

Mme Ch. Ferdinand

Publications de
l'INSTITUT de RECHERCHES de la SIDÉRURGIE
(IRSID)

185, Rue Président-Roosevelt, SAINT-GERMAIN-EN-LAYE (S.-&-O.)

L. COCHE

Chef du Service "Minerais"

L'ENRICHISSEMENT DES MINERAIS DE FER DE LORRAINE

Extrait de la "Revue de l'Industrie Minérale"

Septembre 1952, 33, n° 584, p. 685-698



SÉRIE A — N° **44** — OCTOBRE 1952

AVANT - PROPOS

Entre la date de rédaction de cette étude sur l'enrichissement des minerais de fer de Lorraine et celle à laquelle elle a pu être imprimée et diffusée, les essais ont été poursuivis et les idées de l'Auteur ont légèrement évolué sur quelques points.

Signalons que des essais de séparation magnétique à haute intensité, effectués sur un séparateur à rotor induit de construction allemande, notablement différent de celui dont nous disposons à Saulnes, ont donné des résultats bien meilleurs; quatre opérations en cascade permettent d'arriver très près de l'enrichissement "optimum". Il est donc possible que cette méthode d'enrichissement soit rentable dès maintenant, dans certains cas.

D'autre part, en dehors des procédés d'enrichissement par voie physique, il faudrait citer les procédés chimiques ou métallurgiques, dont nous ne parlons pas dans notre étude. Parmi eux, le procédé Renn semble pour le moment le plus intéressant. C'est le seul, en tout cas, qui ait déjà été appliqué à l'échelle industrielle; l'IRSID a fait faire à Kraluv Dvur (Tchécoslovaquie), en 1949, un essai de marche industrielle, dans lequel on a consommé 300 t de minerai lorrain siliceux (couche L4 de Bazailles). Considéré à cette époque comme beaucoup trop coûteux pour être rentable en France, le procédé Renn reprend maintenant de l'intérêt en raison de l'évolution des conditions économiques (prix relatifs des ferrailles et de la fonte notamment). Plusieurs pays (Afrique du Sud, Espagne) installent des fours Krupp-Renn; la mise au point de nouveaux procédés de désulfuration permettra peut être de consommer directement à l'aciérie le métal produit, auquel cas ce procédé serait certainement intéressant pour traiter certains minerais très siliceux de Lorraine ou d'autres mines françaises.

L. COCHE .

ERRATUM

Annexe II, page 14, 2ème ligne du tableau, au lieu de :

"Maron-Val-de-Fer, ensemble de la couche supérieure et de la couche moyenne (avec l'intercalaire)",

lire,

"Maron-Val-de-Fer, ensemble de la couche inférieure et de la couche moyenne (avec l'intercalaire)".

L'enrichissement des minerais de fer de Lorraine

par M. L. COCHE,
Ingénieur en chef des Mines,
ingénieur au Service Minerais de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie

La structure des minerais de fer de Lorraine a fait l'objet de nombreuses études (1) ; bien qu'elles soient loin d'avoir épuisé le problème (par exemple, il reste encore bien des points à préciser sur la nature des silicates phylliteux ferrifères), on peut dire que cette structure est maintenant bien connue.

Quatre minerais typiques (siliceux et calcaires, chloriteux et non chloriteux), ont été l'objet d'études approfondies, menées avec des moyens d'investigation très variés. Des examens plus sommaires, utilisant seulement les méthodes entrées dans la pratique courante, ont porté sur toutes les couches de chacun des treize principaux sous-bassins déterminés par Bichelonne et Angot.

★

On cherche à enrichir les minerais en conservant les minéraux les plus riches en fer, et en éliminant ceux qui n'en contiennent pas. Parmi les éléments stériles, la silice est particulièrement gênante : il faut, en effet, une proportion déterminée de chaux et de silice, pour qu'il se forme dans le haut fourneau un laitier fusible, et les minerais de fer ont généralement beaucoup trop de silice par rapport à la chaux qu'ils contiennent (2).

(1) Citons notamment l'ouvrage de Bichelonne et Angot « Le bassin ferrifère de Lorraine », les études sur l'enrichissement des minerais de fer de M. Louis Boileau (que l'IRSID vient de faire reproduire en tirage limité), les diverses notes de M. Orcel et Mlle Caillère (du Muséum d'Histoire Naturelle) et celles de Mlle Deudon, du Service Minerais de l'IRSID.

Pour la simplicité de l'exposé, nous négligerons ce problème de la basicité et nous admettrons qu'un concentré est d'autant plus intéressant pour les sidérurgistes qu'il est plus riche en fer.

★★

Les procédés d'enrichissement proprement dits se réduisent finalement à un broyage du minerai, suivi d'un tri séparant les grains ainsi formés en deux catégories : le concentré, contenant les grains les plus riches, le stérile contenant les plus pauvres.

Comme le broyage ne libère pas complètement les minéraux, on n'atteint jamais l'enrichissement idéal, qui classerait dans le concentré tous les minéraux ferrifères et dans le stérile toute la gangue.

On voit facilement que pour un minerai donné, broyé dans des conditions déterminées, il y a une limite que l'enrichissement ne peut dépasser. Si l'on classe, en effet, tous les grains par valeur décroissante de la teneur en fer, on ne peut faire de meilleur enrichissement qu'en réalisant une coupure dans la série ainsi formée. On peut donc parler d'un enrichissement optimum, ou plus exactement d'une série d'opérations dépendant d'une variable, qui constituent les enrichissements optima. La proportion de concentré et de stérile,

(2) Beaucoup de minerais lorrains font exception — c'est leur principal avantage. Mais il ne faut pas oublier que les réserves de minerais lorrains calcariés s'épuisent environ deux fois plus vite que celles des minerais siliceux.

et les propriétés de ces deux fractions, dépendent d'une variable unique qui fixe la position de la coupure.

Par exemple, la notion d'enrichissement optimum peut se traduire par une relation liant la teneur en fer du concentré (et du stérile) au rendement en fer, c'est-à-dire à la proportion du fer qu'on récupère dans le concentré (fig 1). Dans de nombreux cas, il est plus commode d'exprimer les rendements en éléments nuisibles (silice et chaux) en fonction du rendement en fer (fig 2).

