« Procédé direct/procédé indirect » en métallurgie du fer : archéologie d'une notion, histoire de son évolution

"Direct Process / Indirect Process" in Iron Metallurgy: Archaeology of a Notion, History of its Evolution

Anne-Françoise GARÇON

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/ephaistos/4335>

DOI : 10.4000/ephaistos.4335

ISSN : 2552-0741

Éditeur

IHMC - Institut d'histoire moderne et contemporaine (UMR 8066)

Référence électronique

Anne-Françoise GARÇON, « « Procédé direct/procédé indirect » en métallurgie du fer : archéologie d'une notion, histoire de son évolution », *e-Phaïstos* [En ligne], VII-1 | 2019, mis en ligne le 06 avril 2019, consulté le 20 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/ephaistos/4335> ; DOI : 10.4000/ephaistos.4335

Ce document a été généré automatiquement le 20 avril 2019.

Tous droits réservés

« Procédé direct/procédé indirect » en métallurgie du fer : archéologie d'une notion, histoire de son évolution

"Direct Process / Indirect Process" in Iron Metallurgy: Archaeology of a Notion, History of its Evolution

Anne-Françoise GARÇON

« Sidérurgie » : une invention des Lumières

- 1 Il est habituel dans la culture technique contemporaine de distinguer entre les deux métallurgies, celle des ferreux et celle des non-ferreux. Or cette distinction n'a pas toujours été. Ainsi dans la métallurgie de l'arc alpin entre XIII^e et XVI^e siècle, un même vocabulaire valait pour l'ensemble de la métallurgie. Les fourneaux étaient tous appelés « *furni* » dans les divers énoncés juridiques et techniques, qu'ils soient à plomb ou à fer. Et le même mot « *fusina* » servait à désigner l'atelier de coupellation du plomb d'œuvre¹ et l'atelier d'affinage du fer, un « transfert de vocabulaire » correspondant à un transfert d'équipement et de savoir-faire », analyse Jean-François Belhoste².
- 2 Le XVIII^e siècle est le temps du changement. Attesté depuis 1611, le mot « métallurgie » s'impose peu à peu en même temps que la différence se fait entre minerai et métal. En 1752, le terme entre dans le *Dictionnaire de Trévoux* pour désigner la « Science ou l'art de fondre les métaux, de les préparer, ouvrer et dépurier pour l'usage de la médecine ». Dans l'*Encyclopédie*, d'Holbach définit métallurgie, « la partie de la Chimie qui s'occupe du traitement des métaux »³. Pendant ce temps, Gabriel Jars, l'un des métallurgistes les plus en vue de son époque⁴, organise ses *Voyages métallurgiques*, autour des métaux ferreux, comme en témoigne le sous-titre de son premier volume : *Recherches et Observations sur les mines & forges de fer, la fabrication de l'acier, celle du fer-blanc, & plusieurs mines de charbon de*

terre, faites depuis l'année 1757 jusques & compris 1769, en Allemagne, Suède, Norvège, Angleterre & Écosse⁵. Encore faut-il trouver un terme pour désigner cette part de la métallurgie en plein renouvellement avec l'invention de la fonte au coke. Grignon, maître de forges et savant s'en charge en inventant deux termes : « sidérotechnie » et « sidérurgie » dans trois *Mémoires* qu'il adresse à l'Académie en 1761, en tentant de distinguer entre la « technè » et l'« ergon » du fer, « sidèros ». La nomenclature savante hésite ensuite entre les deux termes jusque dans les années 1830, avec une préférence pour le terme « sidérotechnie ». « Sidérurgie » s'impose *in fine*, dans le courant du XIX^e siècle, au nom de sa capacité à désigner les acteurs. Hassenfratz, le premier, emploie le mot « sidérurgiste » et ne parle pas de « sidérotechnicien ». Et l'industrie s'est trouvée qualifiée de « sidérurgique » et non de « sidérotechnique »⁶.

- 3 L'évolution signe un changement de paradigme économique et scientifique. Au plan technique et économique, le secteur de production des ferreux - fer, fonte, acier - est devenu le secteur le plus dynamique et le plus innovant de l'économie européenne. Au plan scientifique, il s'agissait de donner à la chimie des minéraux et des métaux ses lettres de noblesse scientifiques. Savants, ingénieurs, entrepreneurs, souvent d'ailleurs les mêmes, étudièrent les savoir-faire des maîtres-fondeurs et les divers procédés employés, pour les traduire en savoirs scientifiques, entendons les Réaumur, Hellot, Grignon, Jars, Guillot-Duhamel, Lavoisier, Genssane, pour citer les plus connus. Tous ces savants, individuellement et collectivement, multiplièrent les visites de terrain, les expériences et les expérimentations, dont ils retirèrent moults mémoires et traités. Ce pourquoi le terme « sidérotechnie » a prévalu jusque dans le premier tiers du XIX^e siècle.
- 4 Cet effort avait eu un précédent. Les savants du XVI^e siècle, des médecins et des grammairiens au premier chef, avaient décidé de mettre à profit ce nouveau média qu'était l'imprimerie pour « rédiger en art », c'est-à-dire normer les écrits techniques et en faire des « sommes techniques », pour ordonner toute forme d'action et garder la mémoire de cet ordonnancement⁷. Il s'agissait alors d'étendre le domaine de l'agir (*agere*) à celui de la gestion (*administrari*). Mais ils ne cherchèrent pas entrer dans les arcanes de l'*operari*, de l'opératoire ; ils ne cherchèrent pas à se saisir du profond des pratiques professionnelles. Leur but était de rassembler et d'ordonner ces pratiques dans des écrits exhaustifs et cohérents de manière à les rendre gérables pour les administrateurs et compréhensibles pour les investisseurs. Ce fut proprement un exercice grammatical, à prendre ici dans le sens de la grammatisation des esprits qui marqua cette époque⁸.
- 5 L'effort syntaxique et lexicographique auxquels se livrèrent les savants et les ingénieurs des Lumières concerna cette fois directement les matériaux et leurs procédés. Leur objectif : expliciter les procédés métallurgiques, rendre compte des rationalités incluses dans les savoir-faire et les améliorer. Ils disposaient pour ce faire d'un champ cognitif neuf, puissant, distinct de la pensée technique, je veux parler de la pensée scientifique telle qu'elle apparaît et se développe au XVII^e siècle. Galilée le premier chercha à poser les fondements d'une science des matériaux dans son *Discours sur deux sciences nouvelles*⁹. La voie ouverte par les humanistes avait par trop prouvé combien il était pertinent de s'intéresser à l'action : il fallait les suivre et aller au-delà en bâtissant une science des matériaux et des pratiques.
- 6 Mais cela ne pouvait se faire en usant des idiomes de métiers, trop localisés, trop situés dans leurs expressions, trop « barbares » dans leur symbolisme chatoyant. Les savants œuvrèrent à définir une syntaxe proprement scientifique, avec un régime de la preuve fondé sur l'expérience et le calcul. Et ils œuvrèrent à la mise au point d'un vocabulaire

neuf, apte à rendre compte des descriptions, des récits d'analyse et d'expériences, tout en rendant justice à la technicité des arts et métiers. Roland Eluerd, dans son ouvrage *Les mots du fer et des Lumières*, donne à voir l'évolution¹⁰. Le haut-fourneau, sous la plume des savants, n'est pas analysé ; il est diagnostiqué, au sens clinique, médical du terme. On observe comment il tousse, comment il crache, comment il s'encombre, comment il digère, ou pas... En d'autres termes, faute d'un langage chimique, qui restait à inventer, on usa du discours médical, métaphorique certes, à l'instar des langages de métier, mais policé, utilisable entre gens de bonne société, et fondé en sciences.

