

## PELLETISATION DU MINERAI DE FER DE GARA DJEBILET DESTINE A ALIMENTER LE HAUT FOURNEAU

Abdenacer Boucif<sup>1</sup>, Salah Kheraif<sup>2</sup>, L'hadi Atoui<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> Laboratoire de métallurgie et génie des matériaux, Université de Annaba BP12, Annaba 23000, Algérie.

<sup>2)</sup> Direction des Laboratoires Centraux, Complexe Mittal Steel, El-Hadjar, Annaba 23000, Algérie.

Reçu le 05/12/2005 et accepté le 13/06/2007

### ملخص

رُكِّزَت دراسة عملية تحبب خام حديد منجم غار جبيلات (جنوب غرب الجزائر) المخصص لتزويد الفرن العالي على نقطتان: ربط خام الحديد في شكل كريات؛- دراسة التصرف المعدني للكريات في حوض الفرن وهذا باستعمال جهاز نموذجي والموجود بوحدة البحث التطبيقي (ex DRA). خلال عملية التحبب، استعمل خام الحديد ذات نعومة مختلفة، كما استعمل نوعان من الربط: البنتونيت التي تخص الكريات ذو قاعدة قدرها 0.51 و الجير المموه بالنسبة للكريات ذات قاعدة قدرها 1.0 إلى 1.5. في ظروف سير الفرن العالي. درست الخصائص التالية: دليل قابلية الاختزال، الانتفاخ خلال الاختزال والانحلال. ننوي بهذه التجارب صنع أجود الكريات لاستعمالها في الفرن العالي. بينت النتائج أن الكريات المبللة والمسخنة ممتازة من ناحية الحمل المقطعي والتماسك وأيضا مقاومة البري والانتفاخ وهذا بعد تجارب بـ 200 دورة [ميكوم] (tours Micum). الكريات ذات قاعدية 1.5 هي المناسبة.

**الكلمات المفتاحية:** عملية تحبب؛ خام الحديد؛ اختزال؛ انحلال؛ فرن عالي.

### Résumé

L'étude de la pelletisation du minerai de Gara Djebilet destiné à alimenter le haut fourneau (HF) a été axée sur deux points: l'agglomération en boulettes du minerai et le comportement métallurgique des boulettes dans les conditions de la cuve du HF, en utilisant une installation pilote de pelletisation et les fours de simulation industrielle (DRA). Plusieurs finesses de minerai de fer et deux sortes de liants, ont été utilisés: la bentonite pour les boulettes de minerai de fer à basicité 0,51 et la chaux hydratée pour les boulettes à basicité 1,0; 1,5; 2,0. Dans les essais de simulation, les propriétés étudiées sont: l'indice de réductibilité, l'indice de gonflement en cours de réduction et l'indice de désagrégation en cours de réduction. Ces tests servent à déterminer les meilleures boulettes à utiliser du point de vue rentabilité dans le HF. Les résultats obtenus indiquent de bonnes résistances à la compression de boulettes humides et/ou étuvées avec un meilleur indice de gonflement, une excellente résistance à la cohésion et à l'abrasion après 200 tours Micum. Les boulettes de basicité 1,5 sont recommandées pour une alimentation au haut fourneau quoique le cycle thermique correspondant conduit à une productivité moyenne de 25,4 T/m<sup>2</sup> 24 h et une teneur en fer de 55,66 %.

**Mots clés :** pelletisation; minerai de fer; réductibilité; désagrégation; haut fourneau.

### Abstract

The study of Gara Djebilet ore pelitisation to supply blast furnace (BF) was focused mainly on two points: Agglomeration in iron ore pellets and the metallurgical behavior of pellets in the conditions of BF tank, using a pelitisation installation and industrial furnaces. Many values of iron ore finesse and two types of plaints were used. The bentonite for iron ore pellets alkaline of 0.51, and hydrated lime for pellets having alkaline of 1.0, 1.5, 2. Simulation tests in the condition of BF tank, the studied properties are: reduction index (RI), swelling index (SI) and desegregation index during reduction (RDI). These tests serve to determine better pellets to be used from the point of view of profitability in the BF. The obtained results indicate a good compression resistance of humid pellets, a better swelling index, an excellent resistance to cohesion and abrasion after 200 hours Micum. An acceptable resistance index to desegregation during reduction and a sufficient reducibility index, pellets of alkaline of 1.5 are recommended for supplying a BF, although the corresponding thermal cycle leads to average productivity of 25.4T/24h and an iron grade of 55.66 %.

**Key words:** pelitisation; iron ore, reducibility; désagrégation; blast furnace.

Auteur correspondant: atouilhadi@yahoo.fr (L'hadi Atoui)

## 1. INTRODUCTION

La pelletisation est considérée comme une méthode commode et économique d'utilisation des concentrés de minerai de fer, permettant d'obtenir un produit de bonne qualité pour l'alimentation des hauts fourneaux et la fusion dans les fours électriques suite à la contribution des procédés de réduction directe : uniformité de dimensions, bonne résistance mécanique à froid et en cours de réduction, porosité régulière assurant une perméabilité et une réductibilité suffisante.