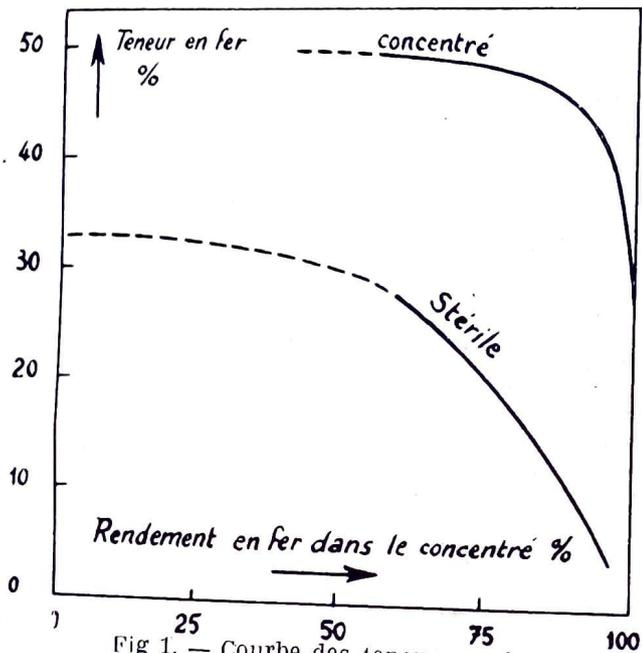


Fig 1. — Courbe des teneurs en fer (minerai broyé à 0,589 mm)

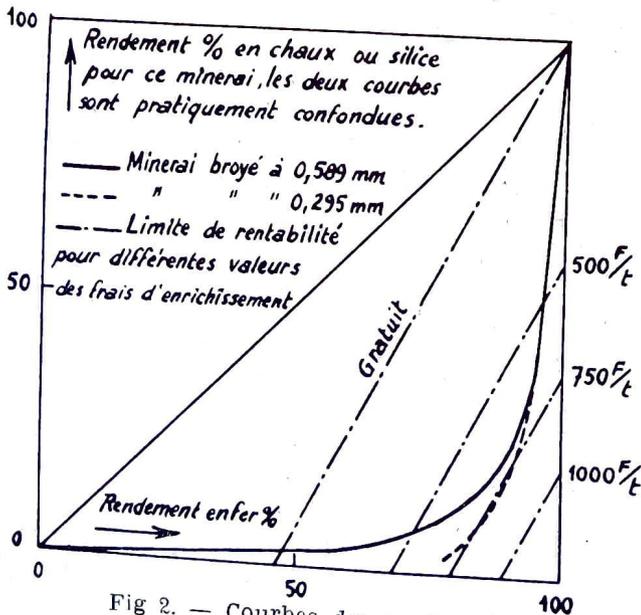


Fig 2. — Courbes des rendements

Bien entendu, plus fin est le broyage, meilleure est la libération des constituants et meilleurs sont les résultats de l'enrichissement optimum. La courbe en pointillé de la fig 2 donne un exemple de cette amélioration des résultats.

**

La détermination des courbes d'enrichissement optimum présente un grand intérêt pratique, elle évite des tâtonnements. Elle permet de se faire très vite une idée sur la rentabilité de l'enrichissement de chaque minerai, et de déterminer la partie de la courbe où il est le plus avantageux de se placer (c'est-à-dire la proportion de stérile qu'on doit éliminer).

Nous ne pouvons nous étendre longuement sur ces études de rentabilité : en en trouvant un bref résumé en annexe. Indiquons seulement qu'à partir des prix de revient du haut fourneau consommateur, on peut déterminer des relations entre le rendement en fer et le rendement en (silice + chaux) correspondant à une rentabilité limite, pour chaque valeur de la dépense d'enrichissement. Dans le diagramme des rendements (voir fig 2), ces relations sont linéaires. Nous avons représenté sur la figure les droites correspondant à une rentabilité limite pour 500, 750 et 1 000 fr de frais d'enrichissement par tonne de minerai brut : on voit qu'il faut (si l'on admet qu'on réalise un enrichissement parfait) que la séparation coûte moins de 730 fr par tonne traitée pour être rentable. On voit, en outre, qu'il y a intérêt à obtenir un rendement en fer de 90 %, ce qui correspond à l'élimination dans le stérile de 38 % du poids de produit traité.

Pour d'autres minerais (la couche siliceuse de Moulaine, par exemple), on s'aperçoit de la même façon que l'enrichissement devrait coûter moins de 180 fr par tonne traitée, ce qui montre qu'il est inutile de faire aucun essai de séparation par voie purement physique. C'est le cas pour un bon nombre de minerais de Lorraine.

D'autre part, quand on fait une expérience sur un appareil industriel, il est intéressant de la comparer à l'enrichissement optimum pour les mêmes conditions de broyage. Cela permet en effet de discriminer, dans l'imper-

fection des résultats, ce qui provient de l'appareil et ce qui tient à la nature du minerai.

Au lieu de classer les grains par teneur en fer décroissante, on peut aussi les classer suivant une autre propriété, celle utilisée par l'appareil de séparation : par exemple, si l'on étudie la séparation magnétique à haute intensité, on classe les grains par valeur décroissante du coefficient d'aimantation. On n'obtient pas ainsi l'enrichissement optimum, mais le meilleur des enrichissements qu'on puisse obtenir en utilisant, pour la séparation, les propriétés paramagnétiques des minéraux : c'est, en somme, l'enrichissement magnétique optimum.

★★

Pratiquement, il n'est pas possible de déterminer de façon rigoureuse les courbes d'enrichissement optimum. On ne dispose, en effet, d'aucun moyen pour ranger les grains par teneur en fer décroissante, de façon parfaite.

Dans le cas des minerais de fer de Lorraine, il se trouve que les minéraux sont d'autant plus riches en fer qu'ils sont plus lourds. On peut donc, en rangeant les grains par densité, obtenir un « enrichissement gravimétrique optimum » qui réponde sensiblement à l'idéal. Tant que les produits sur lesquels on travaille ne contiennent pas une proportion trop importante de particules inférieures à 0,1 mm, la séparation faite au laboratoire avec des liqueurs denses réalise, surtout si l'on utilise une centrifugeuse, un classement par densité quasi-parfait. C'est ainsi que nous avons opéré pour déterminer les caractéristiques d'enrichissement optimum d'une cinquantaine de minerais de Lorraine (1).