- 7 L'Académie des Sciences contribua puissamment à l'évolution, par ses travaux et ses expertises¹¹. Il en résulta la remise en question de la nature de l'acier par Réaumur dans le début des années 1720 ; la mise sur pied d'un enseignement dédié, dès la fin des années 1740, le développement d'une veille technique internationale avec l'envoi d'ingénieurs mandatés pour observer, décrire et transcrire les techniques en usage en Europe¹². On comprend du coup la fortune première du terme « sidérotechnie ». Le néologisme distinguait l'approche savante de celle des maîtres-fondeurs, et désignait une métallurgie fondée en science, et non plus exclusivement en pratique. La fortune seconde de « siédérurgie » exprime la réussite de la métallurgie industrielle, fondée en science et en raison.
- 8 Fait intéressant, la métallurgie du fer fut seule, des métallurgies européennes, à se trouver ainsi rebaptisée. En regard, la métallurgie des non-ferreux ne bénéficia pas de cet effort de remise en forme, et de ce fait, évolua « naturellement », c'est-à-dire lentement, en adoptant progressivement les termes issus de la métallurgie « scientifique » au gré de l'évolution socio-technique. Pourquoi cette transformation sémantique volontariste s'est-elle portée essentiellement sur les ferreux, et non sur l'ensemble de la métallurgie ? Parce que c'est là que se trouvait l'innovation. Le milieu des savants métallurgistes avait parfaitement compris qu'en Grande-Bretagne, un secteur économique neuf était apparu avec mise au point de la fonte au coke, de l'acier au creuset, et le spectaculaire développement du *toyware*, dans la région de Birmingham¹³, terme employé en anglais pour désigner la petite quincaillerie en acier. Et ils en avaient compris le potentiel, en termes d'accroissement des richesses.

« Fusion », « fonte de fer », « fer crud » : quelques précautions oratoires

- 9 Cela étant, chacun est tributaire de son époque, y compris les savants des Lumières. Ce pourquoi, quelques précautions oratoires s'imposent :

Les savants appelaient « fusion » ou « fonte » ce que nous appelons aujourd'hui « réduction ».

- 10 La notion de « réduction » au sens chimique du terme ne peut exister dans les sources antérieures à la découverte de l'oxygène. Mieux, elle s'impose lentement dans les sources immédiatement postérieures, et cela même chez les tenants de ce qu'on appelle à l'époque la « nouvelle chimie ». Pour désigner ce que nous appelons aujourd'hui la « réduction » du minerai, les ingénieurs et savants de l'époque moderne et du début de

l'époque contemporaine, parlent de « fusion » ou de « fonte », mais aussi de « fondage », voire de « cuisson »¹.

- 11 Ce qu'il faut comprendre, c'est que le plan de référence, pour la construction des énoncés métallurgiques d'avant la métallographie repose sur le croisement du sensible et de l'intelligible. Et donc, sur la transcription la plus rationnelle de la matérialité, telle qu'est est manifeste. Voilà pourquoi, le terme « fusion » pour désigner une opération où les matières entrent en fusion. Et pourquoi le terme « réduction » est employé, lui, pour désigner le martelage des métaux, qui les « réduit » physiquement². Le premier à parler de « réduction » dans son sens contemporain est Hassenfratz³. Dans sa *Sidérotechnie*, il donne pour définition du terme : « *Auflösung*, - *Reducirung*, des minéraux, - Enlever leur oxygène »⁴.

Les savants appellent « fer fondu », « fonte de fer » ou « fer crud » ce que nous appelons aujourd'hui « fonte ».

- 12 Pour désigner le métal obtenu, les métallurgistes de l'époque moderne⁵ parlent de « fer crud », de fonte de fer ou de fer fondu, de « gueuse ou fonte en acier », de « fer crud ou fer de gueuse » (Jars), etc. L'explication de cette confusion tient à ce qu'avant l'existence d'une science efficace des matériaux, c'est à partir de la trilogie procédé/qualité/usage, que l'on définit la nature des produits. Ce qui compte dans la désignation, c'est le destin du métal obtenu dans la chaîne opératoire. Quand le métal est moulu directement, au sortir de la réduction en phase liquide, on parle de « fer fondu »⁶. Ainsi, lorsque Jean Hellot traduit le *Traité des fontes* de Schlutter, dans le début des années 1750, il emploie systématiquement le terme « fer fondu » pour désigner les plaques de fonte qui équipaient de multiples fourneaux de réduction ou d'affinage. Quand le métal obtenu est destiné à être affiné pour fer ou acier, on parle de « fer crud »⁷, manière d'indiquer qu'il s'agissait d'un produit intermédiaire. « Ce fer crud se subdivise en fontes blanches, fontes grises, fontes noires », explique Réaumur, une distinction technique établie à partir des caractéristiques physiques des fontes, indicatrice aussi du produit final escompté, type de fer ou type d'acier. Car les maîtres fondeurs maîtrisaient parfaitement la relation type de minerai/modalités de « fusion »/type de fonte obtenu, d'où la diversité de la dénomination savante. Et il fallait bien que les savants les suivent, tout en construisant un vocabulaire « savant ».
- 13 Personne à l'époque ne connaissait les raisons métallographiques de la différence entre fonte, fer et acier, pas même Réaumur. C'est une erreur en effet de considérer que Réaumur a découvert que la fonte et l'acier étaient des alliages fer-carbone. Réaumur ignorait l'existence du carbone dans les alliages ferreux, et jusqu'à l'existence même du carbone. Ce que Réaumur a compris, et en quoi, il a provoqué une rupture épistémique, qui a débouché sur la découverte du carbone dans les alliages ferreux, c'est la place de l'acier dans la succession fer/fonte/acier⁸. Avant lui, c'est l'acier qui était considéré comme le métal « le plus pur », le métal définitif en somme, tandis que la fonte de fer et le fer étaient considérés comme des métaux impurs, composites. L'académicien a remis le fer à sa place, et démontré que fonte et acier étaient des « ferreux » composites (il n'était pas question d'alliages alors). En quoi d'ailleurs, il n'a pas été suivi immédiatement, tant il parut bizarre de considérer que le fer était un métal plus « pur » que l'acier⁹. Pour découvrir le « carbone » et comprendre qu'acier et fonte étaient des alliages fer/carbone, il a fallu les travaux de Lavoisier et de son équipe de jeunes savants qui œuvraient à la

« nouvelle chimie » à ses côtés dans les années 1780 : Vandermonde, Berthollet, les auteurs avec Monge du mémoire qui, le premier, explique le rôle du carbone dans la fonte et l'acier¹⁰.

Les écrits des métallurgistes, s'inscrivent dans un autre régime d'appropriation du fait technique que celui des maîtres fondeurs, quoiqu'ils soient leurs contemporains.

- ¹⁴ La culture technique industrielle est structurée par la rationalisation consciente des termes et des procédés, la prédominance de la compréhension scientifique, et la formation en école dédiée : c'est le régime de la technique¹¹. En métallurgie, ce régime a été initié précisément par les savants des Lumières. La culture technique pré-industrielle, j'entends ici, la culture technique de la forge, celle donc des maîtres fondeurs, est dominée par la sensorialité, le symbolisme technique et métaphorique, indispensable pour la constitution et la transmission des savoir-faire, avec un apprentissage en atelier : c'est le régime de la pratique. Les maîtres-fondeurs et les savants se côtoyaient certes, et ils se parlaient. Mais, ils ne baignaient pas dans la même culture technique. Les maîtres-fondeurs opéraient dans le cadre du régime de la pratique, fondé sur l'oralité et l'apprentissage en atelier, les savants « traduisaient » les opérations métallurgiques dont ils suivaient le déroulement, dans un langage distinct, à volonté scientifique, avec une transmission écrite. Les uns et les autres recherchaient l'efficacité, mais avec un référentiel différent : celui du savoir-faire et de la compétence pour les maîtres-fondeurs, celui de la connaissance scientifique pour les métallurgistes.

