir brûler une partie du carbone contenu dans la fonte qui est mise en fusion sur une sole et sans cesse remuée pour la mettre en contact avec le milieu oxydant. De là provient le nom du four, « to puddle » signifiant remuer, brasser en anglais. Et il faut en effet brasser constamment le métal pour le décarburer.

La sole du four est horizontale cette fois, pour permettre d'y travailler le métal, et refroidie par eau pour éviter notamment qu'elle se détériore trop rapidement et que le fer produit ne finisse par y adhérer. La comparaison de la structure des deux fours parle d'elle-même (Fig. 106). Le processus chimique n'est pas éloigné de celui déjà vu à propos des feux d'affinerie. Ici c'est l'oxygène de la flamme oxydante qui remplace le soufflage de la tuyère du feu d'affinerie. Mais l'activité du puddleur, pénible s'il en est, qui retourne sans cesse un métal devenant pâteux à mesure de l'avancement de l'opération, ne suffirait pas dans la plupart des cas. Rares sont les fontes (fontes blanches notamment) qui se laissent entièrement décarburer à la flamme.

Le véritable « secret » du puddleur est ailleurs : sur la sole ! Et effet, il ne s'agit pas d'une simple sole inerte sur laquelle on travaille la matière, mais d'un « lit chimique » que le puddleur va composer avec soin et l'intelligence qu'il possède de la réaction des matières. Il va commencer, avant de pousser le feu, à disposer sur la sole un lit de sornes et de battitures (quelquefois d'autres matières dont il garde jalousement le secret). Puis il monte le feu pour mettre cette « mixture en fusion », baisse ensuite le feu pour lui donner la consistance idéale, et charge enfin la fonte. Dès lors, la fusion des matières que le puddleur remue dans la flamme va bénéficier de la réaction chimique de l'oxygène contenu dans les sornes et les oxydes des battitures

qui vont brûler le carbone de la fonte. (Fig. 107 et 108). Et on obtient ainsi une loupe ou plusieurs loupes de fer d'une centaine de kilos ! Alors les productions journalières vont commencer à s'exprimer en tonnes de fer !

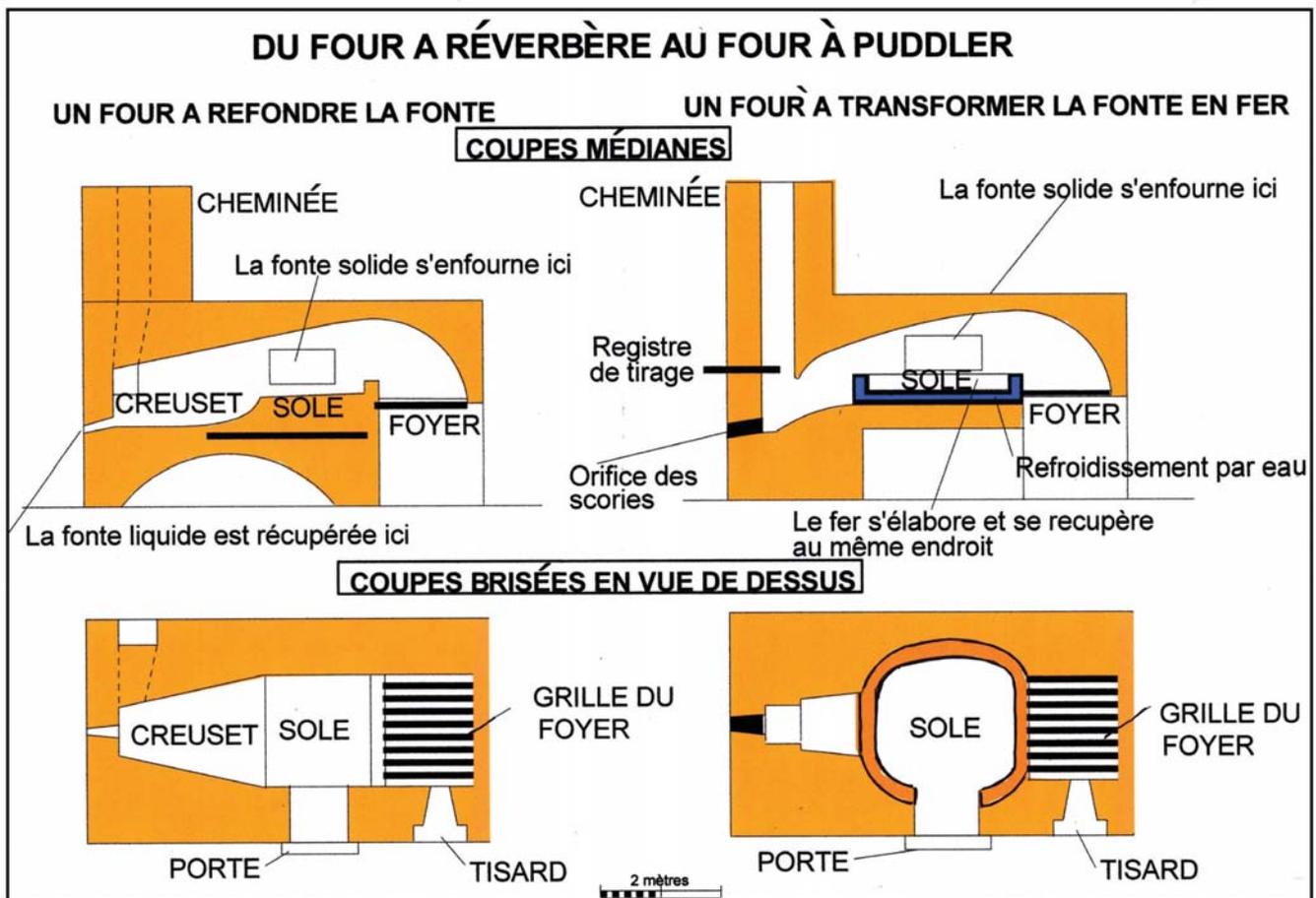


Fig. 106

C'est notamment avec ce procédé qui commence à s'imposer en France vers 1830 que seront élaborés les fers de la tour Eiffel aux hauts fourneaux de Pompey, près de Nancy.(Fig. 108 représentant l'un de ces fours). La chaleur est tellement intense devant le four, que le puddleur ne pourrait pas travailler porte ouverte. C'est par une ouverture pratiquée dans la partie inférieure de la porte qu'il passe son ringard, obligé de travailler courbé la plupart du temps pour surveiller l'avancement de l'opération. Mais il lui faudra tout de même ouvrir la porte périodiquement pour affiner le travail.

De tous les métiers qu'a connu l'histoire de la sidérurgie, c'est sans doute celui de puddleur qui fut le plus pénible. Cette situation difficile va se dégrader notablement et durablement, le temps de construire sur leur sueur et leur misère la cathédrale colossale du progrès qui va entraîner l'Europe entière dans la frénésie industrielle et le capitalisme triomphant.

Heureusement, un autre progrès venu une nouvelle fois d'Angleterre mettra fin à ce véritable supplice avec le procédé mis au point par Henri Bessemer en 1855 et adapté aux minerais phosphoreux par Sydney Thomas et Percy Gilchrist, couramment appelé « procédé Thomas » en Lorraine.

Le brevet déposé en 1877 est acquis en exclusivité par la société des petits-fils de François de Wendel en 1881 pour leurs forges, « au nez et à la barbe » des Allemands qui souhaitent l'acquérir, car il va révolutionner les conditions de production de l'acier. Il faudra attendre encore 15 ans pour qu'il tombe dans le domaine public. Il s'impose alors très rapidement dans nos usines. Désormais, c'est le règne de l'acier qui met fin à celui du fer et au véritable travail de forçat des puddleurs.