Ces courbes d'enrichissement optimum, complétées par les études minéralogiques et chimiques, constituent ce que nous appelons le « catalogue » du bassin lorrain. Même si les études sur l'enrichissement devaient être arrêtées, ce catalogue resterait un document de base utilisable si l'on reprenait d'autres essais plus tard.

(1) Nous n'avons dressé systématiquement ces courbes que pour le minerai broyé à 28 mesh (0,589 mm) : cela correspond en effet sensiblement à la libération des colithes.

Bien que ce catalogue ne soit pas achevé, nous pouvons donner des indications générales sur les résultats qu'il traduit.

Pour comparer, au point de vue de l'enrichissement, les différentes couches des différents bassins et sous-bassins, nous avons rassemblé en annexe, pour deux valeurs du rendement en fer (80 et 90 %) les teneurs des concentrés et des stériles, les rendements en silice et en chaux, et, quand elle a été déterminée, la proportion de silice présente sous forme de quartz.

On remarque que la chaux s'élimine mieux que la silice, dans presque tous les minerais.

Le minerai L4-L5 de Mont-Saint-Martin est le plus facile à enrichir ; comme il se trouve être très pulvérulent, l'enrichissement à la dimension de l'oolithe peut se faire sur les fines sans que les frais d'agglomération se trouvent augmentés pour autant. Le minerai est très siliceux, et situé dans un bassin où les minerais calcaires sont pauvres et rares. Dans l'ensemble du bassin lorrain, c'est le cas le plus intéressant au point de vue de la concentration par voie physique.

La couche rouge d'Ottange II est, elle aussi, très favorable à l'enrichissement : mais le minerai est si pauvre et siliceux au départ qu'il n'est pas exploité et qu'il reste inexploitable, même compte tenu des possibilités d'enrichissement.

Viennent ensuite les minerais de La Mourière (couche noire et couche verte), Moulaine (calcaire L1-L2), Boulange (couche grise), Micheville (calcaire pauvre), Giraumont (couche rouge et couche grise), Roncourt (couche grise), Joeuf (couche rouge).

Mais dans tous les cas, les frais de broyage à la dimension de l'oolithe et surtout d'agglomération des fines ainsi produites sont tels que l'enrichissement ne pourrait être appliqué qu'aux fines produites par un concassage industriel et envoyées à une installation d'agglomération.

★★

Ce n'est pas seulement la composition chimique qui détermine la valeur d'utilisation d'un minerai de fer au haut fourneau : ses

propriétés physiques ont une grande importance, et en particulier sa composition granulométrique. Avec des minerais en morceaux bien calibrés, de l'ordre de 50 à 100 mm, les charges descendent bien, les gaz se distribuent uniformément dans la cuve, et la consommation de coke est beaucoup plus basse qu'avec un minerai tout-venant. On peut admettre que le remplacement d'un minerai lorrain tout-venant 0/250 mm, contenant 12 % de 0/10 mm, par un minerai de même composition chimique, mais calibré 50/80 mm, économise autant de coke qu'une augmentation de 5 points de teneur en fer (remplacement d'un minerai à 30 % par un minerai à 35 %). La dépense de coke, qui représente plus de la moitié du prix de revient de la fonte, est réduite de 15 %.

Il n'est pas bon de charger au haut fourneau des morceaux plus fins que 5 mm ; aussi les agglomère-t-on, à moins que l'on considère que le prix de revient de l'agglomération soit trop élevé, comparé aux inconvénients de la marche en minerai fin : cette question fait encore l'objet de controverses entre techniciens compétents. Toujours est-il admis que 5 mm correspond à la limite au-dessous de laquelle le minerai n'est plus utilisable au haut fourneau sans de graves inconvénients. Si donc un procédé d'enrichissement fournit un concentré fin, la valeur d'usage de ce concentré est fortement amoindrie par sa finesse.

La libération des oolithes exige un broyage à 0,6 mm environ. On ne gagne pas grand'chose, au point de vue des possibilités d'enrichissement, en broyant jusqu'à 0,1 mm, dimension extrême au-dessous de laquelle les séparations deviennent difficiles en marche industrielle. Il est donc raisonnable d'étudier l'enrichissement des minerais lorrains à deux dimensions :

— à la finesse de l'oolithe (0/0,5 mm), pour avoir des concentrés fins mais riches ;

— à la limite tolérée par le haut fourneau (plus de 5 mm) pour avoir des concentrés moins riches, mais utilisables sans agglomération.

**

Ce second problème est celui de l'épierrage : dans des couches où le bon minerai est barré par des passées stériles, on peut obtenir, sans broyage fin, un enrichissement appréciable.

C'est un cas rare en Lorraine. Habituellement, les rognons ou passées calcaires qu'on abat avec le minerai sont encore trop riches (15 à 20 % de fer) pour qu'il soit rentable de les séparer. Nous avons effectué des essais d'épierrage aux liqueurs denses, au laboratoire, sur le minerai de la couche grise de Havange, minerai bien connu comme étant barré par des zones calcaires très blanches, contenant très peu de fer.

Les fig 3 et 4 indiquent les résultats obtenus. Par cette opération de laboratoire, séparant mieux qu'aucun appareil industriel, on a