Gueuse, masse ou masset : des intermédiaires obligés entre minerai, fer et acier

Masset en phase solide, gueuse en phase liquide

- ¹⁵ La métallurgie des ferreux consiste donc en l'obtention après réduction du minerai de fer, de trois produits distincts : la fonte et l'acier qui sont des alliages fer-carbone, le fer, qui est un métal plus ou moins pur¹. Lorsque la réduction se déroule en phase liquide (« *blast furnace process* », en anglais, « procédé indirect » en français), on obtient ce que les métallurgistes pré-industriels appellent une gueuse. « Gueuse, explique Duhamel du Monceau dans l'index de la *Description des Arts & Métiers* consacré à la fabrique des ancres, « en allemand, *eine Gans*, gros lingot de fer fondu qu'on moule au sortir du grand fourneau : elle a la forme d'un prisme ». Pour obtenir du fer ou de l'acier, la gueuse était transformée en « loupe » puis affinée. « La loupe, en allemand, *Gereinigte Gans*, c'est du fer de gueuse, fondu par du charbon de bois, & qu'on a un peu pétri sous le marteau », explique encore Duhamel du Monceau, dans le même ouvrage². Après une succession de phase d'affinage et raffinage, pour utiliser les termes de l'époque, les loupes étaient transformés en fer ou acier de diverses qualités. Dans le procédé dit « wallon », le plus couramment employé à cette époque, cette décarburation était effectuée au bas foyer par contact avec des scories d'affinage, suivi d'un cinglage. Mais, il y en avait beaucoup d'autres. Ainsi, en Italie du nord au XVII^e siècle, en Dauphiné au XVIII^e siècle, en Thuringe au début du XIX^e siècle, on utilisait le procédé appelé « bergamasque » dans lequel « la fonte était soumise à une « cuite » préalable dans le foyer même de la forge, puis réduite

en plaques minces qu'on brisait ensuite en morceaux et qu'on soumettait à l'affinage proprement dit et au cinglage³.

- 16 Lorsque la réduction se déroule en phase solide (« *bloomery process* en anglais, « procédé direct » en français), on obtient un produit hétérogène, appelé “bloom” en anglais, « masse », ou « masset » dans les sources françaises⁴. « Elle forme une masse qui se moule sur le propre fond du fourneau, sa figure est celle d'un espèce de gâteau ou d'une boule aplatie », explique Réaumur en 1722⁵, en s'appuyant sur les ateliers métallurgiques de Foderberg en Styrie et ceux du Pays de Foix, dans les Pyrénées. Hassenfratz décrit le masset comme « un espèce de pain de fer cuit »⁶, et cite les ateliers métallurgiques du monde entier du royaume de Siam à l'Afrique australe, en passant par la Russie, la Suède, la Styrie, la Carinthie, et les Pyrénées.
- 17 Agrégat de métal, fer et acier, de scories et de charbon de bois, le masse était retravaillée, « affinée », pour obtenir la qualité de métal souhaité. Un martelage à chaud du masset suffisait pour le fer grossier. Pour obtenir des fers de meilleure qualité et des aciers, le masset était brisé, soigneusement trié en regroupant les parties semblables, puis il subissait ce que l'on appelle aujourd'hui un « grappage », c'est-à-dire un martelage à chaud qui donnait des « masseaux » ou « massiots », ou des barres. Quant aux aciers, on les obtenait en opérant par liquation et cémentation dans les vallées brescienes aux XIII^e et XIV^e siècles, par « cuite » et cémentation dans l'Italie du Nord au sens large, au début du XVI^e siècle, pour donner un exemple. Ces carburations étaient suivies d'un cinglage et d'un soudage en « trousse » selon les différentes sortes d'acier que l'on voulait obtenir, une phase qui s'appelait « raffinage » dans la France du XVIII^e siècle⁷.

De la fusion à l'affinage : la carte mentale des métallurgistes des Lumières

- 18 Ainsi, les deux produits obtenus à la réduction, masset en phase solide, gueuse en phase liquide, avaient en commun, de subir des traitements complémentaires, en forge, pour donner du fer ou de l'acier. Ces traitements complémentaires, que nous savons être une épuration pour le masset, une décarburation pour la gueuse, les métallurgistes du XVIII^e siècle les qualifiaient d'affinage. L'intéressant, quand on s'appesantit sur leur topique cognitive est qu'elle ne débouche en aucune manière sur une opposition entre un procédé qui serait « direct », et un procédé qui serait « indirect ». Pour le comprendre, je me suis intéressée à la carte mentale mise en œuvre dans leurs divers écrits, en privilégiant l'approche stylistique (le vocabulaire) en lieu et place de l'approche linéaire (la description des procédés), dans la lignée de ce que préconisait Michel Foucault pour l'étude archéologique des savoirs⁸.
- 19 Enfin, j'ai essayé, dans le choix des ouvrages, de comprendre la dynamique qui s'établit entre traités « fondateurs » et traités « imitateurs ». Ainsi Swedemborg emprunte l'essentiel de son propos sur fer/fonte/acier à Réaumur. Gabriel Jars parcourt l'Europe métallurgique entre 1765 et 1768, le *Traité des fontes* de Schlutter à la main, et dès qu'il le peut, s'en démarque. Les écrits métallurgiques de la première moitié du XIX^e siècle sont profondément marqués par la *Sidérotechnie* d'Hassenfratz. Eugène Flachat, vingt ans plus tard, se réclame encore d'Hassenfratz, et lui emprunte le plan général de son ouvrage⁹. Mais il s'en démarque profondément. Le premier en effet, il prend pour plan de référence la « science industrielle » ; le premier, il historicise, au lieu de décrire. La notion de progrès d'un fourneau à l'autre se rencontre dans les traités du début du XIX^e siècle. Mais

elle est désormais théorisée : avec le traité dirigé par Flach, on passe de l'inventaire horizontal, synchronique, à une lecture évolutive, diachronique, en termes d'améliorations progressives. Une vulgate historiographique se met en place, qui va demeurer à l'œuvre jusqu'à quasiment la fin du XX^e siècle.