Le minerai de fer de Gara Djebilet depuis sa découverte en 1952, avec des réserves de 4595 Millions de tonnes et une teneur moyenne en fer de 46,1% a fait l'objet de plusieurs études d'exploitation et de valorisation réalisées et dirigées par l'ORGM, Algérie [1]. Le minerai de fer de Gara Djebilet a été étudié qualitativement et quantitativement [2, 3]. Les différentes analyses chimiques et minéralogiques du minerai de fer tout venant ont été fournies par les différents centres et laboratoires de recherche : l'entreprise de recherche et exploitation minière, l'institut de recherche de la sidérurgie français (IRSID) [3,4] et la Nippon Steel Corporation (NSC) [5], LKAB (Suède) [6] ainsi que par Klockner et Krupp (Allemagne) [7,8].

Notre travail est basé sur l'optimisation du bouletage et du cycle thermique du minerai de fer de Gara Djebilet et les essais de simulation du comportement métallurgique des boulettes sélectionnées préalablement dans les conditions du haut fourneau.

L'optimisation du bouletage du minerai de fer de Gara Djebilet consiste à étudier deux sortes de boulettes : les premières comportant dans leur composition, de la bentonite et les secondes de la chaux hydratée en qualité de liant et moyen de réglage de l'indice de basicité. La recherche d'un cycle de traitement

thermique optimal conférant aux boulettes de Gara Djebilet une bonne qualité physique (compression, cohésion, et abrasion) compte tenu du facteur de production. Ce cycle maximiserait à la fois la production et la résistance mécanique

Le comportement métallurgique des boulettes du minerai de fer de Gara Djebilet dans les conditions de la cuve du haut fourneau est réalisé par des essais de simulation; Les différents tests métallurgiques sont essentiellement : la réductibilité (RI: reduction index), le gonflement en cours de réduction (SI: swelling index) et la résistance à la dégradation en cours de réduction (RDI: reduction desegregation index). Ces essais consistent à étudier et à estimer le comportement des propriétés métallurgiques des boulettes issues du meilleur cycle thermique dit optimal, réalisant le compromis entre la résistance mécanique des boulettes cuites et la productivité du four, lors de leurs passages dans la partie supérieure du haut fourneau.

Les essais sont réalisés à la Direction de la Recherche Appliquée (DRA, Sider) et à l'Ecole Centrale de Paris, France.

## 2. ESSAIS EXPERIMENTAUX

L'étude porte sur un lot de 20 tonnes de minerai de fer de Gara Djebilet tout venant de granulométrie 0-80 mm. Tout le minerai de fer a fait l'objet d'une préparation préliminaire à l'aide d'une installation pilote de concassage et d'homogénéisation d'une capacité de 3T/h. Le minerai est concassé à 10 mm pour diminuer l'énergie et augmenter le rendement de broyage. Quant à l'homogénéisation, grâce à un distributeur de matières par division, elle s'est effectuée en plusieurs passes dans 12 fûts qui sont scellés et stockés pour être repris au fur et à mesure du déroulement des essais. A partir d'un fut choisi par hasard, on a procédé à une seconde homogénéisation manuelle et une

opération de quartage.

L'analyse chimique et granulométrique du lot de minerai de fer destiné aux essais sont indiquées dans les tableaux (1) et (2).

Le minerai de fer homogène est séché dans un séchoir rotatif, jusqu'à un degré d'humidité inférieur à 1%. Le contrôle de l'humidité s'est effectué sur les échantillons de minerai prélevés à la sortie du séchoir toutes les 15 minutes.

Les essais réalisés dans ce travail sont basés sur l'optimisation du bouletage et du cycle thermique du minerai de fer de Gara Djebilet et la simulation du comportement métallurgique des boulettes sélectionnées préalablement dans les conditions du haut fourneau.

Les schémas de description, le mode de fonctionnement et les conditions d'exploitation des différents équipements et installation utilisées sont détaillées dans [9]

**Essais de bouletage.** La conduite des essais de bouletage du minerai de fer de Gara Djebilet a été réalisée en deux phases: essais de broyage et essais de bouletage du minerai de fer de Gara Djebilet utilisant de la bentonite et de la chaux hydratée comme liant et moyen de réglage de l'indice de basicité à des valeurs égales à 1,0; 1,5; 2,0.

- Le minerai de fer de Gara Djebilet est broyé à sec en circuit ouvert dans un broyeur à boulets de 1370 mm de long et de 800 mm de diamètre. La poudre de minerai de fer est criblée à 2 mm grâce à un crible installé à la sortie du broyeur.