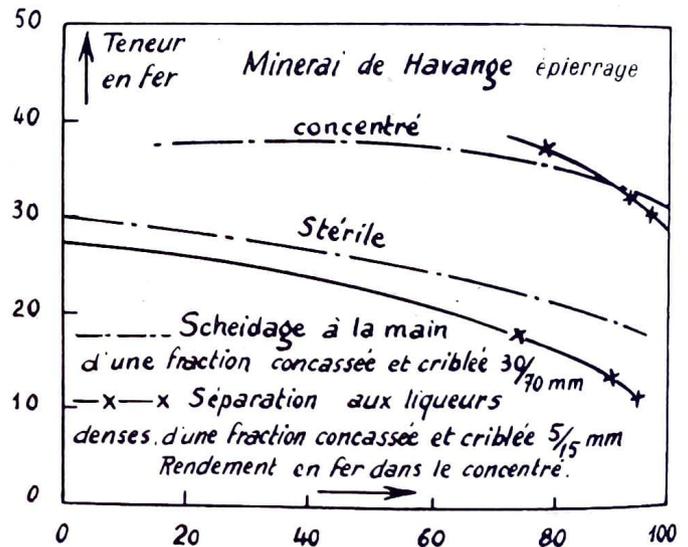


Fig 3

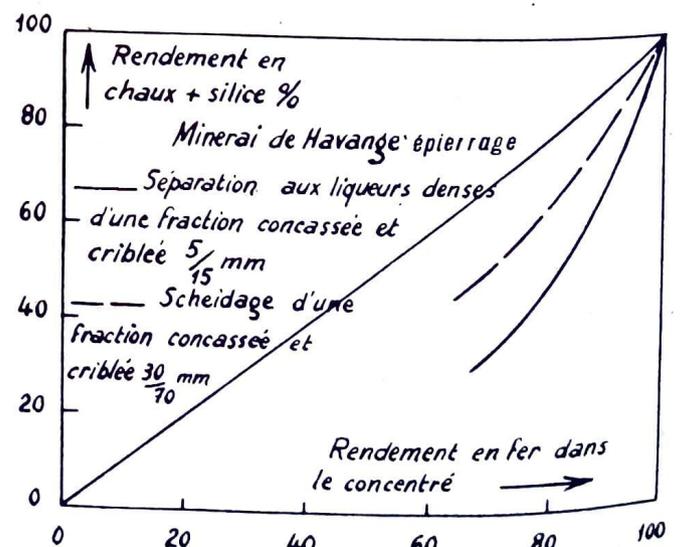


Fig 4

pu éliminer seulement 35 % de la gangue en sacrifiant 10 % du fer. Nous ne pensons pas qu'une telle opération puisse être économique.

A fortiori, pour les autres minerais lorrains tels qu'ils sont actuellement exploités, l'épierreage ne peut être rentable.

★★

Nos essais d'enrichissement à la dimension de l'oolithe ont porté presque exclusivement sur le minerai de Mont-Saint-Martin. C'est, en effet, celui qui donne les meilleures courbes d'enrichissement optimum ; il est très siliceux, et l'élimination de la silice présente un intérêt particulier pour les usines du bassin de Longwy, qui sont loin des minerais calcaires ; enfin, c'est un minerai pulvérulent, de sorte que le broyage à 0,5 mm n'augmente pas beaucoup les difficultés provenant de sa composition granulométrique, alias les frais d'agglomération.

Nous avons éliminé a priori les procédés de séparation en milieu humide, par crainte de la formation de boues entraînant une grande partie du fer sous une forme ne permettant pas de la récupérer, et aussi parce que les usines du bassin de Longwy manquent d'eau (1).

Cependant, ces arguments ne sont pas décisifs et le perfectionnement des méthodes de traitement par milieux denses augmentera peut-être les chances de succès d'essais dans ce domaine.

La séparation pneumatique n'a donné lieu qu'à des essais tout à fait préliminaires. On ne traite pas, habituellement, de produits aussi fins, et il faut adapter les tables de lavage à ce problème un peu spécial.

Le magnétisme étant une propriété physique spécifique du fer (et de quelques autres métaux peu abondants dans les minerais lorrains), il était tout naturel d'essayer d'en tirer parti pour trier les oolithes : la séparation magnétique peut se faire sur le minerai cru, avec une très forte intensité puisque les minéraux contenant le fer dans les minerais

lorrains (limonite, sidérose, silicates) sont très faiblement magnétiques ; elle peut aussi se faire à basse intensité après grillage magnétisant, les minéraux ferrifères étant alors transformés en magnétite Fe_3O_4 ou en oxyde de Malaguti $Fe_2O_3 \gamma$, tous deux fortement ferromagnétiques.

La séparation magnétique à haute intensité, sur les appareils à rotor lamellé, est peu coûteuse, mais elle donne des résultats très inférieurs à ce qu'on peut espérer (enrichissement optimum) (2). D'autres appareils (à disques) séparent mieux mais leur débit est faible. Le grillage magnétisant par fluidisation, suivi de séparation magnétique à basse intensité donne des résultats quasi-parfaits (égaux à l'optimum théorique) : mais il coûte cher. Les calculs de rentabilité montrent qu'on arrive, par tous ces procédés, au voisinage de l'équilibre : l'économie sur les frais d'exploitation permettra peut-être d'amortir les installations, mais assez lentement. Etant donné l'imprécision de calculs de ce genre, il faudra construire un atelier-pilote pour préciser ces indications.

★★

Des essais de broyage sélectif ont été également effectués ; leurs résultats sont également reportés (fig. 5) : on voit qu'il n'est pas possible, seulement par broyage et tamisage, d'obtenir un enrichissement rentable.

★★

Quel que soit le mode de traitement, la présence dans le produit broyé de particules très fines (moins de 0,100 mm) gêne beaucoup. Ces particules ne s'enrichissent pas facilement ; il faut ou bien les rejeter, ce qui donne une perte en fer importante, ou bien les ajouter au concentré, ce qui diminue sa teneur.

Il est donc essentiel de conduire la préparation du minerai (concassage, séchage et broyage) de façon à produire peu de grains très fins.

Il faut aussi chercher à les enrichir malgré leur finesse ; comme la séparation magnétique à basse intensité permet, surtout dans l'eau,

(1) En réalité, des essais ont été menés au laboratoire de Tuscaloosa du Bureau of Mines des Etats-Unis. Les résultats (publications IRSID, série A, n° 18, avril 1950) n'ont pas été très encourageants.

(2) Les fig 5 et 6 permettent de comparer les différents procédés.