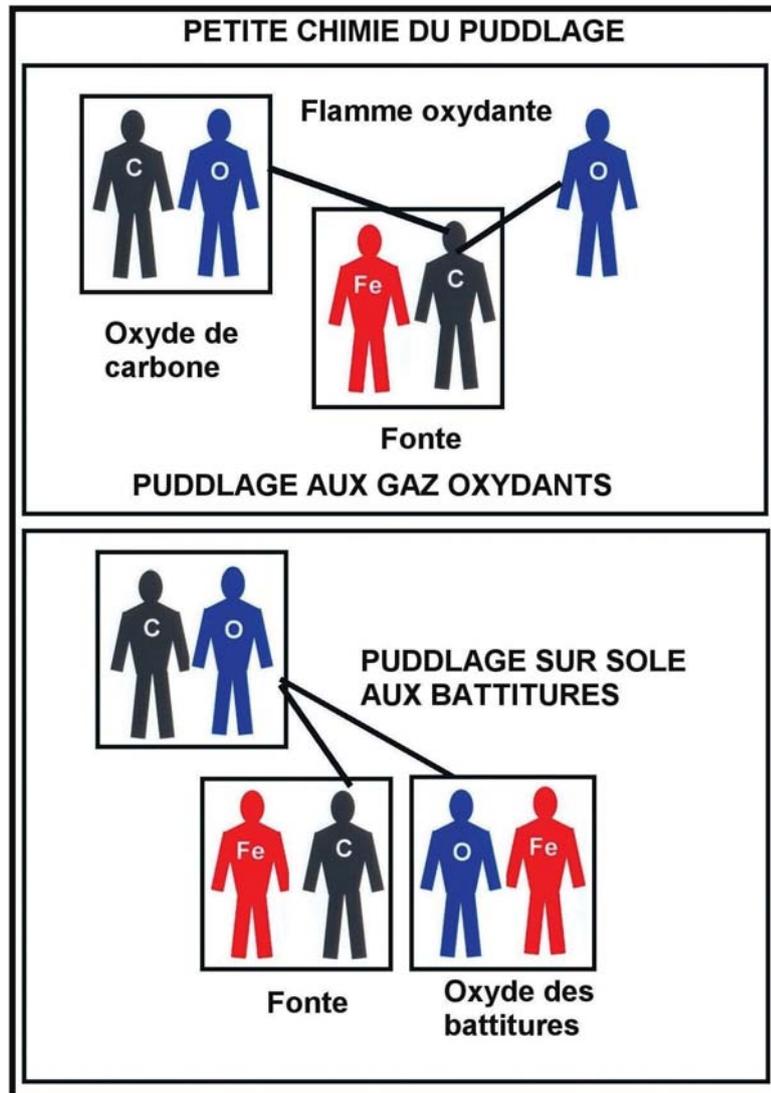
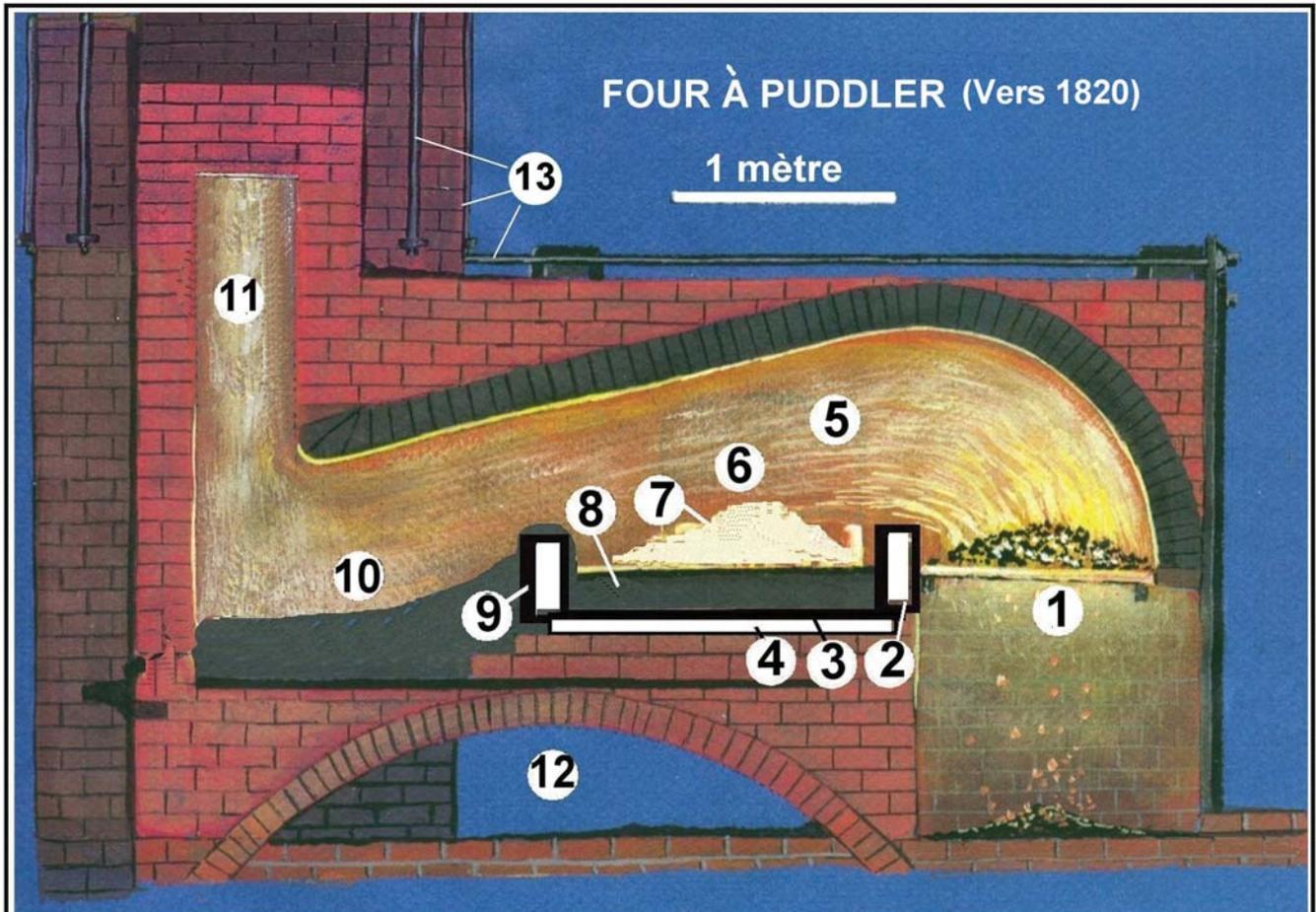


Fig. 107

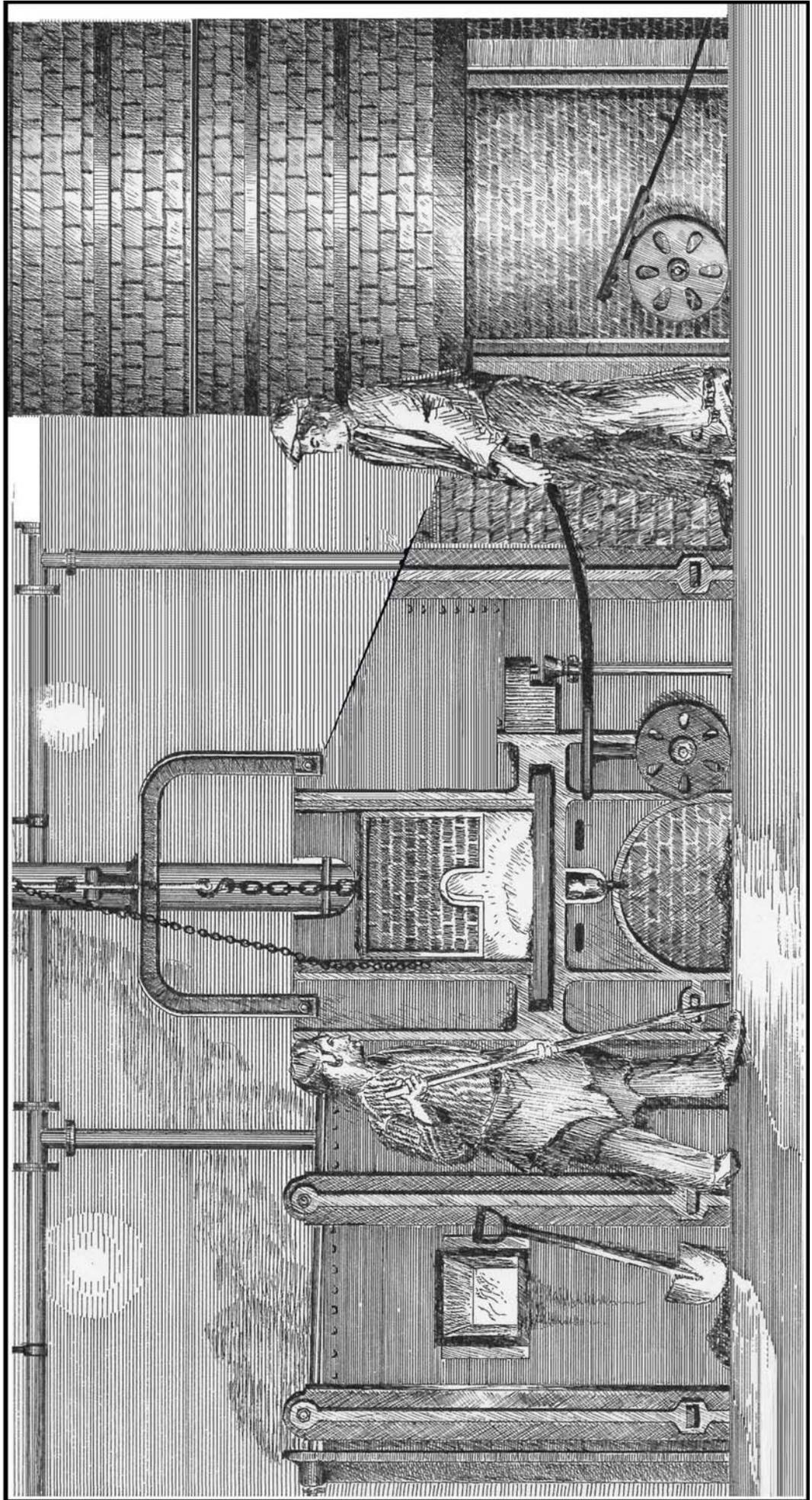


**LÉGENDE :**

- 1-Foyer. 2-Grand autel refroidi par eau. 3-Sole en fonte refroidie par eau.
- 4-Boîte à eau. 5-Flammes oxydantes. 6-Laboratoire. 7-Gueusets de fonte à puddler.
- 8-Sole chimique. 9-Autel refroidi par eau. 10-Rampant.
- 11-Cheminée. 12-Voûte de refroidissement de la maçonnerie. 13-Tirants

Fig. 108

**HAUTS FOURNEAUX ET FORGES DE POMPEY**  
**Four à puddler ayant servi à la fabrication des fers de la tour Eiffel**



## LES LAMINOIRS

Encore une invention anglaise ! Il faut dire que tout se tient logiquement dans cette seconde révolution industrielle. À partir du moment où les premières expérimentations de l'utilisation du charbon, puis de la force assez considérable de la vapeur ont eu lieu dans des usines anglaises, notamment à Dowlais pour ne citer que cet établissement, toute la logique de production n'a pu que suivre, que ce soit dans la théorie comme dans les moyens.

On pourrait considérer que la France était en retard. En fait, c'était bien l'Angleterre qui était en avance par absolue nécessité. Nous possédions, comme l'Allemagne d'ailleurs, encore assez de ressources en bois pour continuer à fabriquer des produits de bonne qualité eu égard à la grande expérience que nous possédions en la matière alors que les premiers fers puddlés souffraient de quelques défauts.

Mais le bond en avant assez prodigieux initié par l'utilisation du charbon et de la vapeur ne pouvait que nous amener à adopter ces techniques industrielles qui vont changer la face du monde.

Et au regard de l'univers un peu titanesque des hauts fourneaux et des grands fours, le laminoir, mine de rien, (du moins dans ses débuts), constitue bien un outil central dans cette révolution.

Le concept n'est pas nouveau. Dès le XV<sup>ème</sup> siècle on sait laminer des métaux très malléables, métaux précieux comme l'or ou l'argent, métaux plus industriels comme le plomb, mais dans des quantités et avec une nécessité de puissance bien moindre, et même sans commune mesure avec ce que peut demander la métallurgie du fer. Le principe est simple : faire passer le métal entre deux rouleaux tournant en sens inverse, que l'on rapproche au fil des intentions de réduction de l'épaisseur du métal.

Mais le travail du fer, métal résistant à la compression, et surtout présenté dans des volumes encore jamais atteints qu'il faut travailler à une température proche de 1000° va demander une ingénierie en rapport.

Entre le XVI<sup>ème</sup> et le XIX<sup>ème</sup> siècle, l'industrie exploitait déjà, parallèlement aux gros marteaux chargés de forger des barres, des formes de laminoirs, appelés « espatards », munis de deux cylindres en fer tournant en sens inverse, maintenus dans une structure en bois, matériau dont la résistance est devenue complètement incompatible avec les puissances qui vont être mises en jeu pour laminer de poutrelles ou des rails ! Car c'est bien de cela qu'il s'agit. Non pas seulement palier le manque de bois par l'utilisation du charbon ! Non, bien plus que cela !

C'est un autre monde, un nouveau monde qui va naître entre les cylindres des laminoirs, et notamment celui du chemin de fer avec toutes les conséquences de ce moyen de transport sans précédent ! Quelle histoire ! Nouveau monde technique, mais aussi nouveau monde social, et les bouleversements ne seront pas moindres à ce niveau.