- 20 Trois observations d'ordre général émergent de l'analyse de l'emploi dans les divers traités des termes fonte, gueuse, loupe, masse, affinage, haut fourneau, bas fourneau, procédé, direct et indirect :
- 21 1) le terme « procédé » est diversement employé dans la période étudiée. Les auteurs, savants et/ou ingénieurs, parlent tout autant de méthodes ou d'opérations, que de procédés. En fait, explique Roland Eluerd, le début du XVIII^e siècle est celui des « manières », des « manœuvres », voire des « secrets » et des « tours de main ». Le vocabulaire glisse ensuite, dans les traités, vers les « méthodes » et les « procédés », ce dernier terme appliqué à la chimie. « En termes de chimie, on appelle Procédé la méthode qu'il faut suivre pour faire quelque opération », explique le *Dictionnaire de l'Académie* en 1762. Le terme s'exporte ensuite vers l'industrie, mais diversement spécifié par le nom de l'inventeur, l'origine, l'objet du procédé, de même d'ailleurs que le terme « méthode », dont l'usage le plus courant est « méthode + localisation d'origine », à quoi j'ajouterai « procédé + manière dont on procède », bien présent chez Gabriel Jars, par exemple. Le vocabulaire concrétise le passage « de la main à la raison », conclut le linguiste¹⁰.
- 22 2) le terme « haut-fourneau » -et la graphie correspondante- est lent à se mettre en place¹¹. « Les occurrences du haut fourneau restent peu nombreuses entre 1765 et 1775, observe Roland Eluerd. L'appellation est connue, mais elle ne l'emporte pas sur les autres appellations. Le terme devient plus fréquent au début du XIX^e siècle, alors qu'apparaît timidement l'appellation « fourneau de réduction »¹². Hassenfratz en définit le terme en le référant exclusivement à la hauteur, pas au produit obtenu. « Hauts Fourneaux, *Hoch Offen*. Fourneaux qui ont plus de douze pieds de haut (4m) ». Mais sans le mettre en avant, bien au contraire. « Le “fer crud”, explique-t-il, est produit par plusieurs sortes de fourneaux : le *stuckhofen*¹³, et les moyens fourneaux ». Cela étant, aucun fourneau travaillant en phase solide n'est qualifié de « bas fourneau » dans les traités que nous avons dépouillés. Chaque méthode, chaque manière de faire est liée à un territoire, elle est située donc, et pour chaque méthode, la dénomination du fourneau est soit vernaculaire, soit géographique, soit elle désigne le produit obtenu. Il faut attendre le milieu du XIX^e siècle pour trouver une théorisation de l'opposition entre bas fourneau et haut fourneau. C'est le traité de Flach qui opère ce changement radical, en distinguant dans son chapitre premier intitulé « Histoire et progrès de la fabrication du fer », deux lignées techniques, celle des « fourneaux bas » et celle des « fourneaux élevés »¹⁴. Et s'il place le *stuckhofen* dans la seconde catégorie, il n'en conclut pas moins dans la synthèse qu'il fait du « principe des anciennes méthodes » : « ce principe est celui de la conversion directe des minerais de fer malléable ou en acier ; le *stuckhofen* (type des fourneaux élevés) et le foyer catalan (type des fourneaux bas) en ont été les deux représentants matériels... »¹⁵
- 23 3) La notion de « direct » existe dès le XVIII^e siècle, mais c'est l'adjectif « immédiat » qui l'exprime, et essentiellement autour de l'acier. Hassenfratz parle des méthodes de « conversion immédiate de la mine du fer en acier (Styrie, Roussillon) » et des méthodes pour « convertir le fer crud en acier (Carinthie, Tyrol, Styrie, France, selon Agricola) ». Le traité de Flach parle encore de l'obtention immédiate de l'acier naturel¹⁶ et étend l'expression au fer en parlant de la « conversion immédiate de minerais en fer forgé ». Et

il présente ainsi la fonte : « Dans l'état actuel de la fabrication, la fonte est le résultat immédiat du travail des hauts fourneaux, appareils où l'on opère la réduction et la fusion des minerais à l'aide d'une haute température et de différents réactifs parmi lesquels le carbone occupe le premier rang »¹⁷. La notion d'« indirect », par contre, n'est pas opérante dans la période.

- 24 En fait, assez singulièrement, l'impression qui domine à la lecture linéaire des traités est celle d'un foisonnement, d'une profusion de méthodes, données sans hiérarchie aucune. Mais le sentiment de confusion engendré par ce foisonnement des méthodes de réduction, la multiplicité des produits obtenus, intermédiaires et finaux, masque une carte mentale relativement simple (fig.1), que l'on retrouve dans tous les traités métallurgiques, ceux du premier dix-neuvième siècle compris.

Figure 1. Carte mentale des sidérurgistes des Lumières (avec les vocables en vigueur dans les divers traités)

Quoiqu'elle soit masquée dans la linéarité du discours métallurgistes par la multiplicité des procédés décrits, et qu'elle ne soit pas théorisée scientifiquement, faute d'une chimie adéquate, la distinction entre « filière à masset » (réduction en phase solide) et « filière à gueuse » (réduction en phase liquide) structure le champ de la métallurgie pré-industrielle. La chaîne opératoire globale est identique pour les deux filières, avec la succession des deux grandes phases de fusion (réduction) et d'affinage. Dans l'espace technique français, l'accent est mis, pour l'acier, sur la production d'acier naturel. La technique de cémentation (espace technique allemand) est mal maîtrisée, et la technique de production d'acier fondu (Grande-Bretagne) totalement incomprise.

Crédit A.-F. Garçon

- 25 La distinction qui émerge nettement de cette carte mentale, celle qui structure, à leur insu, l'horizon de pensée des métallurgistes des Lumières, est la distinction entre réduction en phase solide et réduction en phase liquide. Elle s'établit à partir des produits intermédiaires obtenus, ceux que l'on va « affiner », masset, loupe, stuck, bloom dans un cas ; « fer de gueuse », de la fonte de fer, du fer crud, dans l'autre cas. L'autre distinction structurante, est celle entre « fusion » et « affinage ». L'affinage débouche sur une autre série de produits intermédiaires, « massaux » pour l'affinage du masset « loupe¹⁸ », puis « lopins », voire « renards » pour l'affinage du « fer crud »¹⁹. Au total, on comprend

pourquoi, dans cette carte mentale, et avec cette topique cognitive fondée sur la relation procédé/qualité/usage, la notion de « procédé indirect » n'existe pas. Certes, la fonte de fer est obtenue « immédiatement », mais c'est un produit peu valorisé culturellement et économiquement²⁰. Le fer et l'acier, les produits finaux fortement valorisés, sont toujours obtenus indirectement.

L'invention du « procédé direct » et son rajeunissement entre 1850 et 1890

Flachat et Percy, théoriciens du « procédé direct »

- 26 On doit donc à Eugène Flachat d'avoir fixé l'historiographie de la métallurgie européenne, en opérant la distinction entre deux lignées, celle des bas-fourneaux et celle des hauts fourneaux, et d'avoir assigné à la première son statut d'objet primitif, quoiqu'il envisage la possibilité d'un avenir technique pour le fourneau catalan, moyennant des indispensables améliorations. Mais, c'est à John Percy que l'on doit la théorisation entre « procédé direct » et « procédé indirect ».
- 27 Dans le volume II de son grand oeuvre, *Metallurgy. The Art of extracting metals from their ores, and adapting them to various purposes of manufacture*, dédié au fer et à l'acier, Percy consacre près d'une centaine de pages à ce qu'il appelle le « procédé direct », « *direct extraction of Iron in malleable state from ore* »¹. L'emploi de l'expression pour désigner le procédé d'obtention de fer et de l'acier en phase lui permet, explique-t-il « de le distinguer du procédé "moderne" ou "indirect" dans lequel, la fonte -*cast-iron*- est obtenue en premier ». A l'instar d'Hassenfratz, il décrit chacune des formes connues du procédé : en Inde, à Bornéo, en Afrique, en Birmanie. Il s'arrête longuement sur le procédé catalan, puis sur le procédé corse et sur le *stückhofen* allemand. Mais, à l'instar de Flachat, ce rappel historique n'est là que pour renvoyer au présent et - surtout - à l'avenir. Car pour J. Percy, comme pour Flachat, le « procédé direct » a un avenir. Ce pourquoi il décrit les formes récemment mises au point : les procédés Renton, Chenot et Yates.
- 28 Breveté en 1851, aux États-Unis par James Renton, décrit par le Professeur Wilson à l'occasion de la *New York Industrial Exhibition*, le procédé Renton a été développé à l'échelle commerciale à Cincinnati (Ohio) et Newark (New Jersey) jusqu'en 1855². En 1851 également, Chenot présentait à l'exposition internationale de Londres, les « éponges métalliques » (en français dans le texte original), qu'ils avaient obtenues par la réduction directe d'hématite brune et leur cémentation au charbon de bois, et les spécimens de fer et d'acier fabriqués à partir de ces éponges. Présenté de nouveau à l'exposition de Paris en 1855, il obtenait une médaille d'or et fut qualifié par Frédéric Le Play de « plus grande découverte métallurgique de l'époque ». Chenot prit quatre brevets en Grande-Bretagne en 1856 et montra des spécimens à l'exposition de Londres en 1862. Diverses usines adoptèrent son procédé : Baracaldo près Bilbao en Espagne en 1852 ; Clichy-la-Garenne en 1855 ; Couillet près Charleroi et Pontcharra en Isère en 1856 ; Hautmont, dans le Nord en 1857³.