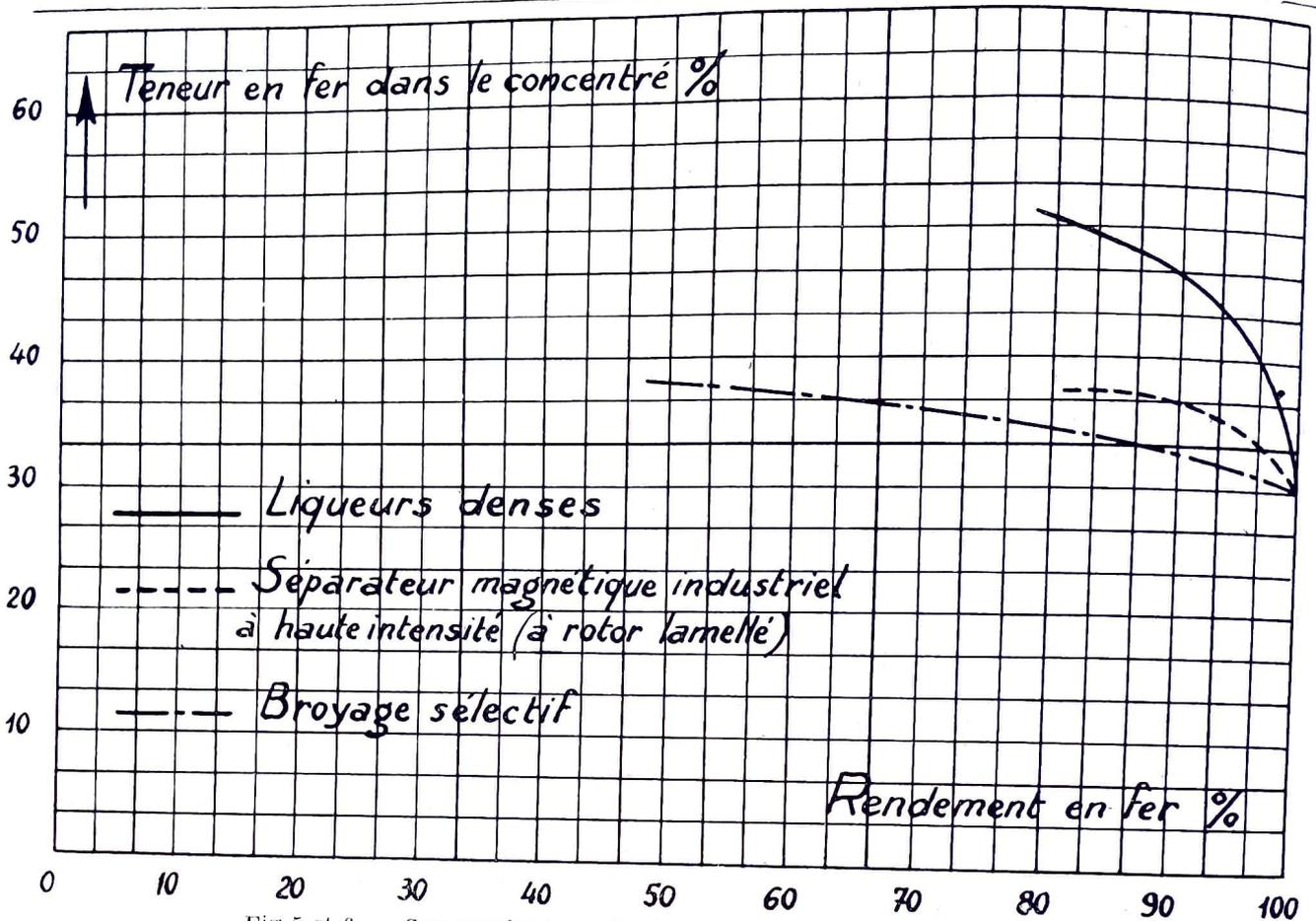
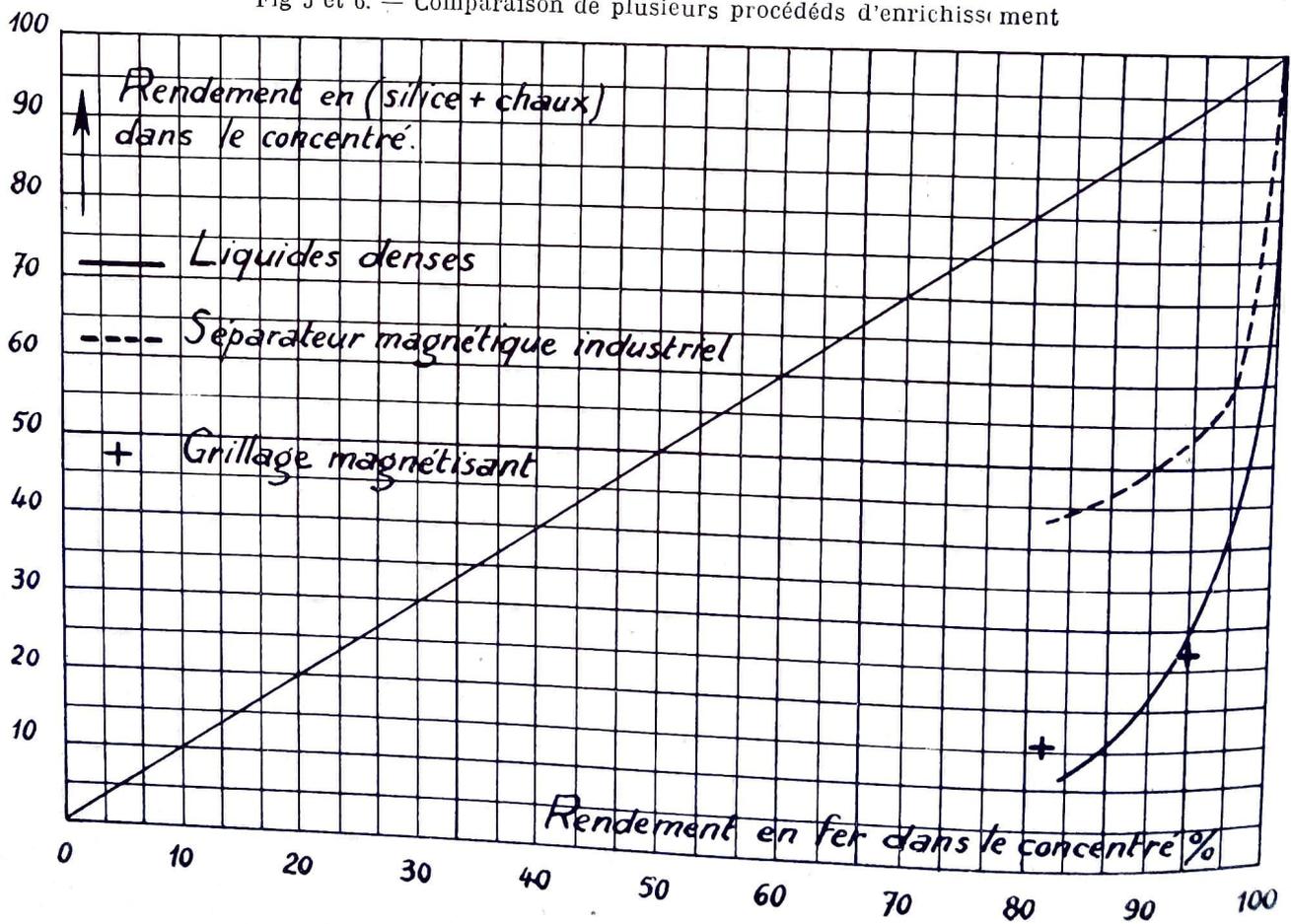


Fig 5 et 6. — Comparaison de plusieurs procédés d'enrichissement



de trier des grains très fins, c'est dans le domaine du grillage magnétisant qu'il faut pousser les études.