Les différentes finesses du minerai de fer sont obtenues par la variation du débit d'alimentation du broyeur de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, et 800 kg/h. Celles-ci sont indiquées dans le tableau (3). Les analyses granulométriques ont été déterminées à l'aide d'un tamiseur à jet d'air. Les surfaces spécifiques ont été déterminées en utilisant un granulomètre basé sur la mesure du diamètre moyen des

poudres selon le principe de la perméabilité à l'air. Les équations mathématiques utilisées pour le granulomètre ont été établies par E.I. Gooden et C.R.M. Smith [9]. Le séchage des échantillons de poudre pour l'analyse granulométrique et la détermination de la surface spécifique a été effectué en utilisant un appareil de mesure de l'humidité par infrarouge.

Les essais de bouletage du minerai de fer de Gara Djebilet ont été réalisés en deux étapes successives: le malaxage des matières dans un mélangeur et le bouletage des matières au disque bouleteur. Le minerai de fer de Gara Djebilet et le liant sont malaxés à sec dans un mélangeur, pendant 10 mn, puis une quantité d'eau est additionnée pour pré humidifier le mélange à un taux d'humidité de 7%. La capacité du mélangeur est de 70–80 Kg environ. Le mélange ainsi humidifié est introduit en continu à l'aide d'une bande transporteuse à partir d'une trémie d'alimentation avec un débit de 100 Kg/h environ dans un disque bouleteur de 0.80 m de diamètre, de 0.18 m de hauteur de rive, tournant à une vitesse de 20 tours par minute et incliné de 47° par rapport à l'horizontale. Au cours de cette opération, grâce à une rampe d'arrosage, un complément en eau est ajouté par pulvérisation jusqu'à la limite du collage des boulettes entre elles. A la sortie du disque bouleteur, les boulettes sont criblées entre les tranches 9 et 16 mm. Après un contrôle, les meilleures boulettes sont retenues pour les essais de cuisson. La bentonite et la chaux utilisées au cours des essais de bouletage du minerai de fer de Gara Djebilet ont les caractéristiques suivantes (Tableau 4) :

Les essais de bouletage à la bentonite (A, B, C, D, E, F, G, H) ont été réalisés avec du minerai de Gara Djebilet broyé à différentes finesses qui correspondent respectivement aux débits d'alimentation du broyeur de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, et 800 kg/h.

**Tableau 1:** Analyse granulométrique du lot de minerai de fer de Gara Djebilet tout venant.

Mailles (mm)	0.5	0.5–3.15	3.15–6.3	6.3–10	10–20	20–31.5	31.5–40	40–50	50–80	80	Diamètre moyen (mm)
%	1.66	1.47	10.32	30.25	26.20	13.15	5.75	3.85	5.75	0.70	10.9
Cumul	1.66	3.13	13.95	44.60	70.80	83.95	89.70	93.55	99.30	100	

**Tableau 2:** Analyse chimique du lot de minerai de fer destiné aux essais.

Eléments	Fer total	Fe <sup>++</sup>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	P	As	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	PF
%	55.46	6.52	5.68	2.91	4.21	0.39	0.28	1.23	0.07	0.51	0.084	0.29	5.24

**Tableau 3:** Analyse granulométrique du minerai de fer de Gara Djebilet broyé à différents débits d'alimentation du broyeur à boulets.

Mailles (µm) / Débit broyeur kg/h	< 32	32 - 45	45 - 63	63 - 90	90- 125	125-200	>200	Surface spécifique (cm <sup>2</sup> / g)
100	55.25	12.60	8.60	6.20	5.00	6.25	6.10	3875
200	48.3	9.15	8.30	6.55	5.45	8.75	13.50	3750
300	47.95	8.80	8.50	7.35	7.00	10.00	10.40	3742
400	45.10	8.60	8.30	7.60	7.13	11.35	11.92	3705
500	45.10	7.65	9.75	8.80	7.90	11.10	9.70	3702
600	44.70	8.55	8.80	7.25	6.50	9.40	14.80	3700
700	41.60	5.65	9.55	8.05	7.60	11.50	16.05	3628
800	40.20	6.70	8.10	7.55	7.30	11.45	18.70	3624

Pour chaque débit d'alimentation, trois taux de bentonite ont été étudiés 0.5, 0.6, et 0.7 %.

Après le criblage des boulettes obtenues à une granulométrie comprise entre 9 et 16 mm, un échantillon de boulettes a été soumis à un ensemble de contrôle de qualité avant et après séchage (mesure du diamètre moyen des boulettes, mesure de la résistance aux chutes (NC), mesure de la résistance à la compression des boulettes vertes humides (RCBH), mesure de la résistance à la compression des boulettes vertes étuvées (RCBE).....)

L'humidité est mesurée sur 50 g de boulettes écrasées dans un appareil de

mesure rapide de l'humidité par infrarouge. La densité en vrac est mesurée grâce à un bac normalisé de volume 1 dm<sup>3</sup>. Le diamètre moyen est réalisé sur 10 boulettes prélevées au hasard à partir de la tranche 9–16 mm. La résistance aux chutes est réalisée sur une moyenne de 20 boulettes de diamètre 10–12.5 mm à l'aide d'un dispositif qui consiste en la mesure du nombre de chutes de 0.45 m sur une plaque d'acier entraînant la fissuration d'une boulette.