Le «procédé direct» : histoire oubliée d'une filière d'obtention de l'acier

- 29 Pourquoi cet intérêt pour le travail en phase solide, alors qu'en parallèle, la fonte au coke avait atteint sa pleine maturité ? C'est qu'à l'époque, la sidérurgie vivait une crise technique. Je voudrais, pour que l'on comprenne bien les enjeux, faire état de la carte mentale qui structure la pensée métallurgiste du milieu du XIX^e siècle, telle qu'elle transparaît au travers de l'ouvrage de Flach, un ouvrage qui a fait date en son temps (fig.2).

Figure 2. Carte mentale des sidérurgistes du XIX^e siècle, avant l'invention du procédé Bessemer (avec les vocables en vigueur dans l'ouvrage de Flach)

En cinquante ans, la carte mentale des sidérurgistes s'est considérablement étoffée. Sa structure repose toujours sur l'opposition entre « filière à masse » et « filière à gueuse ». Mais on voit clairement que l'industrialisation s'est portée d'une part sur le dédoublement de la filière à gueuse, en « fonte à bois » et « fonte à coke », et d'autre part sur la phase d'affinage, avec le puddlage, le laminage, et toutes les possibilités offertes par le four à réverbère. La production de fonte à coke bat son plein. En regard, l'industrie produit très peu d'acier. La crise technique provoquée par ce goulet d'étranglement sera résolue avec l'invention, à partir des années 1860, des procédés Bessemer, Martin, puis Thomas-Gillchrist. Mais le coût de ces procédés incitera les sidérurgistes à industrialiser le « procédé direct », a priori plus économique puisqu'il fait l'impasse sur la fonte, en tant que produit intermédiaire.

Crédit A.-F. Garçon

- 30 Les deux filières de réduction, en phase solide et en phase liquide, la structurent toujours. Ce qui s'est singulièrement étoffé, c'est la phase d'affinage, dans les deux filières, et tout particulièrement dans la filière de production de la fonte. Flach l'observe d'ailleurs. Pour lui, la grande avancée, tient à ce qu'il appelle la « division du travail », entre les deux grands moments de la chaîne opératoire, réduction et affinage. Avec le puddlage, le laminage, les presses, le marteau-pilon, etc., l'affinage est désormais totalement industrialisé. Mais, en regard de cette industrialisation, on est frappé par la pauvreté de la gamme de produits obtenus. En particulier, par la faiblesse patente de l'acier.
- 31 En d'autres termes, fer et fonte sont industrialisés. Pas encore l'acier. Mettre au point au plus faible coût un procédé industriel de production de l'acier, telle était la question posée aux métallurgistes, ce à quoi ils aspiraient tous dans ces années 1850-1860. Les

grands gagnants, on le sait, seront les procédés Bessemer, Martin et Thomas-Gilchrist. Mais, d'autres voies furent tentées et continueront de l'être jusque dans les années 1900, autour du procédé « direct », précisément. En fait, l'expression « procédé direct » émerge dans la métallurgie des ferreux au milieu du XIX^e siècle, moins pour désigner la filière historique de réduction en phase solide, que pour ouvrir le champ à un procédé d'obtention de l'acier destiné à éviter l'étape de la fonte, et donc le haut fourneau, une étape que les « métallurgistes sidérurgiques » jugeaient coûteuse en énergie tandis qu'elle compliquait la maîtrise de la composition de l'acier.

- 32 Carl W. Siemens, grand spécialiste des fours gazogènes, inventeur, entre autres, du régénérateur Siemens, multiplia les recherches sur la question. En 1873 à l'*Iron and Steel Company*, lorsque la discussion s'engage sur les avantages et inconvénients réciproques des deux procédés de réduction, direct et indirect, il observe, à propos de la migration ou non du soufre et du phosphore dans le métal : « le procédé direct a un avantage sur le haut-fourneau, dont l'action réductrice est si énergétique que tout ce qui est réductible entre en combinaison avec le fer »⁴. Et Ferdinand Gautier, ingénieur aux forges de Terrenoire et futur secrétaire du Comité des Forges, qui traduit cette communication dans le dossier qu'il présente sur « les nouveaux procédés mécaniques de production du fer et les essais de Siemens » la fait suivre d'un large extrait d'un article paru en 1873 dans l'*Oesterreichische Zeitschrift für Berg und Hüttenwesen* sur le procédé de « production directe du fer par le minerai »⁵.
- 33 Siemens insiste en 1877, dans une intervention à l'*Iron and Steel Institute* qu'il intitule « *Some further remarks regarding the production of Iron and steel by direct process* » : « ce procédé est tellement simple qu'il n'est pas étonnant qu'il ait précédé les méthodes plus ou moins compliquées qu'il emploie aujourd'hui pour produire du fer et de l'acier sur une grande échelle ; aussi on a souvent, et surtout de nos jours, essayé d'y revenir. Le fer produit par procédé direct est ordinairement presque chimiquement pur, quoique le minerai et l'agent réducteur employé puissent contenir une forte proportion de phosphore, de soufre et de silice ; en outre, s'il est débarrassé de sa scorie, il est, sous le rapport de la qualité et de la valeur commerciale, supérieure au fer marchand ordinaire ». Puis explique le but des recherches qu'il mène dans ce champ industriel : « combiner les avantages du procédé direct avec ceux des méthodes modernes, en vue de produire des températures intenses fournies par des gaz purs, et d'opérer sur de grandes masses de matières premières sans dépense de main-d'œuvre »⁶.
- 34 Vingt ans plus tard, à l'Exposition universelle de Chicago, en 1893, alors que les filières Bessemer, Martin, et Thomas-Gilchrist étaient parfaitement établis, Pierre Arbel maître de forges⁷ observe dans son compte-rendu des entreprises et procédés présentés par les États-Unis : « La conduite des hauts fourneaux s'est tellement perfectionnée aujourd'hui aux États-Unis, qu'il n'est guère permis d'espérer une diminution dans le prix de la fabrication du fer. Aussi cherche-t-on beaucoup en ce moment à produire, directement du minerai, du fer à l'état de matière première pour la fabrication de l'acier par simple fusion », avec une méthode qui « consiste à prendre un minerai riche naturellement ou artificiellement, et à la chauffer en présence de la quantité de charbon strictement nécessaire pour le réduire ». Après avoir décrit deux procédés, le procédé Eames, exploité par la *Carbon Iron Company* de Pittsburg et l'*Adam-Blair Process*, installé aux usines à bandages de Latrobe, il conclut avec pragmatisme : « quel que soit le sort réservé à ces tentatives, il est certain que l'avenir est au procédé d'obtention directe du fer du minerai ; ces deux essais pratiques étaient intéressants à signaler »⁸.

- 35 Au début du XX^e siècle, la production d'acier avec le « procédé direct » désormais mis en œuvre en utilisant le four électrique, s'avère définitivement trop coûteuse pour devenir rentable à grande échelle. Léon Guillet, en 1907, résume parfaitement la question : « Pour le procédé direct (il parle de la fabrication de l'acier au four électrique), on part de riblons et de fonte, et l'on marche en *ore process* ou en *scrap process*. De toute façon, l'affinage se fait entièrement dans le four, il en est généralement de même que la fusion. Mais cette méthode est d'un prix élevé ; elle ne semble avoir d'avenir que lorsqu'on l'utilise pour remplacer le creuset ou pour la fabrication des aciers spéciaux. Il est certain que la fabrication des aciers à outils y est très aisée et économique. La fabrication des aciers spéciaux a été faite déjà en quantités importantes au four électrique, notamment celle des aciers à coupe rapide (aciers au chrome, tungstène), on peut noter que le mode de chauffage donne des pertes moins importantes que dans les méthodes ordinaires et que la haute température favorise la dissolution des divers produits incorporés »⁹. Le « procédé direct » existe toujours, avec la production de DRI (« *Direct Reduced Iron* ») sous forme de poudre ou de boulettes, ou d'HBI (*Hot-Briquetted Iron*), sous forme de briquettes.