L'atelier de puddlage et laminage des Forges de Paimpont, l'un des premiers en France, est construit en pierres sous ardoises. En 2005, le bâtiment demeurait à l'état de ruines, et le propriétaire en a assuré la restauration sur 8 années avec le concours de l'État, du Conseil régional de Bretagne et du Conseil départemental d'Ille-et-Vilaine, et ce tel qu'il était présenté sur les plans de 1820 figurant aux Archives nationales. Cette halle de puddlage et de laminage (Fig. 109) comprend au départ cinq fours à puddler, un four à réchauffer, et deux trains de trois cages de laminoirs mus par une roue hydraulique dont la puissance peut être évaluée à 30cv. Le dispositif de transmission du mouvement est encore assuré, du moins sur le plan originel des Archives nationales, par engrenage à lanterne, système dont la résistance à l'effort est assez limitée. Il est calculé ici pour imprimer une certaine vitesse aux cylindres, condition nécessaire à un bon travail, et équilibré par deux grands volants d'inertie d'un diamètre approchant les 6m et pesant chacun plus d'une dizaine de tonnes.

En matière de « machine laminoir », nous nous trouvons en présence de contraintes énormes. Il faut disposer d'un assemblage complètement rigide qui ne laisse place à aucun jeu au niveau des cylindres tout en maintenant dans des conditions de température élevée des écartements stables entre les pièces qui doivent résister à de fortes sollicitations. Enfin, malgré ces contraintes de rigidité assurée par des bâtis moulés en fonte, il faut pouvoir effectuer les réglages permettant de modifier formes et épaisseurs. (Fig. 110).

Les cylindres, soit lisses pour le laminage des tôles, soit cannelés pour les profilés (à voir à la suite) sont également usinés en fonte. Toutefois chaque embout qui constitue le tourillon supporté par des empoisses jouant le rôle de paliers est usiné en fer aciéré (qui contient donc encore une petite quantité de carbone, car on ne parle pas couramment d'acier à l'époque).

Ces tourillons sont posés sur les empoisses (paliers figurés en bleu) dont l'écartement est réglé par des cales, le tout solidement mis sous pression grâce à une grosse vis centrale. Les empoisses et cales coulissent dans des rainures pratiquées dans les piliers qui encadrent les cylindres. L'ensemble constitue une cage. (Fig. 110). Pour les produits plats (tôles), il faut régler l'écartement entre les deux cylindres pour obtenir l'épaisseur de tôle recherchée. Pour les produits longs (profilés) dont il sera question par la suite, les deux cylindres sont jointifs. Enfin, dans certaines cages, il existe en plus du réglage de pression par vis centrale un réglage encore plus fin par coin latéral, comme cela était pratiqué dans les forges d'Abainville-sur-Meuse en 1837. Une curiosité toutefois : les empoisses qui supportent l'essentiel des contraintes (pression et rotation des tourillons) et sont constamment arrosées par une venue

d'eau ont d'abord été réalisées en bois ! Oui, en bois ! Mais dans un bois exotique très particulier appelé dans le milieu « bois de fer ». Ce matériau étonnant possède toutes les propriétés pour résister aux contraintes de pression et d'usure que seules des matières créées plus tard ont pu remplacer. J'ai personnellement essayé de scier un petit bloc de ce bois à la scie à métaux...mais j'ai dû abandonner par lassitude. L'outil n'était visiblement pas adapté !

Les cages reposent sur un bâti de fondation très massif laissant place à une cave dans laquelle on recueille précieusement les battitures qui se forment lors des laminages. En effet, elles seront utilisées par la suite dans les opérations de puddlage comme il en a été question dans le chapitre précédent.

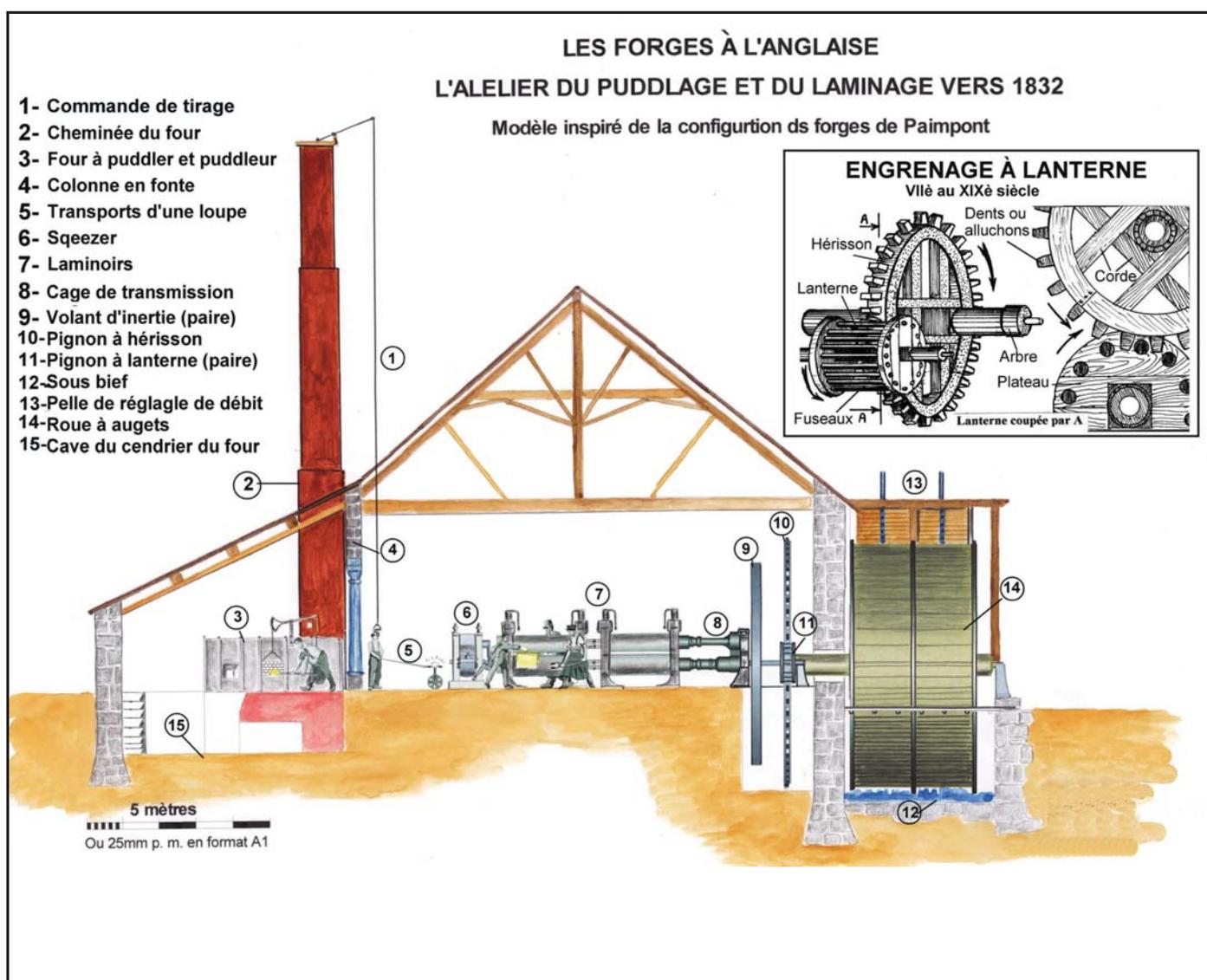
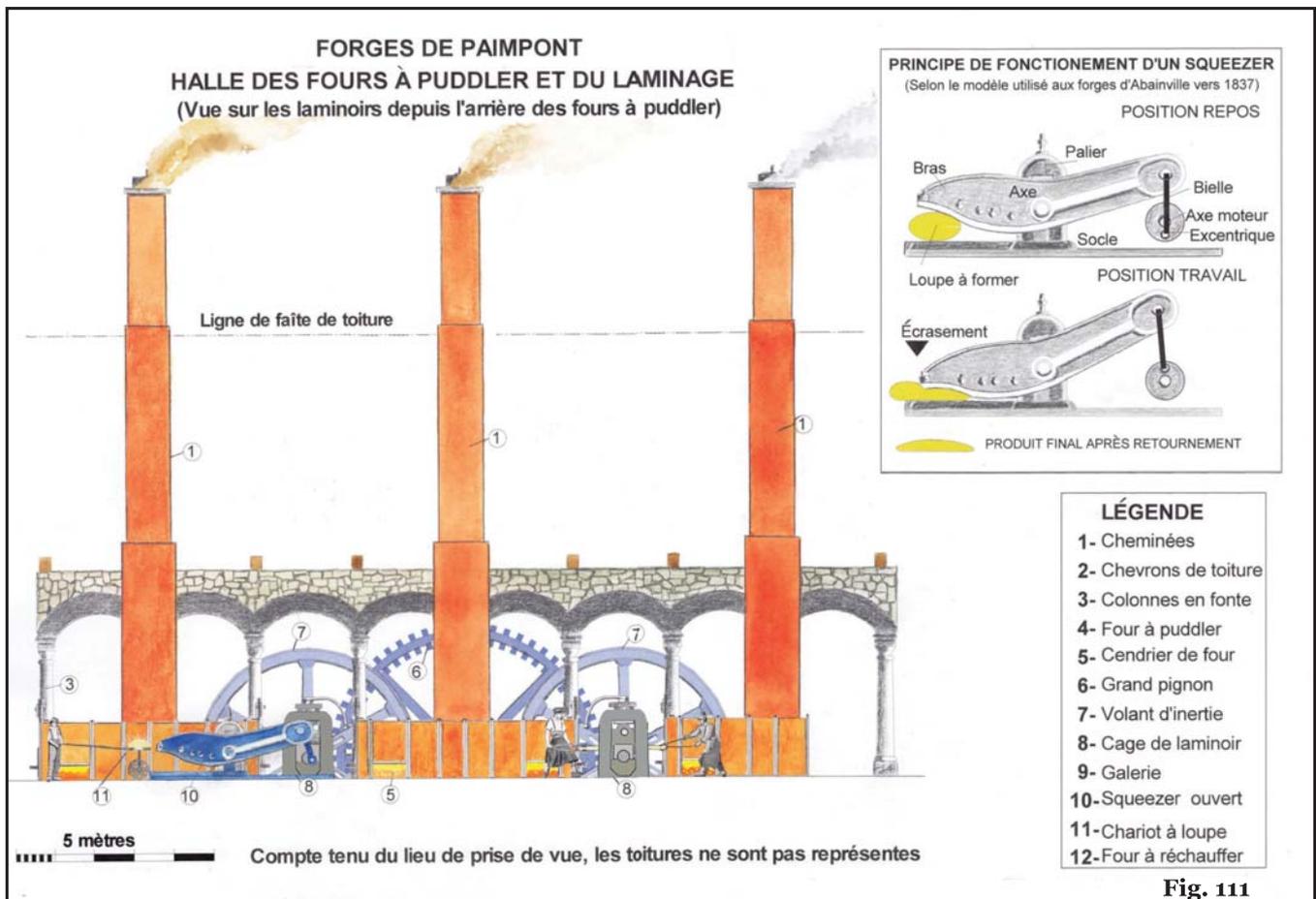


Fig. 109





Nous nous trouvons ici en présence de deux fours jumeaux à puddler sur la gauche, vus côté cendrier, alors qu'un goujat transporte une loupe destinée à être déposée entre les mâchoires du squeezer. Cet appareil est mû grâce à une prise de mouvement excentrée (excentrique dans le langage mécanique) fixé sur le tourillon inférieur de la cage du laminoir terminal du premier train.