La résistance à la compression sur des boulettes humides est réalisée sur 12 boulettes de diamètre 10–12.5 mm. Le principe consiste à mesurer la force de

pression exercée manuellement sur une boulette posée sur un plateau d'une balance électronique. La force de compression est celle qui entraîne la rupture de la boulette. La résistance à l'écrasement sur des boulettes humides supérieure ou égale à 0.8 Kgf, est généralement considérée comme acceptable [11].

La résistance à la compression, norme ISO 4700–1983 F, sur des boulettes étuvées est réalisée sur 12 boulettes de diamètre 10–16mm à l'aide d'un appareil de mesure de la résistance à l'écrasement. Cette dernière est déterminée par une application d'une charge en compression à une boulette de minerai de fer à une vitesse variable de 10 à 20 mm/mn de la plaque de compression jusqu'à ce que la boulette se brise. La résistance à la compression sur des boulettes étuvées supérieure ou égal à 4 Kgf est considérée comme bonne [11]. Pour chaque débit d'alimentation (100, 200, 300, 400 Kg/h) trois sortes de boulettes A<sub>0</sub>, B<sub>0</sub>, C<sub>0</sub>, avec une basicité 1.0 , 1.5 , et 2.0 ont été étudiés.

Les proportions de la poudre de chaux hydratée ajoutée par rapport au minerai de fer sec sont respectivement égales à 3.74 %, 7.60 %, 11.64 %.

**Tableau 4:** Caractéristiques physiques de la bentonite et de la chaux.

Caractéristiques physiques	Bentonite	Chaux
Densité en vrac	0.763	0.420
Densité réelle	2.07	2.0
% 45 (µm)	77.1	66.2
dm (µm)	12.3	2.43
Surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)	2360.0	12345

## Essais de traitement thermique

Les essais de traitement thermique ont été réalisés à l'aide de la station pilote de cuisson des boulettes. Cette installation permet la simulation de toutes les phases du cycle de traitement thermique rencontrées industriellement, sur bandes. Elle est divisée en deux postes: l'un est utilisé, pour le séchage à tirage ascendant et descendant et l'autre pour le refroidissement à tirage ascendant. Le premier poste est composé principalement d'un creuset, d'une hotte, d'une boîte à vent et d'un réchauffeur d'air, le second poste est utilisé pour la cuisson des boulettes à tirage descendant. Le creuset fictif est rempli de boulettes d'alumine ou de boulettes cuites, alors que le creuset d'essai est rempli de boulettes vertes de 9 à 16mm. Celles-ci sont chargées à l'intérieur d'un cylindre concentrique de 300mm de diamètre placé à l'intérieur du creuset d'essai et sur une couche de protection de la grille constituée de boulettes cuites et d'une épaisseur de 10mm environ. Les opérations de séchage sont à tirage ascendant et descendant, celles du préchauffage, de la cuisson et du refroidissement sont à tirage descendant. La charge du creuset est séparée en trois couches qui représentent successivement la couche supérieure, la couche médiane et la couche inférieure. Chaque couche est criblée afin de séparer les boulettes marchandes des morceaux qui ont servi de protection du réfractaire contre l'effet de paroi et des morceaux qui proviennent de l'éclatement des boulettes lors du processus de cuisson. Cette séparation permet de calculer la productivité du four. Sur chaque couche ainsi criblée, 20 boulettes de diamètre 10–12.5 mm sont prélevées en vue de déterminer la résistance à la compression.

Les trois couches sont ensuite mélangées ou sont prélevés 15 boulettes pour l'essai au tambour Micum et trois boulettes pour l'essai de porosité.

La résistance à la compression des boulettes cuites est réalisée conformément à la norme ISO 4700–1983 F. Elle est réalisée sur une moyenne de 60 boulettes, représentant 20 boulettes de chaque couche du creuset. La mesure est effectuée conformément aux mêmes principes pour la résistance à la compression sur les boulettes étuvées. La résistance à la compression est une moyenne arithmétique de toutes les valeurs obtenues sur les différentes couches. La résistance au tambour Micum s'effectue selon la norme ISO 3271 1985 F. Cet essai permet l'évaluation de la résistance des boulettes par la détermination de l'indice de cohésion (T) et l'indice d'abrasion (A).

L'indice de cohésion est la mesure relative de la résistance du matériau à la rupture ou à la dégradation par choc et abrasion est exprimé en pourcentage en masse de la fraction supérieure à 6.3mm.

L'indice d'abrasion est la mesure relative de la dégradation du matériau par abrasion, exprimé en pourcentage en masse de la fraction inférieure à 0.5 mm.