En conclusion

- 36 C'est donc bien tardivement, en définitive, que les filières d'obtention de fer et d'acier ont été qualifiées de « procédé direct » ou de « procédé indirect ». Et ce n'est pas la constitution d'une nomenclature scientifique et industrielle qui a prévalu pour fixer l'opposition. C'est un moment de l'histoire de la sidérurgie, un moment de crise technique, durant lequel le secteur chercha par tous les moyens à produire de l'acier industriel, aux coûts les plus bas possibles. Auparavant, les distinctions qui prévalaient étaient bien entre la filière de réduction en phase solide (la filière à masset), et la filière de réduction en phase liquide (la filière à gueuse). L'apport historique du traité d'Eugène Flachet est intéressant à cet égard. Car s'il historicise les innombrables méthodes de production de fonte, de fer et d'acier, en prenant pour axe d'étude le progrès, il n'assigne pas la filière à masset aux « fourneaux bas ». Au contraire, puisque, sous sa plume, la filière à masset se structure autour de deux lignées techniques, celle des fourneaux élevés, représenté selon lui par le *stuckhofen* et celle des fourneaux bas, les fourneaux catalans, dont il souhaite un possible progrès. L'industrialisation viendra, on le sait, d'une troisième lignée, celle des fours à gazogène. La filière, qui existe toujours, met désormais sur le marché un demi-produit spécifique, le minerai pré-réduit, commercialisé en poudre, boulettes ou briquettes.
- 37 Mais l'appellation a connu un transfert d'usage. À la fin du XX^e siècle, l'opposition « procédé direct/procédé indirect » est adoptée en paléométallurgie pour distinguer les deux filières de réduction du minerai de fer en phase solide et en phase liquide. Ce fut principalement l'œuvre du monde francophone, le monde anglophone parlant plutôt de « *bloomery process* » et de « *blast furnace process* ». L'adoption de l'opposition par les archéologues s'explique historiquement, dans le cadre d'une science paléométallurgique qui avait tout à construire et partait, pour ses analyses, des découvertes archéologiques européennes. Elle s'est effectuée dans un cadre épistémique dominé par la culture industrielle occidentale du XIX^e siècle. Une vulgate scientifique que la paléométallurgie a renforcée en associant le procédé direct au bas fourneau et le procédé indirect au haut-fourneau. Mais ce plan de référence, ce cadre épistémique implicite, s'est trouvé invalidé, dans sa volonté d'universalité, par les découvertes archéologiques effectuées dans

l'espace technique africain, et dans d'autres endroits du monde, qui ont donné à voir - et à comprendre - des fourneaux de réduction en phase solide, haut de six mètres et de surcroît travaillant en ventilation naturelle¹. Les descriptions de procédés paléométallurgiques s'accumulent désormais à l'échelle mondiale dans un foisonnement qui rappelle celui des descriptions des métallurgistes des Lumières. Un nouveau cadre épistémique est nécessaire, et son élaboration suppose de mettre à distance celui dans lequel on se trouve. C'est ce que j'ai essayé de faire dans cet article, avec cette archéologie de l'opposition « direct/indirect », en faisant apparaître son caractère situé, les raisons de son invention et sa déclinaison par l'occident industriel.

NOTES

1. L'opération traditionnelle de coupellation consistait à fondre le plomb d'œuvre, obtenu par réduction du minerai, la galène, sur une « coupelle » et à séparer le plomb de l'argent, par injection d'un fort courant d'oxygène. On obtenait au sortir de l'opération de la litharge et un « gâteau d'argent ». La litharge était ensuite « revivifiée » en plomb marchand ou vendue en l'état.
2. BELHOSTE Jean-François, « Mutations techniques et filières marchandes dans la sidérurgie alpine entre le XIII^e et le XVI^e siècle », in BRAUNSTEIN Philippe (dir.), *La sidérurgie alpine en Italie (XII^e - XVII^e siècle)*, Rome, École Française de Rome, 2001, p.515-592.
3. ELUERD Roland, *Les mots du fer et des Lumières*, Paris, Honoré Champion, 1993, p.121-128
4. Attesté pour la première fois chez Réaumur, le terme « métallurgiste » désigne d'abord un « auteur ayant traité des métaux ». Il est employé pour la première fois dans le Dictionnaire de Trévoux en 1752, pour désigner aussi « Qui travaille les métaux ». « Jusqu'ici nous avons décrit les mines de fer en naturalistes (...) il nous reste à les décrire en minéralogistes, ou à donner une idée de la théorie-pratique des fondeurs » trouve-t-on écrit dans la *Minéralogie* de Bomare en 1762. ELUERD Roland, *Les mots...*, op.cit., p.124-125
5. JARS Gabriel, *Voyages métallurgiques. Recherches et Observations sur les mines & forges de fer, la fabrication de l'acier, celle du fer-blanc, & plusieurs mines de charbon de terre, faites depuis l'année 1757 jusques & compris 1769, en Allemagne, Suède, Norvège, Angleterre & Écosse. Suivies d'un mémoire sur la circulation de l'air dans les mines et d'une notice de la jurisprudence des mines de charbon dans le Pays de Liège, la Province de Limbourg & le Comté de Namur, par feu M. JARS, de l'Académie Royale des Sciences de Paris, de celle de Londres pour l'Encouragement des Arts & Associé de l'Académie des Sciences, Belles-Lettres & Arts de Lyon et publiés par M. G. JARS, Correspondant de l'Académie Royale des Sciences de Paris, & associé à celle de Lyon, Lyon, Gabriel Regnault, 1774.*
6. ELUERD Roland, *Les mots...*, op.cit., 1993, p.126-128.
7. VÉRIN Hélène, « Rédiger et réduire en art : un projet de rationalisation des pratiques », in DUBOURG-GLATIGNY Pascal, VÉRIN Hélène, *Réduire en art. La technologie de la Renaissance aux Lumières*, Paris, Éditions de la MSH, 2008, p. 17-58.
8. AUROUX, Sylvain, *La Révolution technologique de la grammatisation. Introduction à l'histoire des sciences du langage*, Liège, Mardaga, 1994
9. GALILÉE, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, Introduction, traduction, notes et index par Maurice CLAVELIN, Paris PUF, 1995.
10. ELUERD Roland, *Les mots...*, op.cit., 1993.