À droite, devant le four à réchauffer, deux lamineurs sont occupés à laminier une barre qu'ils vont passer de part et d'autre de la cage dans différentes cannelures jusqu'à obtenir la forme désirée. Enfin en fond de tableau on peut apprécier l'impressionnante mécanique de transmission du mouvement avec son engrenage à lanternes et les deux volants d'inertie.

Le métier de lamineur demande une grande concentration et tout mauvais réflexe peut se solder par une suite dramatique. C'est souvent un goujat, ou jeune apprenti qui est chargé du rôle de rattrapeur, c'est-à-dire qu'il va « saisir au vol » à l'aide d'une longue pince la barre qui sort d'entre les cylindres à assez grande vitesse pour la reposer sur le cylindre supérieur dont

le mouvement inverse la ramène vers le lamineur qui l'engage alors dans une autre cannelure, et cela jusqu'à finition du travail. Et ainsi de suite, lingot après lingot, barre après barre se joue durant 8 heures dans une atmosphère surchauffée un incessant ballet de mouvements précis qui ne tolère pas l'erreur. Lamineur et rattrapeur se connaissent, font équipe, et on comprend que cela soit strictement nécessaire dans ces conditions de travail (Fig. 112). On distingue nettement le ruissellement d'eau qui refroidit les tourillons des cylindres depuis une boîte à eau fixée au sommet de la cage. Cette boîte à eau est alimentée en continu.

#### LAMINEUR ET RATTRAPEUR SUR UNE CAGE DES FORGES D'ABAINVILLE-SUR-MEUSE VERS 1837

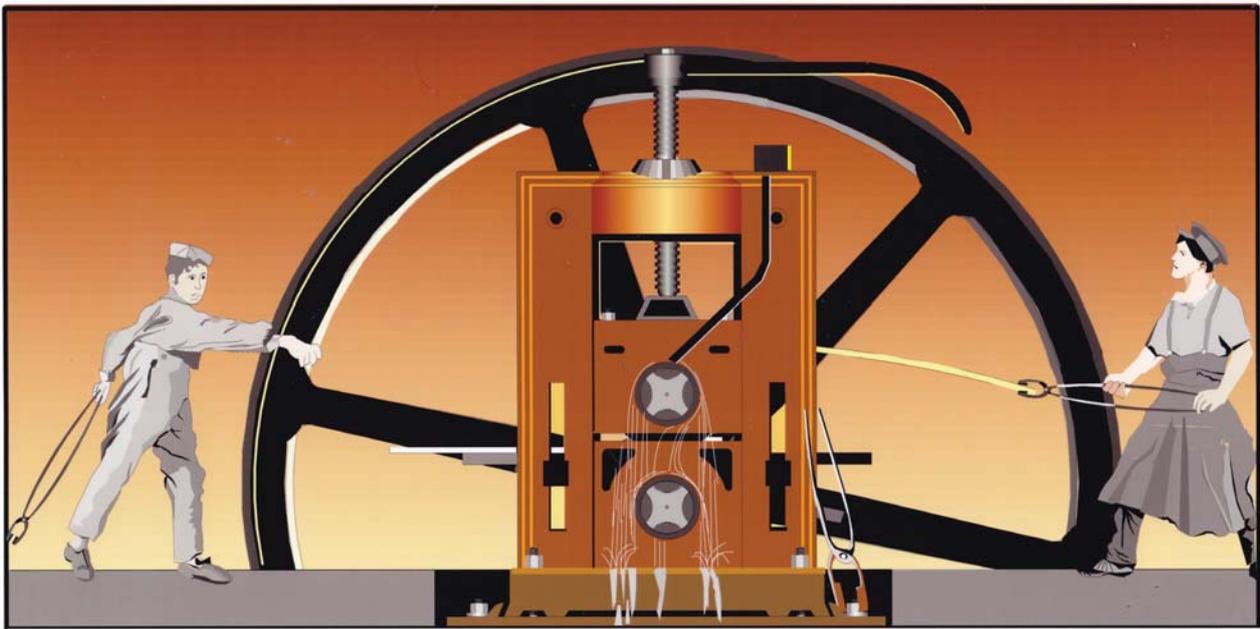


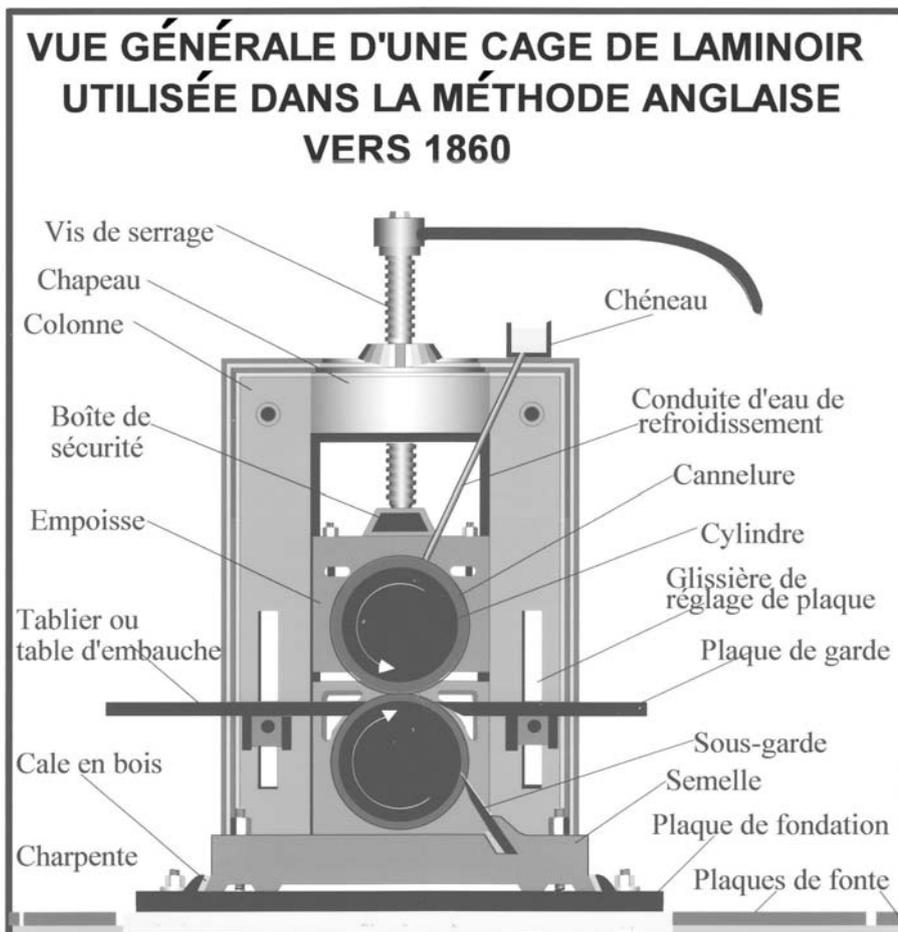
Fig. 112

Alors que dans le laminoir à tôles il existe entre les deux cylindres un espace réglé de façon à obtenir une épaisseur définie, en revanche, dans le laminoir à produits longs, comme les laminoirs à rails (Fig. 113), les cylindres sont jointifs et la forme usinée au tour dans leur diamètre définit la forme du fer que l'on veut obtenir.

L'exemple des cylindres dégrossisseurs destinés à la fabrication de rails est assez parlant. Mais il convient d'ajouter que si l'on suit les différentes cannelures on se rend compte que la forme s'éloigne parfois de celle recherchée (cas de la cannelure n° 4 où la forme de rail qui prend naissance dans la cannelure n°3 disparaît pour adopter une section plus grossière).

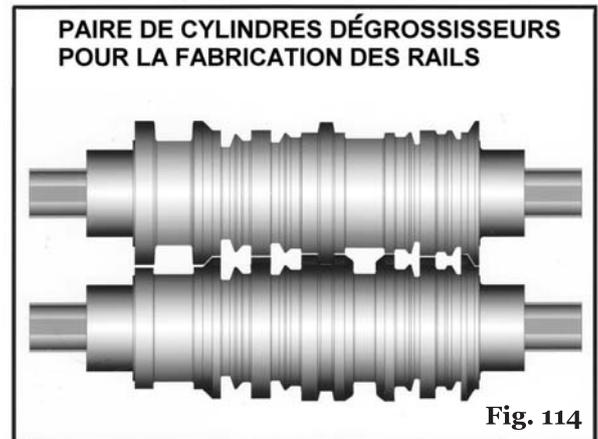
La structure du fer n'est pas homogène, mais formée d'un réseau cristallin sur lequel on peut agir en travaillant dans différentes directions, et cela pour obtenir au final des caractéristiques précises en termes de solidité, de résilience et de stabilité. Au sortir de la cannelure n°4, les

lamineurs vont faire effectuer à la barre une rotation de  $90^\circ$  vers la droite pour l'engager dans la cannelure n°5 où l'on retrouve une forme de rail. La matière va donc à nouveau être déformée avant d'être engagée dans la dernière cannelure qui comprime encore sa forme. Ensuite l'ébauche de rail ainsi obtenue passera dans un train finisseur qui lui donnera les dimensions très précises prévues par le cahier des charges de la compagnie de chemin de fer acheteuse. Mais il sera nécessaire de passer plusieurs fois les fers au four à réchauffer lorsque la durée des opérations se soldera par un refroidissement trop important pour entamer une nouvelle passe de laminage. Et lorsqu'on pense aux milliers de kilomètres de rails qui vont être posés durant une vingtaine d'années, des rails dont la longueur à l'époque oscille entre 4 et 7m pour les plus longs, on a peine à imaginer toute l'énergie dont ont du faire preuve les hommes postés derrière les cylindres des laminoirs ! Quant aux changements de cylindres pour adapter le train à une autre fabrication, et le poids que l'on imagine représenté par chacun d'eux, le tout avec des moyens de manutention assez rudimentaires, on a également du mal à imaginer toute l'énergie qu'il fallait sans cesse mettre en œuvre pour qu'avance ce à quoi croyaient beaucoup d'hommes : le progrès !