La porosité des boulettes est réalisée conformément à la norme JIS 8716–1977.

### **Essais de simulation du comportement métallurgique des boulettes du minerai de fer de Gara Djebilet dans les conditions de la cuve du haut fourneau**

Le comportement métallurgique des boulettes dans les conditions de la cuve du haut fourneau est l'étude des propriétés métallurgiques des boulettes à savoir, l'indice de réductibilité (RI), l'indice de gonflement (SI) et l'indice de désagrégation (RDI) en cours de réduction.

- Les essais de réductibilité des boulettes de Gara Djebilet ont été effectués dans le four de réduction, selon la méthode C.N.R.M. [12]. Un échantillon de 18 boulettes suspendues à un dispositif, soigneusement séché et pesé est contenu dans un tube à échantillon à l'intérieur du

champ de réaction. L'échantillon est porté à la température d'essai sous une atmosphère d'azote. Quand la température d'essai est atteinte, on fait passer un courant réducteur à travers l'échantillon. Après la période d'essai, l'échantillon est refroidi dans de l'azote jusqu'à la température ambiante et il est ensuite pesé pour évaluer la perte en poids qui correspond à l'oxygène perdu.

- Les essais de gonflement des boulettes en cours de réduction ont été effectués selon la méthode proposée par C.R.D. [13]. L'essai est fondé sur le gonflement libre, le panier contenant la boulette permet l'expansion de boulette individuelle sans entraves ni contacts physiques mutuels. Chaque boulette soigneusement repérée, fait l'objet d'une pesée et d'une mesure de volume apparent.

Les conditions opératoires de la réductibilité et du swelling index sont les suivantes :

- poids de l'échantillon: 60g
  - nombre de boulettes: 18
  - granulométrie: 10–12.5 mm
  - température: 1000°C
  - composition du gaz réducteur: 40% de CO et 60% de N<sub>2</sub>
  - débit du gaz réducteur: 1000 l/h
  - durée de l'essai: 1 heure.
- Les Essais de résistance à la dégradation en cours de réduction dite aussi: dégradation après réduction, ont été effectués dans le four de réduction Linder [14], selon la norme ISO 4696, 1984–F. L'essai est conçu pour simuler les conditions réductrices et physiques régnant dans le haut de la cuve du haut fourneau. Les boulettes essayées sont contenues dans un récipient en rotation. Elles sont graduellement chauffées à une vitesse standard jusqu'à la température finale de l'essai. Durant tout l'essai, du gaz à faible pouvoir réducteur passe sur l'échantillon. Après la période de l'essai, l'échantillon est refroidi dans de l'azote jusqu'à la température ambiante, criblé et

pesé, ce qui permet d'évaluer la résistance à la réduction à basse température.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus au cours des essais d'optimisation de la qualité de bouletage du minerai de fer de Gara Djebilet montrent que :

- en utilisant la bentonite comme liant (Tableau 5), l'essai B, ce des boulettes confectionnées avec du minerai broyé à partir d'une surface spécifique de 3750

cm<sup>2</sup>/g (débit de broyage=200 Kg/h) et bouleté avec un taux de 0.6 % de bentonite présente les meilleures propriétés mécaniques à savoir, un nombre de chutes (NC) de 69, une résistance à la compression des boulettes humides (RCBH) de 2.8 Kg/h et une résistance des boulettes étuvées (RCBE) de 6.03 Kg/h.

Les conditions opératoires de l'essai de résistance à la dégradation à basse température en cours de réduction des boulettes sont les suivantes:

- masse de l'échantillon: 500 g
- granulométrie: 10–12.5 mm
- température: 500°C
- composition du gaz :CO=20 %, CO<sub>2</sub>=20 %, N<sub>2</sub>=58 % et H<sub>2</sub>=2 %
- durée de l'essai :45mn (chauffage suivi d'une heure à 500 °C)
- débit du gaz réducteur :1200 l/h (pendant le chauffage et la réduction)
- vitesse de rotation :10 tours/mn
- nombre de cornières :4
- hauteur de rive des cornières :20 mm

- en utilisant de la chaux comme liant, pour les boulettes à basicité (1.0, 1.5, 2.0) les finesses optimales du minerai de fer conduisent à des boulettes de qualités satisfaisantes, identiques et égales à 3875 cm<sup>2</sup> (débit de broyage = 100 Kg/h).

Toutes les boulettes présentent de bonnes résistances. Les boulettes de basicité 1.5 se comportent mieux au cours

du séchage. Ces boulettes sont peu plastiques pour résister à l'écrasement pendant leur chargement dans le four (RCBH=2.2 Kgf) et suffisamment rigides pour résister à l'éclatement du à la déshydratation pendant le séchage (RCBE= 8.77 Kgf).