11. DELAUNAY Bernard, *Penser la technique à l'Académie Royale des Sciences (1699-1750)*, Paris, Honoré Champion, 2018.
12. Il ne s'agissait pas pour autant nécessairement d'espionnage industriel, voir à ce propos GARÇON Anne-Françoise et HILAIRE-PÉREZ Liliane, « Open Technique between Community and Individuality in Eighteenth-Century France », in DE GOEY Ferry, VELUWENKAMP Jan Willem (eds), *Entrepreneurs and institutions in Europe and Asia*, Amsterdam, Aksant, 2002, p.237-256.
13. BERG Maxine, « From Imitation to Invention: Creating Commodities in Eighteenth-Century Britain », *The Economic History Review*, 2002, vol.55, n°1, p.1-30.
1. Pour un inventaire plus exhaustif, voir ELUERD Roland, *Les mots...*, op.cit., 1993, *passim*. Pour tout ce qui concerne l'analyse de la terminologie technique, en particulier autour des fourneaux, j'ai constitué mon propre inventaire, indépendamment de celui effectué par le linguiste, du fait de la différence d'approche et d'une connaissance plus approfondie des fourneaux.
2. Gabriel Jars, par exemple, parle des « méthodes en Suède pour affiner le fer de gueuse et le réduire en fer forgé », *Voyages métallurgiques*, op.cit., 1774, p.131.
3. Après avoir suivi les cours de technologies données dans les universités allemandes à la fin du XVIII^e siècle, après avoir été secrétaire de Lavoisier, Jean Henri Hassenfratz (1755-1827) devint professeur de technologie à l'École centrale des travaux publics, puis à l'École polytechnique, puis professeur de minéralurgie à l'École des mines de Paris. Voir GRISON Emmanuel, *L'étonnant parcours du républicain J.H. Hassenfratz (1755-1827) : du faubourg Montmartre au Corps des Mines*, Presses des Mines, 1996 ; DUPONT Jean-Yves, « Les cours de Machines de l'École polytechnique. Première partie. La genèse d'un enseignement : 1794-1806 », *Bulletin de la Sabix*, 2000, n°25, p.6-19 ; GARÇON Anne-Françoise, « Technologie : histoire d'un régime de pensée », in CARVAIS Robert, GARÇON Anne-Françoise, GRELON André, *Penser autrement la technique, XVI^e-XXI^e siècle*, Paris, Cl. Garnier, 2017, p.72-102.
4. HASSENFRTZ Jean-Henri, *La sidérotechnie ou L'art de traiter les minerais de fer pour en obtenir de la fonte, du fer, ou de l'acier*, Paris, Firmin Didot, 4 vol., 1812, Index. Quoiqu'elle soit moins prisee dans l'historiographie que l'*Encyclopédie* de Diderot, ou les mémoires de Duhamel du Monceau inclus dans les *Description des Arts et Métiers* publiés par l'Académie des sciences, la *Sidérotechnie* d'Hassenfratz est un ouvrage essentiel, une pierre de touche, dans l'histoire de la sidérurgie, que cite encore Louis Grüner dans son *Traité de l'acier* en 1862. Cette somme, certainement la plus imposante écrite dans le domaine, avant le fameux *Metallurgy* de John Percy, présente l'intérêt d'user des apports de la chimie lavoisienne, tout en décrivant minutieusement les innombrables procédés locaux en vigueur.
5. JARS Gabriel, *Voyages...*, op.cit., vol.1, 1774, *passim* ; SWEDENBORG Emanuel, *Traité du fer*, traduit par Bouchu dans *L'Art des forges et fourneaux à fer*, *Descriptions des Arts et Métiers faites ou approuvées par Messieurs de l'Académie royale des Sciences de Paris*, Tome II (éd. Marquis de Courtrivon et E. Bouchu), section IV-196, *passim*. SCHLUTTER Christophe André, *De la fonte des mines, des fonderies, &c. traduit de l'Allemand de Christophe-André SCHLUTTER. Tome premier, qui traite des essais des mines & métaux, de l'affinage & raffinage de l'argent, du départ de l'or, etc., le tout augmenté de plusieurs procédés & observations*, publié par M. HELLOT, de l'Académie Royale des Sciences, & de la Société Royale de Londres, Paris, 1750, *passim*.
6. On retrouve cette expression dans l'expression « cast iron » qui désigne encore aujourd'hui la fonte
7. « crud », pour « crudum », terme latin qu'on traduirait aujourd'hui par brut. On parlait par ailleurs de « fonte de la mine crue » - par opposition à la mine « cuite », c'est-à-dire grillée. L'étymologie crud=crudum s'est effacée à mesure que se perdait la notion de « cuisson » des minerais. Ce pourquoi, progressivement l'orthographe glissa vers le « fer cru ».
8. REAUMUR [FERCHAULT DE] René-Antoine, *L'Art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu ou de faire des ouvrages de fer fondu aussi finis que de fer forgé*, par M. de Réaumur de l'Académie Royale des Sciences, Paris, Michel Brunet, 1722.

9. THOMAS Nicolas, « Prendre de l'acier pour de l'or », *Hypothèses*, 2006, vol.9, n°1, p.175-186.
10. *Mémoire sur le fer considéré dans ses différents états métalliques*, par Mrs Vandermonde, Berthollet et Monge, lu à l'Académie royale des sciences au mois de mai 1786, Paris, Imprimerie royale, 1788.
11. GARÇON Anne-Françoise, « Une brève histoire de la culture européenne et de sa relation à l'innovation », *Technologie et innovation*, vol.17, n°4, ISTE, *Open science*, 2017, DOI : 10.21494/ISTE.OP.2017.0156.
1. DILLMANN Philippe, BERNARDI Philippe, « Premiers résultats métallographiques sur les tirants de fer du Palais des Papes d'Avignon. Éléments de réflexion sur la qualité et la provenance des matériaux ferreux utilisés dans la construction monumentale au Moyen-Âge », in NOËL René, PAQUAY Isabelle, SOSSON Jean-Pierre (dir.), *Au-delà de l'écrit. Les hommes et leurs vécus matériels au Moyen Age à la lumière des sciences et des techniques. Nouvelles perspectives*, Louvain-la-Neuve, 2003, p.241-279.
2. « Fabrique des ancras lue à l'Académie en juillet 1723 par M. de Réaumur, avec des notes et des additions de M. Duhamel », *Descriptions des Arts et Métiers, Nouvelle édition par J.E. Bertrand*, Tome 14, 1781, p.63. Botaniste et agronome, l'académicien Duhamel du Monceau ne doit pas être confondu avec Guillot-Duhamel, qui signait également Duhamel, ingénieur, maître de forges, métallurgiste réputé et professeur à l'École des Mines de Paris, lorsque celle-ci fut créée dans le début des années 1780.
3. BELHOSTE Jean-François, « Mutations techniques... », *op.cit.*, 2001 p.586 et *passim*.
4. Le terme « masset » est le plus fréquemment employé dans les mémoires de l'Académie des sciences, comme dans la *Sidérotechnie*, puis au XIX^e siècle dans les ouvrages traitant du procédé à la catalane, ce pourquoi je l'ai adopté. Pour le terme « loupe », voir *infra*.
5. REAUMUR [FERCHAULT DE] René-Antoine, *L'Art d'adoucir le fer fondu...*, *op.cit.*, 1722, p.4.
6. L'expression est employée dans la description de « la fonte et de l'affinage des minerais de fer avec du bois, dans les moyens fourneaux, d'où l'on retire les massets par le gueulard », HASSENFRAZ Jean-Henri, *La sidérotechnie...* *op.cit.*, 1812, t.3, p.136.
7. BELHOSTE Jean-François, « Mutations techniques... », *op.cit.*, 2001 p.572.
8. L'archéologie n'entreprend pas de traiter comme simultané ce qui se donne comme successif (...). Ce qu'elle met en suspens, c'est le thème que la succession est un absolu (...); c'est aussi le thème qu'il n'y a dans le discours qu'une seule forme et qu'un seul niveau de succession. À ces thèmes, elle substitue des analyses qui font apparaître à la fois les diverses formes de succession qui se superposent dans le discours (...), et la manière dont s'articulent les successions ainsi spécifiées. (...) Il faut donc, pour constituer une histoire archéologique du discours, se délivrer de deux modèles qui ont, longtemps sans doute, imposé leur image : le modèle linéaire de la parole (...); et le modèle du flux de conscience dont le présent s'échappe toujours à lui-même dans l'ouverture de l'avenir et dans la rétention du passé. Aussi paradoxal que ce soit, les formations discursives n'ont pas le même modèle d'historicité que le cours de la conscience ou la linéarité du langage. », FOUCAULT Michel, *L'archéologie du savoir*, 1969, p.220-221, cité par SERRES Alexandre, « L'Archéologie du savoir : la dimension critique. Foucault à l'œuvre. Deux années de lecture foucauldienne dans un laboratoire de SHS », 2006, HAL Id : sic_00108451.
9. FLACHAT Eugène, BARRAULT Alexis, PÉTIET Jules, *Traité de la fabrication du fer et de la fonte envisagée sous les rapports chimique, mécanique et commercial*, Paris, A. Mathias, 1842. L'ouvrage a fait l'objet d'un reprint en 2018 par Hachette Livre, dans sa collection Savoirs et Traditions.
10. ELUERD Roland, *Les mots...*, *op.cit.*, 1993, p.128-131.
11. Il est bien question ici du terme contemporain dans la graphie « haut-fourneau ». Auparavant, on parle de haut fourneau, de fourneau haut, de fourneau élevé, voire de grand fourneau, sans placer de trait d'union.
12. ELUERD Roland, *Ibidem*, p.189-192.