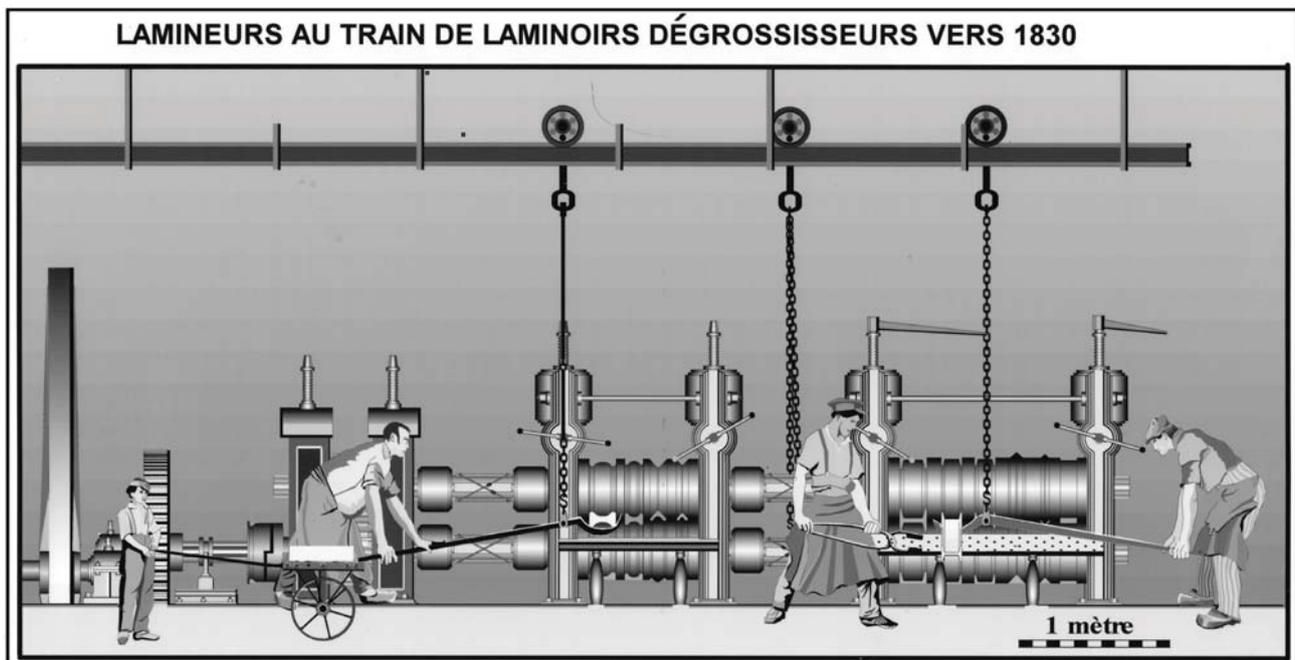


**Fig. 113**

La même logique s'applique à toute la gamme de fers marchands, poutrelles, cornières, palplanches qui vont permettre de construire les édifices de l'avenir, les grands ponts, les bâtiments industriels et autres hangars. La charpente métallique est née et perdurera. Ici les lamineurs bénéficient de l'aide de leviers appelés « aviots » suspendus à des rails de façon à pouvoir guider plus facilement des produits lourds ...et très chauds ! (Fig. 115)



C'est en 1865 qu'est ouvert le dernier tronçon de la ligne de chemin de fer Paris–Brest commencée en 1840 par celui de Paris Versailles. Elle se termine avec le tronçon Rennes–Brest et il est probable que des rails sortis des laminoirs de Paimpont jalonnent ce tronçon. Le train devient ainsi l'une des expressions les plus emblématiques de la fameuse révolution anglaise qui a animé les forges de Paimpont. (Fig. 117).



## PRINCIPALES ÉTAPES DE LA FABRICATION DU FER PAR LA MÉTHODE ANGLAISE

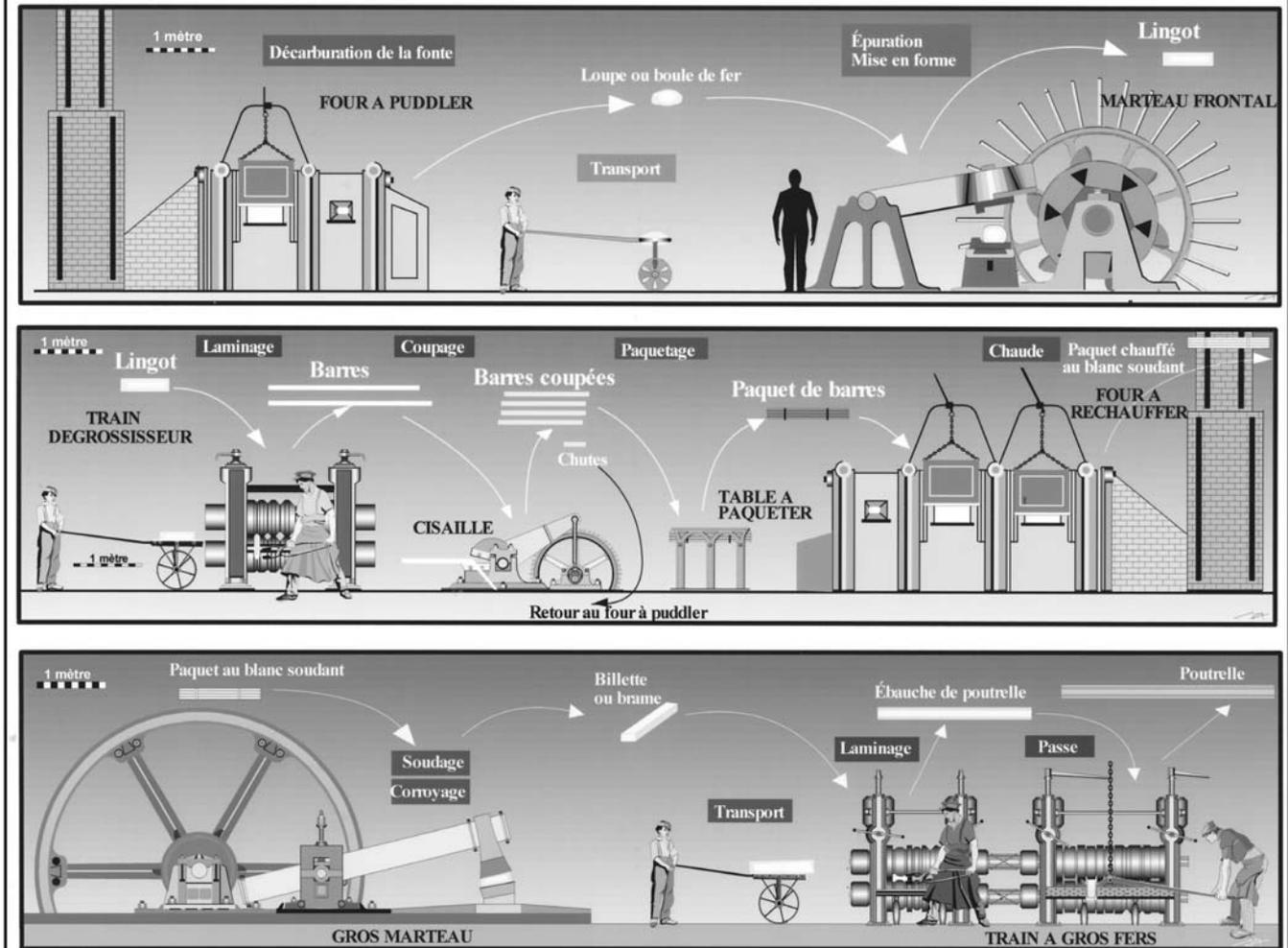
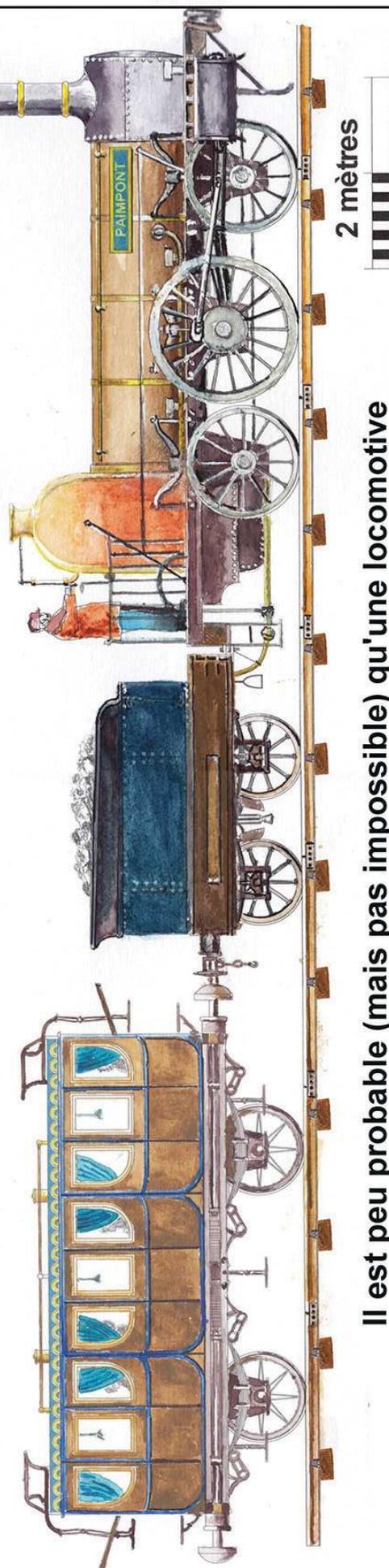


Fig. 116

## LIGNE PARIS-RENNES-BREST



Il est peu probable (mais pas impossible) qu'une locomotive ait porté le nom de PAIMPONT

**C'est ici un clin d'oeil aux lamineurs de Paimpont qui ont forgé une partie des rails du tronçon Rennes-Brest ouvert en 1865**

Matériel présenté:  
Locomotive type Stephenson long boiler  
Tender Modèle Sharp et Roberts  
Voiture de 1ère classe

## LIVRET DES FORGES DE PAIMPONT GLOSSAIRE DES TERMES ATTACHÉS AUX OUTILS ET MÉTIERS

Terme	Définition
À la Capucine	Se dit d'une roue hydraulique desservie par le dessus dans des augets.
À la Gentille	Se dit d'une roue hydraulique desservie par le dessous par pression de l'eau sur des pales.
Acier	Métal résilient obtenu par réduction du taux de carbone de la fonte entre 0,02 et 2%.
Affinerie	Atelier dans lequel on transforme la fonte en fer. Il comprend notamment des feux d'affinerie et des gros marteaux à cingler les loupes de fer.
Affineur ou maître affineur	Professionnel chargé de la conduite des fours d'affinerie.
Alliage	Combinaison de plusieurs métaux et certains autres corps. La fonte est un alliage de fer et de carbone.
Autel	Partie des fours à réverbère et à puddler qui limite la sole de travail et/ ou permet à la flamme du foyer de se diriger plus directement vers la voûte.
Aviot	Levier se déplaçant sur un rail en charpente permettant aux laminiers de soulever et de guider des produits longs sortant des laminiers.
Barre	Étape finale de forgeage de la loupe au gros marteau. La barre constitue un produit de base pour d'autres opérations réalisées en d'autres ateliers (platinerie, fenderie).
Bas foyer	Appareil utilisé par les anciens forgerons pour obtenir du fer par la méthode directe. Terme à préférer à « bas fourneau » qui fait penser à un haut fourneau peu élevé, ce qui n'est pas le cas.
Battitures	Oxydes riches en fer(70% de fer) qui se détachent des pièces de fer cinglées au gros marteau ou passées dans les cylindres de laminiers. Soigneusement récupérées, elles constituent un agent chimique décarburant très utile dans les opérations d'affinage et de puddlage.