Les résultats d'optimisation du cycle thermique des boulettes de Gara Djebilet ont été réalisés par 41 essais de traitements thermiques sous différentes conditions. Les essais de 1 à 11 ont été effectués sur des boulettes avec un taux de 0.6 % de bentonite ayant une surface spécifique de 3750 cm<sup>2</sup>, les essais de 12 à 20, de 21 à 25, et de 26 à 41 sur des boulettes liées à la chaux pour un indice de basicité respectivement égal à 1.0, 1.5 et 2.0 et à partir d'un minerai ayant une surface spécifique .... cm<sup>2</sup>/g .

Le traitement thermique qui semble le mieux convenir à ces boulettes de différente basicité et qui ont une bonne qualité physique , un meilleur compromis productivité et qualité des boulettes sont obtenus pour les essais 08, 11, 17, 20,23, 25, 34 et 41 (Tableau 6).

Ces boulettes cuites sont retenues pour faire l'objet d'essais des propriétés physico-chimiques dans les conditions de la cuve du haut fourneau.

Toutes les boulettes cuites obtenues à partir des traitements thermiques retenus présentent d'excellentes propriétés physiques à savoir une résistance à la compression supérieure à 250 Kgf , une résistance à la cohésion supérieure à 90 % et une résistance à l'abrasion inférieure à 5%. Le Tableau (7) montre l'évolution des caractéristiques d'agglomération de tous les essais optimaux.

La résistance à la compression des boulettes cuites n'a pas trop variée, excepté les boulettes à indice de basicité 1.5 ou elle atteint une valeur minimale égale à 256.7 Kgf qui demeure toujours acceptable pour une alimentation au haut fourneau.

**Tableau 5: Résultats des essais d'optimisation de la qualité des boulettes vertes de Gara Djebilet en utilisant la bentonite et la chaux.**

Repère de l'essai		B				Ao				Bo				Co			
Débit du broyeur ( Kg / h )		200				100	200	300	400	100	200	300	400	100	200	300	400
Inférieurs à 45 µm (%)		67..87				67.85	57.45	56.70	53.70	67.85	57.45	56.75	53.70	67.85	57.45	56.75	53.70
Surface spécifique ( cm <sup>2</sup> / g )		3875				3875	3750	3742	3705	3875	3750	3742	3705	3875	3750	3742	3705
Taux de bentonite %		0.00	0.50	0.60	0.70												
Indice de basicité						1.00				1.50				2.00			
Taux de chaux %						3.74	3.74	3.74	3.74	7.60	7.60	7.60	7.60	11.64	11.64	11.64	11.64
Boulettes Humides	Humidité (%)	10.5	10.2	9.00	7.90	10.1	9.95	9.1	9.35	9.6	9.7	9.7	9.2	9.15	9.5	9.0	9.25
	Densité en vrac	1.98	1.98	1.91	1.93	1.30	1.80	1.86	1.95	1.99	1.76	1.77	1.97	1.89	1.69	1.79	1.91
	Nombre de chute de 0.45m	25	27	69	59	30											
	Résistance à la compression ( Kgf / boulette )	1.38	1.93	2.80	1.77	1.53	1.54	1.75	1.21	2.2	2.38	1.65	1.33	2.53	1.54	1.65	1.37
	Diamètre moyen (mm)	13.5	13.3	13.2	12.7	11.25	13.00	13.75	12.0	13.25	12.50	13.75	12.25	12.00	12.50	13.00	12.75
Boulettes étuvées à 100 °C	Résistance à la compression ( Kgf / boulette )	6.62	6.03	4.25	2.15	8.25	4.80	4.47	5.44	8.77	5.41	3.96	4.83	9.05	4.57	3.46	5.09



Suite du Tableau 5:

Repère de l'essai	23		25		34		41	
Désignation	Durée (mn)	Température °C	Durée (mn)	Température °C	Durée (mn)	Température °C	Durée (mn)	Température °C
-séchage ascendant	10	220	10	220	10	220	10	220
-séchage descendant	6	200	6	200	6	200	6	200
- 1 <sup>er</sup> préchauffage	4	200 – 280	4	200 – 280	6	200 – 280	6	200 – 280
-2 <sup>ème</sup> préchauffage	4	280 – 500	4	280 – 500	6	280 – 500	6	280 – 500
- 3 <sup>ème</sup> préchauffage	4	500 – 800	4	500 – 800	6	500 – 900	6	500 – 900
- 4 <sup>ème</sup>	6	800 – 1100	6	800 – 1100	6	900 – 1180	6	900 – 1180
- 5 <sup>ème</sup>	4	1100 – 1240	4	1100 – 1240	/	/	/	/
- cuisson	10	1240 – 1240	10	1240 – 1240	10	1180 – 1180	10	1180 – 1180
- post cuisson	2	1240 - 800	2	1240 – 800	2	1180 - 800	2	1180 - 800
Temps d'agglomération (mn)	48		48		50		50	
Productivité (T/ m <sup>2</sup> . 24h)	25.71		25.06		23.03		22.91	
Résistance à la compression des boulettes cuites (Kgf / boulettes)	Supérieure	306.8	Supérieure	306.4	Supérieure	313.25	Supérieure	369.25
	Milieu	231.85	Milieu	258.84	Milieu	321.05	Milieu	285.7
	Inférieure	263.95	Inférieure	272.79	Inférieure	297.7	Inférieure	240.25
	Moyenne	267.53	Moyenne	246	Moyenne	310.66	Moyenne	298.42
	Maximale	486	Maximale	495	Maximale	668	Maximale	515
	minimale	111	minimale	88	minimale	110	minimale	200
Résistance mécanique (ISO) (%)	>6.3 mm	93.25	> 6.3 mm	95.85	> 6.3 mm	96.67		93.96
	<0.5 mm	2.68	<0.5 mm	0.94	< 0.5 mm	2.75		1.82
Porosité (%)	22.14		22.21		21.21		21.42	