L'agglomération de ces particules inférieures à 0,100 mm est difficile, par les procédés classiques de cuisson sur grille. C'est un autre problème intéressant pour la France, auquel beaucoup de chercheurs étrangers se sont déjà attaqués. La fabrication d'agglomérés par cuisson en boulettes (« pellets ») se développe très vite en Suède; elle permettra sans doute, dans un proche avenir, d'utiliser commodément les concentrés très fins.

★★

Si nous cherchons, pour terminer, à nous faire une idée sur la possibilité d'enrichir industriellement les minerais lorrains, nous devons constater qu'il n'est pas évident que cet enrichissement soit actuellement rentable même dans les cas les plus favorables. C'est vrai tout au moins pour les minerais consommés par les usines de Lorraine, proches des mines.

Connaissant le développement rapide des installations d'enrichissement dans certains pays étrangers (Suède, États-Unis et Allemagne notamment), on peut être surpris de cette conclusion, et se demander si c'est par l'imperfection de nos techniques qu'il faut expliquer notre retard.

Nous ne le pensons pas : une même technique d'enrichissement est d'autant mieux applicable qu'elle s'applique à des produits plus coûteux; tant que les mines du bassin de Briey extraieront d'excellents minerais calcaires à 900 fr la tonne, les concentrés produits par les mines moins favorisées ne pourront lutter contre cette concurrence.

Les conditions sont bien différentes dans les autres pays. Aux États-Unis, par exemple, le prix des minerais, rendus à l'usine, représente couramment 50 à 60 % du prix de revient de la fonte (au lieu de 30 % en France). Les minerais suédois sont exportés et transportés sur de longues distances : leur enrichissement

permet de réaliser sur les frais de transport une économie qui s'ajoute à celles qu'on peut faire sur la consommation de coke et les frais de fabrication (les seules qui justifient, en Lorraine où les transports sont courts, la concentration des minerais).

Enfin, les minerais étrangers ont une gangue généralement très siliceuse; il faut leur ajouter des fondants calcaires. L'enrichissement permet de diminuer ces additions, ce qui contribue à augmenter la teneur en fer du lit de fusion global. C'est particulièrement sensible en Allemagne. En France, au contraire, nos minerais sont suffisamment calcaires pour que l'on n'emploie pour ainsi dire pas de castine dans tout le bassin lorrain.

Il est probable que les conditions d'exploitation évolueront et qu'on attribuera dans l'avenir une plus grande valeur à nos minerais calcaires riches, dont les réserves s'épuiseront vite. Comme, en même temps, les techniques d'enrichissement progresseront, on peut prévoir que dans dix ou vingt ans certains minerais de Lorraine seront déjà vendus sous forme de concentrés.

D'autre part, les échanges entre pays européens se développeront sans doute de plus en plus. Il est vraisemblable que les exportations de minerais lorrains augmenteront : mieux vaut exporter des concentrés riches que des minerais tout-venants.

Ces considérations justifient largement, à notre avis, la poursuite d'études dans ce domaine.

★★

Les travaux dont nous avons rappelé sommairement les résultats essentiels sont une œuvre collective. Nous tenons à remercier très vivement les dirigeants de l'IRSID qui nous ont permis de les entreprendre, les ingénieurs de sociétés minières et sidérurgiques qui nous ont apporté leur précieux concours, et tout le personnel du Service Minerais de l'IRSID qui a si joyeusement accompli la part la plus ingrate du travail.

L. COCHE.

ANNEXE I

RENTABILITE DE L'ENRICHISSEMENT

Exposé sommaire des méthodes appliquées et résumé des principaux résultats

Valeur d'un minerai enrichi

Les usines lorraines sont souvent alimentées en deux minerais, un calcaire et un siliceux, qui constituent la base de leur approvisionnement. Dans ce cas, on peut calculer la valeur d'utilisation d'un troisième minerai par rapport aux deux premiers. On trouve une expression de la forme

$$V = a - b \cdot L + c \cdot C \quad (1)$$

avec

V = valeur de la tonne de fer contenue dans le minerai,

L = rapport (silice + chaux)/fer,

C = rapport (chaux — 1,4 silice)/fer,

$\left. \begin{array}{l} a = \\ b = \\ c = \end{array} \right\}$ coefficients constants pour chaque usine,

L est en somme un indice de pauvreté et C un indice de basicité.

Le coefficient b se calcule à partir du prix de revient de la tonne de fonte : celui-ci peut s'écrire

$$E + M + K + F + S$$

en appelant

E les frais d'enfournement (prix d'achat des matières chargées autres que le coke) ;

M les frais proportionnels au poids de minerai consommé ;

K les frais proportionnels au poids de coke consommé et les frais constants par jour de marche ;

F les frais proportionnels au poids de fonte produite ;

L les frais proportionnels au poids de laitier produit.

Le coefficient b est donné par

$$b = 0,5 \cdot M + 0,45 \cdot K + 1,35 \cdot S$$

Les coefficients a et c se calculent en écrivant l'équation (1) dans le cas des deux minerais de base, dont le prix est connu.