Bief	Canal d'amenée d'eau sur une roue à la gentille.
Billette	Lingot au profil long destiné au laminage des produits longs tels que poutrelles, rails et autres profilés.
Bon coke (Le bon coke)	Se dit chez les utilisateurs de coke d'un produit dont les caractéristiques sont parfaitement adaptées à l'usage auquel on le destine (haut fourneau, usine à gaz, chaudières...).
Bouilleur (ou tube réchauffeur)	Dans les chaudières à vapeur, corps inférieur relié au corps de principal de chaudière par des tubes de large section nommés cuissards et à travers lesquels l'eau bouillante réchauffée et la vapeur montent dans le corps principal.
Brame	Forme de fer brut d'une certaine largeur destinée à la fabrication de produits plats au laminoir (Tôles).
Cage (de laminoir)	Ensemble des piliers et de l'assemblage des cylindres et empoisses qui constitue un appareil capable d'assurer une opération de laminage.
Cales (dans les laminoirs)	Pièces latérales dont les dimensions fixent l'écartement entre les cylindres dans les laminoirs à tôles.
Cave	Sous différentes machines et appareils, y compris les hauts fourneaux, espace souterrain où sont recueillies les matières indésirables parvenues par gravité, mais parfois précieuses comme les battitures. Le nettoyage des caves était généralement confié à des travailleurs sans qualification opérant dans des conditions particulièrement pénibles et dangereuses au niveau de la santé (gaz, graisses, panoplie de produits chimiques...).
Cémentation	Méthode permettant de donner au fer des propriétés de dureté et de résilience par chauffage à l'abri de l'air dans une poudre de carbone dont il va s'imprégner, du moins en surface.
Charbon de bois	Matière provenant de la torréfaction du bois pour lui enlever son humidité et des matières volatiles indésirables. Il possède deux avantages : sa légèreté et son pouvoir calorifique plus élevé que le bois de coupe.

Charbon de terre (plus généralement la houille)	Par distinction avec le charbon de bois issu de l'énergie renouvelable produite par le bois, le charbon de terre que l'Angleterre a commencé à exploiter rationnellement à la fin du XVIII <sup>ème</sup> siècle provient de gisements fossiles de l'ère carbonifère, donc épuisable. Il s'est formé il y a environ 360 millions d'années et cette formation s'est étendue sur une cinquantaine de millions d'années.
Charrue	Outil de forme semblable à une bêche dont se sert le fondeur pour tracer les rigoles dans le chantier de coulée. Allusion bien entendu à la charrue du paysan.
Châssis	Sorte de caisse initialement en bois, puis en fonte au XIX <sup>ème</sup> siècle dans laquelle le mouleur fabrique les différentes parties du moule dans le sable à couler à partir du modèle. Les châssis sont superposés et bloqués par goupilles en fonction de la structure du modèle. Ils sont toujours utilisés de nos jours.
Chaude	Donner une chaude. Réchauffer dans un four spécifique ou un feu d'affinerie une forme de métal (barre) au blanc pour la rendre à nouveau apte à être cinglée ou laminée.
Chaudière	Appareil produisant de la vapeur à partir d'un foyer alimenté par un combustible, généralement de la houille ou plus tard du gaz de haut fourneau dans les usines sidérurgiques.
Chaudière (à fonte)	Récipient ressemblant à l'origine à une grosse louche garnie intérieurement d'une couche d'argile, avec laquelle les fondeurs allaient puiser la fonte dans l'avant-creuset du haut fourneau. Dans les fonderies de seconde fusion elle était employée plus communément pour tout transport de fonte en fusion depuis le four vers les moules. Leur poids pouvait atteindre 100 kg chargées.
Chaussée	Chemin généralement ménagé sur une digue pour conduire le charroi vers les halles et parcs à matières des hauts fourneaux.
Chemin de fer	Un nouveau chemin qui va tout changer à partir des rails laminés et du guidage précis qu'ils permettent aux locomotives et matériels tractés.
Cheminée (à l'Allemande)	Cheminée surmontant le gueulard pour protéger les chargeurs de la flamme. Elle est munie de portes pour effectuer le chargement. L'appellation provient de leur utilisation très répandue Outre-Rhin.
Chio	Orifice par lequel les fondeurs évacuent les laitiers du haut fourneau ou les scories d'un four.

Cinglage	Opération ayant pour but de débarrasser les loupes de fer des impuretés qu'elles contiennent après affinage sous les coups de gros marteaux.
Coke	Combustible léger, résistant et très calorique obtenu par distillation de la houille ou autres formes de charbons fossiles.
Comptoise (à la comptoise)	Méthode d'affinerie traditionnelle utilisée dans différentes régions et dont les variantes sous d'autres termes n'affectent ni le principe ni l'ordonnancement général. Seule la méthode galloise s'en écarte un peu en raison de la nature de certains minerais employés Outre-Manche.
Contrevent	Désigne la plaque du foyer d'un four ou la paroi réfractaire du creuset d'un haut fourneau opposée à la tuyère.
Coursier	Canal en bois ou tuyau en fonte permettant d'amener l'eau sur une roue à la capucine.
Creuset	Partie du haut fourneau ou autre four où l'on recueille le métal en fusion.
Cuissard	Dans les chaudières à vapeur à bouilleurs, tubes de forte section qui relie le corps de réchauffage ou les bouilleurs au corps principal de chaudière placé au-dessus.
Cuve	Partie haute du haut fourneau comprise entre le gueulard et le début des étales ou ventre.
Cylindre (de laminoir)	Lisse pour la confection de tôles ou cannelé pour la fabrication de fers marchands, c'est la partie mobile du laminoir qui détermine la forme finale du produit.
Dame	Pierre à taille inclinée qui ferme l'avant creuset d'un haut fourneau et au-dessus de laquelle les fondeurs évacuent le laitier.
Dépouille	Angle appliqué dans les modèles de façon à pouvoir les démouler sans endommager l'empreinte de moulage.
Écrénée	Phase médiane des opérations de forgeage d'une barre au gros marteau.
Embrasure de coulée	Partie du haut fourneau à avant creuset ouvert au travail des fondeurs.
Empoisses	Paliers ou demi-paliers qui enserrant et bloquent les tourillons des laminoirs tout en leur permettant une rotation précise sans freinage excessif.

Espatard	Machine à structure en bois et à cylindres employée au XVIII <sup>ème</sup> siècle et pouvant être considérée comme un ancêtre du laminoir.
Étalages	Rétrécissement du volume intérieur du haut fourneau en forme de cône renversé situé entre le ventre et le creuset.
Étiage	Période des-basses eaux d'un cours d'eau entraînant le chômage des forges à eau durant cette période.
Évent	Canal pratiqué dans la maçonnerie du haut fourneau pour évacuer les vapeurs dues à la rencontre de la chaleur et de l'humidité ambiante qui imprègne la maçonnerie.
Évent	Cheminée pratiquée dans un moule pour mettre son volume intérieur en relation avec l'extérieur de façon à évacuer les gaz provoqués par l'introduction de la fonte liquide dans le moule.
Excentrique	Tête de bielle dont l'axe est excentré par rapport à l'axe moteur pour lui imprimer un mouvement de translation de course égale au double de la distance entre les deux axes.
Fenderie	Atelier où l'on découpe des plaques de fer à l'aide de disques fendoirs ou découpoirs pour obtenir de petites barres ou « vergettes ».
Fer	Métal peu résilient mais auto soudant demandant des opérations de forgeage pour acquérir des qualités nécessaires à un usage industriel.
Fer cru	Synonyme de fonte au XIX <sup>ème</sup> siècle.
Ferron	Terme utilisé jusqu'au début du XIX <sup>ème</sup> siècle pour désigner les forgerons.
Feu d'affinerie	Four particulier ayant donné naissance à la technologie de la méthode indirecte, permettant de transformer la fonte en fer.
Fondée	Désigne généralement le temps écoulé entre deux coulées à creuset plein.
Fondeur	Homme qui prépare la fabrication de la fonte, et la travaille en fusion, que ce soit au haut fourneau ou dans les ateliers de fonderie.
Fonte	Alliage de fer et de carbone (2,1 à 6,6 % de carbone) produit par les hauts fourneaux.
Fosse de coulée	Dans une fonderie, fosse maçonnée pratiquée dans le sol de l'usine pour permettre de couler verticalement des pièces de grandes dimensions (tuyaux, colonnes).
Four à puddler	Four dérivé du four à réverbère conçu par Henri Cort et pour transformer la fonte en fer.

Four à puddler	Forme de four à réverbère, appareil dont il est issu, qui permet de transformer la fonte en fer. Il succède dans cette fonction au feu d'affinage, mais avec des productions bien supérieures et plus stables. C'est l'un des appareils centraux de la révolution à l'anglaise.
Four à réverbère	Four dont la structure comporte une voûte contigüe au foyer qui va permettre de réverbérer la chaleur produite par la flamme sur la sole pour y refondre le métal qui s'écoulera ensuite dans un réservoir d'où il pourra être tiré.
Four Appolt	Du nom de son inventeur. L'un des premiers fours à utiliser des chambres verticales chauffées à l'abri de toute flamme par des piédroits (voir ce mot).
Four de boulanger	Four à fabriquer le coke dont la structure rappelle celle des fours de boulanger.
Gangue	Partie pierreuse du minerai qui ne contient pas de fer (généralement calcaire ou silice).
Gaz	L'ami de la réaction chimique qui se produit dans le haut fourneau et l'ennemi du haut fournaiste. Formé en majorité d'oxyde de carbone, inodore, incolore et mortel à petites doses d'inhalation, il est surtout craint dans les hauts fourneaux à gueulard fermé avec récupération des gaz. À Paimpont, il brûle dans la cheminée. Rien à craindre, sinon la flamme .
Goujat	Ce terme qui a pris aujourd'hui une connotation péjorative désignait en fait un simple apprenti dont l'ascension sociale dans le métier était garantie par sa capacité à acquérir un savoir faire auprès de ses maîtres affineur et marteleur.
Gros marteau (ou Maka)	Machine à forte charpente dans laquelle se meut un manche muni d'une tête de lourd marteau (environ 200kg) qui s'abat régulièrement sur une enclume par le moyen d'une came liée à une roue hydraulique. Cette machine très massive fait trembler le sol de l'usine. Il est principalement destiné au forgeage des lingots.
Grue de coulée	Appareil de levage et de manutention qui permet dans une fonderie d'amener la chaudière ou poche de façon à jeter la fonte dans le ou les talons de coulée. À partir du milieu du XIX <sup>ème</sup> siècle ces grues disposeront d'un dispositif de translation du chariot de levage.