Les propriétés chimiques des boulettes particulièrement pour le point fer a tendance à diminuer avec l'augmentation de l'indice de basicité et atteint pour les boulettes à indice de basicité égale à 2.0, une valeur de 54 %. Ceci s'explique par l'augmentation de la quantité de chaux dans le mélange à bouleter favorisant la formation de la phase silico- ferrite de calcium et d'aluminium au cours de la cuisson, fusible à basses températures [12].

Pour un meilleur rendement métallique au haut fourneau les boulettes liées à la bentonite et les boulettes de basicité égale à 1.0 sont préférées. Les porosités des boulettes cuites sont moyennes, ceci est normale si on se réfère aux températures de cuisson qui s'étendent entre 1120° et 1250° [15]. Les résultats des essais de réductibilité effectués sur les boulettes cuites sont indiqués dans le Tableau (8).

Ils montrent que la réductibilité des boulettes est d'autant meilleure que l'indice de basicité augmente [16]. Les boulettes liées à la bentonite de basicité 0.5 et les boulettes de basicité 1.0 sont les moins réductibles (RI= 26.56% et 32.98%). Ces deux types de boulettes ne peuvent être acceptés pour une alimentation au haut fourneau puisqu'elles demandent plus de coke pour être réduites. Le meilleur indice de réduction est obtenu sur les boulettes de basicité 2.0, (RI= 61.16 %). L'inconvénient pour ces boulettes est que leur cycle thermique optimal conduit à une faible productivité de 22.97 t/m<sup>2</sup> par 24h. Les boulettes de basicité 1.5 présentent une réductibilité juste moyenne et sont préférées pour une alimentation au haut fourneau quoique leur processus de cuisson conduit à une productivité du four moyenne 25.40 t/m<sup>2</sup>. 24h contre une productivité de 22.97 t/m<sup>2</sup>. 24h pour les boulettes de basicité 2.0.

Les résultats des essais de gonflement et de dégradation effectués sur les

boulettes cuites sont indiqués dans le Tableau (9).

Ces valeurs représentent la moyenne arithmétique calculée sur les 36 boulettes pour chaque essai. De façon générale, quelque soit la nature du liant utilisé et l'indice de basicité, les boulettes de Gara Djebilet accusent un taux de gonflement normal, inférieur à 20%. En effet la teneur de la silice élevée dans les boulettes de minerai de fer a contribué à freiner le gonflement [17] [18]. Les indices de gonflement en cours de réduction sont de 4.85% avec ( $SI_{\text{mini}} = 1.66\%$ ,  $SI_{\text{maxi}} = 7.21\%$ ) et de 4.18% avec ( $SI_{\text{mini}} = 0.9\%$ ,  $SI_{\text{maxi}} = 10.56\%$ ) respectivement pour les boulettes de basicité égale à 1.5 et 2.0. Il est à remarquer que le plus fort gonflement en cours de réduction correspond aux boulettes liées à la bentonite. Il est de 9.66 % avec:

$SI_{\text{mini}} = 3.76\%$  et  $SI_{\text{maxi}} = 14.72\%$ .

Par conséquent, du point de vue gonflement, toutes les boulettes peuvent être utilisées au haut fourneau sans difficulté.

Les résultats des essais de l'indice de désagrégation en cours de réduction effectués sur les boulettes cuites de Gara Djebilet (Tableau 9), montrent que les boulettes liées à la chaux pour  $CaO / SiO_2 = 1.0$  présentent la plus forte résistance à la dégradation ( $RDI_{-0.5} = 1.64\%$ ,  $RDI_{+3.15} = 31.2\%$ ) par rapport à l'ensemble des essais effectués. L'indice de désagrégation en fonction de la basicité des boulettes passe par un maximum pour un RDI supérieur à 3.15 mm et par minimum pour un RDI inférieur à 0.5 mm et tend à se stabiliser à partir de l'indice de basicité 1.5. La baisse de la résistance à la dégradation au cours de la réduction des boulettes au delà de  $CaO/SiO_2 = 1.0$  s'explique par le fait qu'à basse température et par un faible pouvoir réducteur, l'hématite (boulettes oxydées) se réduit en magnétite à structure micro poreuse et que l'addition seulement de chaux en excès, pour la cohésion des

**Tableau 6:** Résultats des essais d'optimisation du cycle de traitement thermique des boulettes de Gara Djebilet retenues pour les différents tests métallurgiques.