Rentabilité de l'enrichissement

Dans certaines usines du bassin lorrain, le terme c . C est faible et peut être négligé. La formule (1) se réduit alors à

$$V = a - b L \quad (2)$$

Une opération d'enrichissement, caractérisée par son rendement en fer R et son rendement en (silice + chaux) R', transforme un poids de minerai brut contenant une tonne de fer, valant donc

$$V_0 = a - b L_0$$

en un poids de concentré contenant R tonne de fer, et valant par conséquent

$$V = (a - b L) \cdot R$$

L'enrichissement coûtant T francs par tonne de minerai brut traité, contenant une proportion H₀ d'humidité et titrant F₀ de fer sur sec, il coûtera par tonne de fer contenu dans le minerai brut

$$\frac{T}{(1 - H_0) \cdot F_0}$$

Compte tenu de la définition des rendements, c'est-à-dire

$$R' = \frac{R \cdot L}{L_0}$$

on obtient sans difficulté la relation entre R et R' correspondant à un bénéfice nul, pour des frais d'enrichissement T par tonne de minerai brut

$$a R - b L_0 R' = a - b L_0 + \frac{T}{(1 - H_0) \cdot F_0} \quad (3)$$

La relation entre R et R' est linéaire ; nous avons tracé sur la figure 2, pour le minerai de Mont-Saint-Martin, les droites correspondant à trois valeurs de T. Ces droites sont parallèles, et leur distance à la « droite d'enrichissement gratuit » (qui passe toujours par l'angle supérieur droit du diagramme) est proportionnelle à T.

L'utilisation des diagrammes « teneurs-rendements » (figure 1) est moins commode. D'abord, on est obligé de supposer une relation entre la teneur en fer et la teneur en (silice + chaux). Ensuite, les courbes de rentabilité sont des hyperboles, dont le tracé n'est pas commode.

Les calculs sont un peu moins simples dans le cas où le facteur de basicité c . C ne peut être négligé, dans la formule (1) donnant la valeur du minerai enrichi. On peut cependant le conduire de la façon suivante.

L et C sont deux fonctions linéaires et homogènes par rapport aux rapports

$$\begin{aligned} Q &= \text{silice/fer} \\ P &= \text{chaux/fer.} \end{aligned}$$

L'expression

$$- b \cdot L + c \cdot C$$

peut donc s'écrire

$$- d \cdot (e Q + f P)$$

d, e, f se calculant à partir de b et C. On peut prendre e et f de façon que $e + f = 1$.

Cela fait, on peut poser

$$G = e Q + f P$$

et la formule donnant la valeur du minerai se met sous la forme

$$V = a - d G \quad (4)$$

analogue à l'équation (2). Le calcul se poursuit donc exactement de la même façon : il suffit d'appeler R' non plus le rendement en

silice + chaux

mais le rendement en

e . silice + f . chaux

On peut tracer, sur le diagramme des rendements, la courbe donnant R' en fonction de R, et les droites de rentabilité, et voir ainsi sans difficulté la dépense maximum admissible.

ANNEXE II

ESSAIS D'ENRICHISSEMENT OPTIMUM
Résumé des résultats acquis jusqu'ici par broyage à 0,589 mm
et séparation aux liqueurs denses

Mines et couches	Analyse sur sec % (1)				Rendement dans le concentré %			Teneur en fer %		Proportion % quartz/silice totale	Observations
	Fe	SiO ₂	CaO		Fe	SiO ₂	CaO	Concentré	Stérile		
BASSIN DE LONGWY											
Mont-St-Martin L4-L5	32,2	22,3	9,5		90	20,6	11,2	47,3	10,0	67	Minerai très enrichissable, contient peu de silicates et du quartz en gros grains.
Moulaine L1-L2	25,4	11,5	21,3		80	11,0	2,8	50,5	6,6	55	Minerai enrichissable ; plus de la moitié de la silice est sous forme de quartz libre.
Moulaine L4-L5	34,5	20,0	5,3		90	22,0	7,0	46,7	9,4	35	Minerai difficile à enrichir, il contient beaucoup de silicates et du quartz en grains fins.
Micheville calcaire pauvre	18,1	7,3	31,8		80	60,0	58,5	39,0	17,8		La calcite et la silice s'éliminent relativement bien.
Micheville siliceux pauvre	19,0				90	32,0	40,5	42,2	20,5		L'enrichissement obtenu par ces essais (d'ailleurs incomplets) est médiocre.
Micheville siliceux normal	27,7				80	45,0	30,0	33,0	3,5		Celui obtenu sur le minerai « normal » est assez mauvais.
Bazailles L5	31,1	25,1	3,3		90	25,0	7,5	43,5	5,5		Dans ce minerai très siliceux, la silice ne s'élimine que passablement. Comme elle est pourtant en majorité sous forme de quartz, il est probable que celui-ci est en grains fins. L'examen minéralogique permettra de s'en rendre compte.

N.B. — Ce tableau doit être considéré comme provisoire : les renseignements sur l'enrichissement des minerais lorrains seront complétés et précisés par un certain nombre d'études actuellement en cours.

(1) Sauf rares exceptions, les minerais lorrains contiennent environ 10 % d'humidité.

Minés et couches	Analyse sur sec % (1)		Rendement dans le concentré %		Teneur en fer %		Proportion % quartz/silice totale	Observations		
	Fe	SiO ²	CaO	Fe	SiO ²	CaO			Concentré	Sterile
Ottange II couche rouge siliceuse	25,8	42,52	4,0	90	22,5	42,0	30,5	6,0	La silice, en gros grains de quartz, s'élimine parfaitement. La calcite s'élimine bien, elle aussi, il y en a d'ailleurs très peu. C'est en somme un minerai techniquement très apte à l'enrichissement.	
				80	6,5	6,5	47,5	9,0		
Ottange II jaune sauvage	24,0	8,9	24,3	90	55	36,0	35	6,2	Minerai très médiocre au point de vue de l'enrichissement. La calcite se sépare imparfaitement, et la silice, peu abondante, doit être principalement sous forme de silicates.	
				80	32,5	12,1	42,5	8,7		
Boulangé couche grise (résul. prov.)	31,0	8,5	18,8	90	37,5	11,5	48,0	7,5	La calcite s'élimine très bien, et la silice convenablement (les 2/3 sont sous forme de quartz).	
				80	23,0	3,0	50,4	12,2		
Angevillers couche grise	31,8	6,68	17,7	90	66,1	15,1	44,5	9	Ce minerai s'enrichit bien par élimination de calcite, mais la silice est en majeure partie combinée au fer et s'élimine mal.	
				80	44,2	5,2	47,7	14		
Sainte-Barbe jaune sauvage	37,3	6,1	13,1	90	68,5	32,5	44,8	15,0	La silice et la chaux s'éliminent mal.	
				80	58,5	27,5	45,2	22,2		
La Mourière couche grise	32,5	8,6	15,9	90	60,2	35,1	40,5	11,2	Minerai médiocre au point de l'enrichissement. La calcite se sépare imparfaitement et la silice assez mal.	
				80	39,1	14,0	45,0	15,0		
La Mourière couche noire	38,7	17,4	5,0	90	27,5	35,1	45,7	16,5	La calcite, peu abondante, s'élimine imparfaitement, mais la silice très bien. Elle est surtout sous forme de quartz en grains assez gros.	
				80	20,2	28,6	46,6	18,5		

(1) Sauf rares exceptions, les minerais lorrains contiennent environ 10 % d'humidité.