Gueulard	Ouverture de la partie supérieure du haut fourneau par laquelle on enfourne les matières et par où s'échappent les gaz enflammés (flamme du gueulard) dans les appareils à gueulard ouvert, cas de Paimpont.
Gueuse	Lingot unique de grande longueur, coulé au pied du haut fourneau, constituant la production d'une fondée, son poids varie généralement entre 400 et 700kg.
Gueuset	Petites gueuses coulées dans un ensemble de moules façonnés dans le sable de coulée au pied du haut fourneau. Elles présentent l'avantage d'une facilité de manipulation pour être traitées en seconde fusion.
Haire	Synonyme de rustine dans les feux d'affinerie.
Haut fourneau	Appareil destiné à produire de la fonte.
Industrie	Activité permettant de fabriquer des objets avec le secours de la force de machines utilisant des énergies autres qu'animales (énergie hydraulique, vapeur...).
Jeter en moule	Expression qui définit au XIX <sup>ème</sup> siècle l'art de mouler les pièces en fonte.
Laiterol	Synonyme de chio principalement utilisé pour les feux d'affinerie et les fours à puddler.
Laitier	Matière issue de la fusion de la gangue du minerai de fer. Plus légère que la fonte (densité 2,5 contre 7) , elle surnage sur la bain de métal, ce qui permet de l'évacuer par gravité.
Lamineur	Professionnel chargé d'obtenir à l'aide des possibilités techniques du laminoir tous produits prévus par ces possibilités.
Laminoir	Machine permettant de modifier le profil des métaux, plus généralement à chaud.
Lingot	Forme de fer brut généralement parallélépipédique destiné au forgeage et au laminage.
Lit de fusion	Se dit de la composition du mélange de matières qui va permettre le fonctionnement du haut fourneau.
Lopin	Partie de loupe de fer destinée à être travaillée au marteau ou au laminoir.
Loupe (de fer)	Nom ordinairement donné aux boules de fer que l'on sort des fours, que ce soit par méthode directe ou indirecte.

Mâchefer	Résidu solide obtenu après combustion des charbons ou autres matières.
Marâtre	Forte poutre en fonte supportant des parties de maçonnerie de la poitrine du haut fourneau à muraillement, puis la cuve des hauts fourneaux à cuve dégagée.
Marche (du haut fourneau)	Ensemble des appréciations des fondeurs qui qualifient le fonctionnement de l'appareil, et ses éventuels dysfonctionnements.
Marteau frontal	Gros marteau à bascule soulevé par la queue ou le manche, destiné à mettre en forme de lingots les loupes produites dans les fours à puddler.
Marteleur	Professionnel chargé des forgeages au gros marteau des loupes issues des feux d'affinerie. Il assure une certaine polyvalence avec le maître affineur avec lequel il forme équipe à l'affinerie.
Martinet	Marteau de plus petite taille soulevé régulièrement par une came à son extrémité postérieure et s'abattant sur une enclume à un rythme plus soutenu que le gros marteau. Il est principalement destiné à la platinerie et au forgeage de petites pièces de serrurerie.
Méthode anglaise	Se dit la méthode qui a amené l'Angleterre à produire la fonte puis le fer, puis l'acier à partir de procédés totalement nouveaux utilisant entre autres le charbon comme combustible et la vapeur comme source d'énergie.
Méthode directe	Expression employée pour décrire le procédé de fabrication du fer à partir du minerai et du charbon de bois dans les bas foyers des anciens forgerons, avant l'apparition du haut fourneau.
Méthode indirecte	Expression employée pour décrire la fabrication du fer par transformation de la fonte produite dans les hauts fourneaux.
Meule	Forme donnée dans les premières fabrications de coke, et par analogie à la fabrication du charbon de bois, au tas de houille destiné à être transformé en coke.
Modèle	Pièce originale ou reproduction en bois ou plâtre(ou cire...) d'un objet que l'on souhaite reproduire en fonte.
Modeleur	Professionnel chargé de réaliser des modèles de pièces destinées à être coulées en fonte. Véritable sculpteur sur bois, ses modèles souvent complexes n'ont rien à envier à ceux que réalisaient des hommes au statut d'artiste !

Moufle	Dispositif à poulies permettant de démultiplier la force de levage d'une charge.
Moulage	Prise d'empreinte du modèle dans le sable serré pour former en creux l'espace dans lequel sera coulée la fonte.
Moulerie (ou fonderie)	Atelier où l'on fabrique diverses pièces par moulage de la fonte dans les moules ou dans le sable à couler du sol de l'usine.
Mouton	Masse métallique pesante manœuvrée au bout d'une chaîne pour frapper sur les ringards à percer le trou de coulée.
Muraillement (double)	Le double muraillement caractérise la construction d'un haut fourneau sous la forme d'une tour massive édifiée en plusieurs couches concentriques. C'est le type d'appareil que l'on rencontre entre le XVII <sup>ème</sup> et le milieu du XIX <sup>ème</sup> siècle.
Noyau	Pièce tournée ou modelée en matière réfractaire pour occuper à l'intérieur de l'espace de moulage un volume qui devra demeurer vide à l'issue de la coulée.
Ouvrage	Partie la plus chaude ou la plus active du haut fourneau située entre la tuyère et le début des étalages.
Oxydation	Opération inverse de la réduction qui conduit à transformer le fer en oxyde de fer par absorption d'atomes d'oxygène (exemple la rouille). Ces oxydes sont utilisés dans les procédés d'affinage.
Oxyde de carbone	Gaz inodore et incolore, mortel à faibles doses, produit par la combustion du carbone, notamment dans le haut fourneau. Mais c'est l'agent chimique principal permettant la réduction de l'oxyde de fer du minerai en fer.
Pelle (de vanne)	Pièce de bois coulissante permettant de régler le débit d'eau sur une roue hydraulique, et donc sa puissance et sa vitesse.
Pelle à mouler	Comme son nom ne l'indique pas, il s'agit d'une forme plate en métal munie d'un manche et recouverte d'argile que le fondeur plante dans les rigoles ou l'en retire pour barrer ou ouvrir le chemin à la fonte en fusion.
Piédroit	Chambre de combustion en briques réfractaires interposée entre chaque chambre chargée de houille pour lui communiquer la chaleur nécessaire à la cokéfaction (800°).
Piquages	Petits canaux ménagés dans le moule à l'aide d'une fine aiguille en maints endroits autour du modèle et jusqu'au modèle pour augmenter la perméabilité de la matière moulante au gaz.

Pisé (de carbone)	Matière réfractaire moulable et damable issue d'un mélange de carbone, d'argile, de silice et autres matières adaptées aux résistances thermiques et chimiques. Elle sert notamment à la réalisation des creusets, soles et parties les plus chaudes des fours.
Plaque de fond	Plaque généralement en fonte refroidie ou non par air ou eau qui constitue la surface de travail des fours. Au haut fourneau elle est constituée par une pierre réfractaire épaisse ou un pisé .
Platinerie	Atelier où l'on fabrique des produits plats (tôles) en travaillant des loupes ou lopins de fer sous le gros marteau, puis sous des martinets. Cette activité disparaîtra presque totalement avec les laminoirs.
Poche (à fonte)	Il s'agit de l'évolution des anciennes chaudières vers des récipients plus volumineux garnis de briques réfractaires, transportés par chariots et manipulés par grue.
Poitrine	Partie de l'architecture du haut fourneau à avant creuset qui limite l'avant creuset dans l'embrasure de coulée.
Poitrine fermée	Se dit à la fin du XIX <sup>ème</sup> siècle des hauts fourneaux fonctionnant en vase clos en raison de la pression du vent par opposition à la poitrine ouverte qui permet d'accéder librement au creuset. L'expression disparaîtra avec la généralisation des poitrines fermées. Les hauts fourneaux de Paimpont sont à poitrine ouverte.
Produits longs	Au laminage, produits obtenus à partir de lingots à profil long (billettes) pour la fabrication de fers marchands, profilés et rails, notamment.
Produits plats	Au laminage, produits obtenus à partir de lingots à profils larges (appelés brames au XX <sup>ème</sup> siècle) pour la fabrication de tôles.
Rattrapeur	Jeune lamineur, souvent apprenti, chargé de rattraper les produits longs sortant du laminoir pour les repasser au lamineur qui les introduira dans une nouvelle cannelure.
Réduction	Opération chimique très utilisée en sidérurgie qui consiste à transformer les oxydes de fer en fer par transfert des atomes d'oxygène sur un corps qui en est avide (carbone par exemple).
Refroidissement (au laminoir)	Arrivée permanente d'eau amenée sur les tourillons des cylindres pour faciliter leur rotation et réduire leur usure.
Repos hebdomadaire	Il n'est rendu obligatoire qu'en 1906 après le choc de la catastrophe minière de Courrières qui a provoqué plus d'un millier de morts.

Résilience	Propriété d'un matériau à retrouver sa forme initiale après une contrainte lui ayant fait subir une déformation (exemple du ressort).
Révolution industrielle	Trop souvent attribuée à tort au XIX <sup>ème</sup> siècle, elle naît au XIV <sup>ème</sup> siècle avec l'utilisation de l'énergie hydraulique pour faire fonctionner des machines. On lui doit notamment l'apparition du haut fourneau.
Révolution industrielle anglaise	Développée en Angleterre à l'issue d'une pénurie de bois qui a amené ce pays à recourir à l'énergie du charbon, puis de la vapeur, elle a transformé en profondeur l'industrie du fer dans tous les pays voisins (et au-delà) à partir du milieu du XIX <sup>ème</sup> siècle. Le symbole français de ce bouleversement industriel se dresse toujours dans l'édifice de la Tour Eiffel.
Ringard	Terme qui désigne différentes barres de fer, de diamètres, de longueurs et d'embouts différents qui constituent les outils quasiment universels des fondeurs.
Roue hydraulique	Machine centrale de la révolution industrielle, la roue hydraulique mue par la force de l'eau (voir gentille et capucine) peut développer jusqu'à 50cv.
Rustine	Paroi d'un foyer d'affinerie par laquelle on introduit la gueuse à affiner ou paroi réfractaire du creuset du haut fourneau opposé à la face de travail
Sable de coulée ou sable vert	Matière utilisée en fonderie pour la confection des moules et constituée par un mélange savamment dosé de silice, d'argile et d'eau permettant d'en assurer la consistance. C'est la « pâte à modeler » du mouleur.
Scorie	Dans les anciennes forges, terme général désignant les impuretés que l'on sépare du métal. Aujourd'hui la scorie désigne plus spécifiquement le résidu provenant de la fabrication de l'acier, le laitier restant attaché au domaine du haut fourneau.
Seconde fusion	Action de refondre un métal dans des fours spécifiques qui n'en modifient pas les caractéristiques pour assurer des moulages.
Sole	Désigne la surface (souvent siliceuse) sur laquelle on recueille ou travaille le métal en fusion.
Sorne	Bain de scorie qui se forme avec la fusion de la fonte dans les fours à puddler et qui contient encore des oxydes utiles à la décarburation de la fonte.