13. Les « *stuck hoffen* », étaient ainsi appelés parce qu'ils produisaient des « *stuck* », diversement traduits « masse de fer », « masse de fer et d'acier » chez Jars, « masse de fonte » chez Hassenfratz. Pour les métallurgistes du XVIII^e siècle, c'étaient des moyens fourneaux.

14. FLACHAT Eugène, BARRAULT Alexis, PÉTIET Jules, *Traité...*, op.cit., 1842, p.6.

15. *Ibid.*, p.9. La partie solide, le *stuck*, était remaniée « dans un foyer spécial (...) en liquéfiant une ou plusieurs fois la masse sous l'influence du charbon et de l'air forcé, jusqu'à ce qu'elle eût atteint la qualité que l'on désirait obtenir », et, conclut Flach, « c'est ici que nous rencontrons la première trace des feux d'affinage ; car c'est, en définitive, le seul nom que l'on puisse donner à ces foyers de seconde élaboration », *Ibidem*, p.8. J. Percy les qualifia de « *High Bloomery Furnaces* ». J.-F. Belhoste en parle avec raison comme d'une filière intermédiaire entre la réduction en phase solide et la réduction en phase liquide.

16. L'appellation « acier naturel » ou « acier de fusion » désignait les aciers obtenus par martelage soit du masset, soit du fer de gueuse, dans le cadre de la fonte au bois. On le distinguait par cela de l'acier « factice » ou de cémentation.

17. FLACHAT Eugène, BARRAULT Alexis, PÉTIET Jules, *Traité...*, op.cit., 1842, p.66.

18. Le terme « loupe » est commun aux deux filières de production, celle à masset, et celle à gueuse, pour désigner une « masse » de métal, mais à des moments différents de la chaîne opératoire. En phase solide, c'est une autre manière d'appeler le « masset », obtenu en fin de réduction. En phase liquide, le « fer de loupe » désigne les morceaux de « fer de gueuse » rassemblés en masse par un premier martelage, en phase d'affinage donc.

19. Les morceaux de fer de gueuse donnent des « loupes » que l'on divise ensuite en « lopins », dont on poursuit l'affinage. La « renardière » est le nom donné au foyer de forge quand on ne fait usage que d'un seul foyer pour affiner et réchauffer (HASSENFRAZ Jean-Henri, *La sidérotechnie...*, op.cit., 1812, t.III, p.206). Par extension, c'est le nom donné au foyer dans lequel on refond de la vieille ferraille.

20. Sur l'imaginaire pré-industriel du métal, voir GARÇON Anne-Françoise, *L'imaginaire et la pensée technique. Une approche historique, XVI^e-XX^e siècle*, Paris, Cl. Garnier, 2012, p.55-82.

1. PERCY John, *Metallurgy. The Art of Extracting Metals from Their Ores*, Vol.2. *Iron and Steel*, London, J. Murray, 1864. Les citations renvoient à la version originale anglaise, traduites par mes soins. La version française, très édulcorée, ne reflète pas la richesse de l'œuvre du grand métallurgiste britannique.

2. PERCY John, *Metallurgy...*, op. cit., 1864, p.334-335.

3. PERCY John, *Metallurgy...*, op. cit., 1864, p.335-345.

4. *Bulletin de la Société de l'Industrie Minérale*, 2^{ème} série, tome III, 1874.

5. *Ibidem*, p.55-64.

6. *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, volume 77, mars 1878, p. 145-147. En 1873, le four Siemens se composait d'une cornue rotative et de deux fours accolés à un régénérateur. En usage dans les usines de la *Landore Steel Company* à Swansea, il produisait mille tonnes d'acier par semaine, BLERZY Henri, « La métallurgie du fer et de l'acier. Procédé Siemens », *La Nature*, t.1, 1873, p.184-186.

7. Pierre Arbel était et rapporteur pour la France, du Comité 12, consacré aux Mines et à la métallurgie. Sur la société Arbel, voir « Berliet et ses fournisseurs : Arbel », *Berliet information*, n° 179, janvier-février 1971 (<http://www.memoires-industrielles.fr/doc/fiche/2080>); EYTIER Jean-Louis, « Lucien Arbel, Un nom sur les rails », *Arts&Métiers Mag*, 13 novembre 2016 (<https://mag.arts-et-metiers.fr/lucien-arbel-nom-sur-rails/>).

8. *Exposition internationale de Chicago en 1893. Rapports. Comité 12. Mines, Exploitation des mines et métallurgie, Minerais de soufre*, Paris, Imprimerie Nationale, 1894, p.82-84.

9. *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, volume 106, 1907, p.38-40.

1. BOCOUM Hamady (dir.), *Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique : une ancienneté méconnue. Afrique de l'Ouest et Afrique centrale*, Paris, UNESCO, 2002 ; COULIBALY Élisée, *Savoirs et savoir-faire*

des anciens métallurgistes d'Afrique. Procédés et techniques de la sidérurgie directe dans le Bwanu (Burkina Faso et Mali), Paris, Karthala, 2006.

RÉSUMÉS

Sur quoi repose l'opposition procédé direct/procédé indirect d'usage courant en paléométallurgie des métaux ferreux (fer, fonte, acier) ? Une perspective d'archéologie des savoirs, telle que la préconisait Michel Foucault, si elle révèle la présence constante dans la pensée des métallurgistes des XVIII^e et XIX^e siècle, de la distinction entre la « filière à masset » (*bloomery process*) et la « filière à gueuse » (*blast furnace process*), montre qu'il a fallu attendre le milieu du XIX^e siècle pour qu'elle s'inscrive dans l'opposition « direct/indirect ». Technique avant tout, la raison de cette émergence reflète la nécessité qu'il y avait pour les sidérurgistes d'inventer un procédé de production industrielle de l'acier, qu'ils espéraient économique s'il leur épargnait le passage par la fonte.

Whence comes the opposition of the direct / indirect method of common use in paleometallurgy of ferrous metals (iron, cast iron, steel)? Based on the archeology of knowledge, as recommended by Michel Foucault, the article reveals, on the one hand, the permanence of the distinction between the "filier à masset" (*bloomery process*) and the "filier à gueuse" (*blast furnace process*) in the thought of metallurgists of the eighteenth and nineteenth centuries, but also shows that it was only from the mid-nineteenth century that this distinction was inscribed in a "direct / indirect" opposition. Mainly technical, the reason for this emergence lies in the need for steelmakers to invent a process for the production of industrial steel, which they hoped would be profitable without cast iron as an intermediate.

INDEX

Keywords : history of technology, bloomery process, blast furnace process, paleometallurgy

Thèmes : Entretiens et leçons

Index chronologique : Époque moderne, Époque contemporaine

AUTEUR

ANNE-FRANÇOISE GARÇON

Anne-Françoise Garçon est professeur émérite à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. Ses travaux portent sur l'histoire de la pensée technique : conception, innovation, régimes de la pensée opératoire ; l'histoire des systèmes techniques entre XVI^e et XX^e siècles, l'épistémologie du patrimoine technique et industriel. Elle a publié entre autres : *L'Automobile, son monde et ses réseaux* (PUR, 1998) ; *Mine et Métal. Les non-ferreux et la révolution industrielle* (PUR 1998) ; *Démolition, disparition, déconstruction. Approches techno-économiques et anthropologiques* (CNAM 2002, en coll. avec P. Smith, G. Delhumeau et A. Monjaret) ; *Entre l'État et l'usine. L'école des Mines de Saint-Étienne*

au XIX^e siècle (PUR, 2004) ; *L'imaginaire et la pensée technique. Une approche historique, XVI^e-XX^e siècles* (Cl. Garnier, 2012).