Mines et couches	Analyse sur sec % (1)				Rendement dans le concentré %			Teneur en fer %		Proportion quartz/silice totale	Observations
	Fe	SiO ²	CaO	%	Fe	SiO ²	CaO	Concentré	Stérile		
BASSIN D'OTTANGE — LANDRES — TUCQUEGNIEX (suite)											
La Mourière marnes au mur de couche noire	18,8	50,6	12,1		90	65	90,5	21,5	11,7		Tant qu'on travaille à des dimensions de l'ordre de l'oolithe, il n'y a aucun espoir de concentrer ces marnes, par des séparations purement physiques. Un examen minéralogique a d'ailleurs montré que ces marnes contenaient très peu d'oolithes de limonite, principalement des silicates, et du quartz en partie sous forme de grains très fins.
					80	59	82,5	23,5			
La Mourière couche verte	34,5	24,8	4,3		90	39,0	48,0	42,5	12,6		La silice s'élimine bien (l'examen minéralogique a montré que les grains de quartz étaient à peu près aussi gros que les oolithes) ; la calcite, peu abondante, s'élimine mal.
					80	20,5	27,0	46,5	17,0		
Tucquegnieux couche grise	35,65	5,63	15,22		90	74	17,6	47,1	11,0	25	La calcite s'élimine bien et la silice presque pas (elle est en quasi-totalité sous forme de chlorites).
					80						
Anderny Sud I couche grise	33,4	9,05	14,1		90	71,0	17,5	43,25	11,2		Le calcite s'élimine bien et la silice très mal.
					80	52,0	10,0	45,3	16,2		

(1) Sauf rares exceptions, les minerais lorrains contiennent environ 10 % d'humidité.

Mines et couches	Analyse sur sec % (1)		Rendement dans le concentré %		Teneur en fer %		Proportion % quartz/silice totale	Observations	
	Fe	SiO ₂	CaO	Fe	SiO ₂	CaO			Concentré
Roncourt couche rouge	39,7	5,6	11,5	90	60,4	40	46,5	17,1	L'élimination de la silice est mauvaise et celle de la calcite très médiocre.
				80	42,2	20,1	49,7	21,9	
Roncourt couche grise	35,5	5,8	16,2	90	72,5	21,5	47,5	11,5	Ce minerai s'enrichit bien par élimination de la calcite. La silice, par contre, se sépare mal.
				80	56,5	11,2	49,6	17,2	
Jœuf couche rouge	33,1	5,8	17,4	90	47,5	13,5	47,3	9,2	La calcite s'élimine très bien et la silice imparfaitement. Comme il y en a peu, ce minerai peut être considéré comme assez facile à enrichir.
				80	39,0	3,7	50,5	14,2	
Jœuf couche jaune	30,7	7,25	18,25	90	65,1	30	40,5	9,5	La silice s'élimine mal, elle est en grande partie combinée au fer. La chaux s'élimine un peu mieux.
				80	45	15,2	44,5	13,75	
Jœuf couche grise	30,35	12,25	15,5	90	60,2	37,6	38,7	10,7	La silice s'élimine assez mal et la chaux pas beaucoup mieux. C'est un minerai médiocre au point de vue de l'enrichissement.
				80	42,4	20,2	42,4	14,9	
Giraumont couche rouge	22,9	13,25	23,6	90	45,2	35,1	34,6	6,0	La silice s'élimine bien — il y en a d'ailleurs les 3/4 sous forme de quartz libre. La chaux s'élimine bien également. Le minerai est relativement apte à l'enrichissement.
				80	23,9	13,2	41,9	8,6	
Giraumont couche grise	36,4	7,5	12,9	90	63,0	17,6	46,3	12,2	Ce minerai s'enrichit très bien par élimination de la calcite. La silice, par contre, est en majeure partie combinée et se sépare assez mal.
				80	48,0	9,0	48,5	17,6	
Moutiers couche jaune	30,4	8,6	17,3	90	66,5	32,5	37,5	10,0	La calcite se sépare imparfaitement sans doute à cause de la chlorite et peut-être de la sidérose à laquelle elle serait associée. La silice, probablement combinée pour la majeure partie, se sépare mal.
				80	46,5	17,0	41,0	14,0	

BASSIN DE L'ORNE

(1) Sauf rares exceptions, les minerais lorrains contiennent environ 10 % d'humidité.

Mines et couches	Analyse sur sec % (1)				Rendement dans le concentré %			Teneur en fer %		Proportion % quartz/silice totale	Observations
	Fe		CaO		Fe	SiO ₂	CaO	Concentré	Stérile		
	10,7	28,0	17,8	17,8							
Maron-Val-de-Fer couche supérieure	10,7	28,0	17,8	17,8	90	65,2	35,1	36,2	8,7		La silice s'élimine mal, la calcite un peu mieux, il ne semble pas intéressant d'enrichir un tel minerai, compte tenu de sa situation géographique.
				80	37,5	12,5	42,5	11,6			
Maron-Val-de-Fer ensemble de la couche supérieure et de la couche moyenne (avec l'intercalaire).	17,1	30,8	12,58	12,58	90	50,9	40,1	38,2	11,1		L'élimination de la silice, seule intéressante pour le bassin de Nancy, est médiocre.
				80	30,2	17,9	43,1	13,9			
Maron-Val-de-Fer couche inférieure seule	12,26	33,8	12,58	12,58	90	65,2	35,0	40,0	12,5		d°
				80	37,5	20,0	43,2	16,5			

BASSIN DE NANCY

(1) Sauf rares exceptions, les minerais lorrains contiennent environ 10 % d'humidité.