Soufflante à caisses et pistons	Dans la première moitié du XIX <sup>ème</sup> siècle, machine à caisses et pistons en bois destinée à produire le vent des fourneaux et des fours avec la force hydraulique. Elle constitue le passage entre les anciens soufflets en bois et les souffleries à pistons en fonte.
Soufflerie hydraulique	Machine destinée à produire le vent nécessaire au fonctionnement du haut fourneau à partir d'un mécanisme mû par une roue hydraulique.
Soulèvement	Action pénible menée à diverses reprises par l'affineur et plus tard par le puddleur pour présenter les masses de fer en formation soit dans le vent de la tuyère, soit dans le courant de la flamme du four.
Sous bief	Canal aval d'une roue permettant l'évacuation de l'eau ayant fourni son travail.
Squeezer	Dispositif à bascule de mâchoire destiné à écraser les loupes de fer en vue de les former en lingots.
Stuckofen	Parfois considéré comme l'ancêtre du haut fourneau dont il diffère par la méthode de marche, c'est le premier appareil soufflé par la force hydraulique dont la taille approche celle des hauts fourneaux, mais qui produit en revanche une masse de fer pâteuse (Stuck en Allemand).
Talon de coulée	Petit réceptacle pratiqué dans la surface d'un moule en aval du canal de coulée pour amortir le choc de la chute de la fonte et sa conduite calme vers l'intérieur du moule.
Tampon (à boucher)	Ce terme qualifiera jusqu'au début du XX <sup>ème</sup> siècle la masse de matière argileuse que les fondeurs prépareront pour boucher le trou de coulée du haut fourneau à la fin de la coulée ou en cas de besoin spécifique, voire impérieux.
Tête d'eau	Aboutissement d'un coursier où l'eau se déverse sur une roue hydraulique.
Tirerie	Atelier où l'on produit divers modèles de fils de fer à l'aide de filières après réchauffage du métal livré en petites barres ou vergettes.
Tisard	Ouverture pratiquée sur le côté du four à réverbère ou à puddler au niveau du foyer pour permettre d'en nettoyer la grille.
Tourillon	Embout des cylindres de laminoirs qui tournent et reposent sur les paliers nommés « empoisses ».
Tourneur (de noyau)	Professionnel chargé de réaliser les noyaux des modèles de fonderie par tournage d'un noyau de tresses de paille recouverts d'argile.

Train (de laminage)	Ensemble des cages de laminoirs qui forment un processus de fabrication bien défini.
Trainasse	Conduit destiné à capter la fumée des fours pour la conduite vers une cheminée.
Travail (des enfants)	Il faudra attendre une loi de 1842 pour que l'âge minimum du travail des enfants soit fixé à 8 ans et sa durée quotidienne à 8 heures.
Trempe	Méthode ancienne et toujours utilisée permettant de donner au fer dureté et résilience par trempage dans un bain froid (eau ou huile généralement) après l'avoir porté à haute température (rouge cerise).
Trou de coulée	Percée réalisée par les fondeurs dans l'avant-creuset à l'aide d'un ringard pour permettre de couler la fonte accumulée dans le creuset.
Tuyère	Pièce de métal généralement conique (fer ou cuivre refroidi par eau dans le cas de vent chaud) destinée à insuffler le vent dans un haut fourneau ou un four soufflé.
Varme	Paroi du foyer d'un four d'affinerie situé du côté de la ou des tuyères.
Vent	Volume d'air insufflé dans le haut fourneau par une ou des tuyères pour assurer la combustion du charbon de bois, puis du coke au moment de la révolution anglaise.
Ventre (du haut fourneau)	Partie où le haut fourneau présente son plus grand diamètre intérieur (Ligne de séparation entre cuve et étalages).
Vis de serrage (dans les laminoirs)	Vis centrale de fort diamètre qui permet de maintenir solidement l'assemblage des empoisses et des cylindres.

## SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE

### SOMMAIRE LIÉES AUX SOURCES

Ouvrage ou document, éditeur, année d'édition	Auteur(s)	Dépositaire
François Bonhommé, peintre. Éditions Serpenoise.1996	Marie Laure GRIFFATON	G.Dalstein
Traité de la fabrication de la fonte et du fer.1842 .Librairie scientifique industrielle de L. Mathias. Paris	E.FLACHAT, A.BARRAUT et J. PETIET Ingénieurs	Musée du fer de Nancy-Jarville
Cours de métallurgie professé à l'École Centrale des Arts et Manufactures. Librairie polytechnique de J. Baudry, éditeur. Paris. 1874	S.JORDAN Ingénieur, Président de la société des ingénieurs civils	Musée du fer de Nancy-Jarville
Manuel de la métallurgie du fer. Tome 2. Metz 1824. Traduit de l'Allemand par F.J.CULMANN	J.B. KARSTEN, Conseiller supérieur des mines de Prusse, directeur des usines royales de Silésie.	G.Dalstein
Mémoire sur les perfectionnements et les modifications des procédés employés pour la fabrication du fer obtenu par l'affinage des fontes dans les foyers d'affinerie. Annales des mines. 3ème série. T XVIII. 1840	E .THIRRIA, ingénieur en chef des mines	Musée du fer de Nancy-Jarville
Traité complet de métallurgie. Tome 3 et son appendice. Librairie polytechnique de Noblet et Baudry. Paris et Liège. 1885	J.PERCY, professeur des mines du gouvernement à Londres traduit par E.PETITGRAND, A.RONNA, ingénieurs	Musée du fer de Nancy-Jarville

Le rail en France. Le Second Empire. Tome 1-1852-1857. F et M.PALAU, auteurs éditeurs. 1998	F. et M.PALAU	G.Dalstein
La Grande Forge. Editions d'Assailly	C.SUTTERLIN	G.Dalstein
Le Savoir...Fer. Glossaire du haut fourneau. Édition association « Le savoir...fer ». 5 <sup>ème</sup> édition. 2018	J.CORBION	G.Dalstein
Plans conservés aux Archives nationales. 1822		Site de Paimpont
Notes, relevés de terrain et photographies du site de Paimpont	P. de la PAUMÉLIÈRE Propriétaire du site des forges	Site de Paimpont
Les Chantiers du fer. Tome 3. L'épopée des forges. Editions Serpenoise.2002	G.DALSTEIN	G.Dalstein
Les moteurs hydrauliques 24150 Bayzac	René Champly Éditions du Roc de Bourzac	G.Dalstein
La sidérurgie en France et à l'Étranger. E.BERNARD et Cie, imprimeurs éditeurs. Paris 1894	C.HELSON Ingénieur des Arts et Manufactures. Constructeur et directeur d'usines en France et à l'étranger	Musée du fer de Nancy-Jarville
Construction de machines.1 <sup>ère</sup> division. 1883-1884 Ecole centrale des Arts et Manufactures. Cours de M.VIGREUX	M.VIGREUX Ingénieur	Musée du fer de Nancy-Jarville
La fonderie telle qu'elle existe aujourd'hui en France et ses nombreuses applications à l'industrie. Paris 1847-Librairie scientifique industrielle chez L.Mathias	A.GUETTIER	Association pour la sauvegarde et la promotion du patrimoine industriel haut-marnais (ASPM)

Nouveaux procédés pour fabriquer la fonte et le fer en barres. Bachelier, imprimeur-libraire. Paris 1835	A.GUENYVEAU, Ingénieur en chef, professeur à l'école royale des mines de France	Musée du fer de Nancy-Jarville
Le fer contre la forêt. Ouest France Université. 1984	F.DORNIC	G.Dalstein
Les Chantiers du fer. Tome2. L'aube des hauts fourneaux	G.DALSTEIN	G.Dalstein
Encyclopédie de Diderot et d'Alembert		Document public
Revue CILAC n° 70. La réalité augmentée		Site de Paimpont
Revue Fontes n° 93, p 24. Le système local	ASPM	Site de Paimpont
Revue VMF n° 275. Grand prix 2017		Site de Paimpont
La Métallurgie en Haute Marne, Cahier du Patrimoine Inventaire général des richesses artistiques. Edité par l'association pour la valorisation des atouts culturels de Champagne-Ardenne	13 auteurs	G.Dalstein
« Des Bois, du fer, de l'eau, des hommes, les grandes forges au bois du pays de Châteaubriant du XVI <sup>ème</sup> au XIX <sup>ème</sup> siècle	Jean Franco	Site de Paimpont
Métalbreizh : La métallurgie Bretonne insoupçonnée	Yves Laurence	Site de Paimpont
Archives nationales (Fonds sur la modernisation des Forges de Paimpont en 1820)		
Archives Départementales d'Ille-et-Vilaine		

Archives familiales : Levesque		Site de Paimpont
Archives de l'association des amis de l'œuvre de l'Abbé Fouré		Association
Les Forges de Paimpont, une activité industrielle du XVII <sup>ème</sup> au XIX <sup>ème</sup> siècle	Fédération Carrefour de trécélien	Site de Paimpont
Sites internet : Fontes d'art : <a href="https://fontesdart.org/dommartin-le-franc-le-haut-fourneau-visite">https://fontesdart.org/dommartin-le-franc-le-haut-fourneau-visite</a> Ecomusée de Rennes : <a href="http://www.ecomusee-rennes-metropole.fr/">http://www.ecomusee-rennes-metropole.fr/</a> Source : <a href="https://gw.geneanet.org/duval1?f=charbonniers&amp;lang=fr&amp;m=NOTES">https://gw.geneanet.org/duval1?f=charbonniers&amp;lang=fr&amp;m=NOTES</a> Source : <a href="https://remonterletemps.ign.fr">https://remonterletemps.ign.fr</a>		

NB : La mention auteur dans la colonne « dépositaire » signifie que le document ou l'ouvrage est en possession de l'auteur de l'article des textes et illustrations concernées.