Repère de l'essai	08		11		17		20	
Désignation	Durée ( mn )	Température °C	Durée ( mn )	Température °C	Durée ( mn )	Température °C	Durée ( mn )	Température °C
-séchage ascendant	10	220	10	220	10	220	10	220
-séchage descendant	6	200	6	200	6	200	6	200
- 1 <sup>er</sup> préchauffage	2	200 – 280	2	200 – 280	4	200 – 280	4	200 – 280
-2 <sup>émé</sup> préchauffage	6	280 – 500	6	280 – 500	4	280 – 500	4	280 – 500
- 3 <sup>ème</sup> préchauffage	4	500 – 900	4	500 – 900	6	500 – 800	6	500 – 800
- 4 <sup>émé</sup>	8	900 – 1230	8	900 – 1230	6	800 – 1100	6	800 – 1100
- 5 <sup>ème</sup>	/	/	/	/	4	1100 – 1250	4	1100 – 1250
- cuisson	10	1230	10	1230	10	1250 – 1250	10	1250 – 1250
-post cuisson	2	1230 - 800	2	1230 - 800	2	1250 - 800	2	1250 - 800
Temps d'agglomération ( mn )	48		48		48		48	
Productivité ( T/ m <sup>2</sup> . 24h )	34.20		31.81		28.28		29.19	
Résistance à la compression des boulettes cuites (Kgf / boulettes )	Supérieure	266.65	Supérieure	380.1	Supérieure	285.6	Supérieure	313.1
	Milieu	450.1	Milieu	418.6	Milieu	322.45	Milieu	334.75
	Inférieure	362.5	Inférieure	378.5	Inférieure	352	Inférieure	351.1
	Moyenne	359.75	Moyenne	392.4	Moyenne	320.01	Moyenne	333.3
	Maximale	799	Maximale	615	Maximale	830	Maximale	520
	Minimale	89	minimale	202	minimale	123	minimale	130
Résistance mécanique ( ISO ) ( % )	> 6.3 mm	96.93	>6.3 mm	96.47	> 6.3 mm	97.48		97.33
	<0.5 mm	1.01	<0.5 mm	1.64	< 0.5 mm	1.0		1.43
Porosité ( % )	22.14		21.65		24.98		25.34	

boulettes vertes et l'ajustement de l'indice de basicité, favorise au cours de la cuisson des boulettes la formation de ferrite de chaux réductible et qui donne une mauvaise résistance.[19]. Il faut noter que la baisse est aussi observée quand l'indice de basicité devient très faible, favorisant ainsi la formation de phases vitreuses [19, 20]. Ce cas est donné par les boulettes liées à la bentonite pour un rapport CaO /

SiO<sub>2</sub> = 0.51 ou l'indice de désagrégation supérieur à 3.15 mm à tendance à diminuer. Ce phénomène peut être limité en substituant une partie de la chaux par de la dolomie pour ne permettre que la formation de silicate de calcium ou de magnéso – magnétite (Mg . Fe)O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> comme liant très fort [19].

**Tableau 7:** Caractéristiques d'agglomération des essais optimaux de traitement thermique des boulettes de Gara Djebilet.

Basicité : CaO/SiO <sub>2</sub>	Fe T %	Porosité %	Température de cuisson °C	RC (Kgf)	ISO >6.3 mm %	ISO <0.5 mm %	Productivité T/m <sup>2</sup> . 24h
0.51	58.76	21.34	1230	376.1	26.70	1.33	30.6
1.0	57.65	21.32	1250	326.7	97.40	1.22	28.7
1.5	55.66	22.33	1240	22.97	94.60	1.81	25.4
2.0	54.00	25.16	1180	304.8	95.32	2.29	

**Tableau 8:** Indices de réduction des boulettes de Gara Djebilet.

Indice de basicité CaO/SiO <sub>2</sub>	Nature du liant	Fe <sub>t</sub> (%)	Fe <sup>++</sup> (%)	Fe <sup>+++</sup> (%)	O <sub>t</sub> (g)	O <sub>p</sub> ou Δp (g)	RI (%)
0.51	Bentonite	58.76	1.39	57.37	13.19	3.5	26.53
1.0	Chaux	57.65	1.34	56.31	13.34	4.4	32.98
1.5	Chaux	55.66	1.41	54.25	12.60	6.3	50.00
2.0	Chaux	54.00	1.28	52.72	13.08	8.0	61.16

**Tableau 9:** Indices de gonflement (SI) et de désagrégation (RDI) des boulettes de Gara Djebilet.

CaO/SiO <sub>2</sub>	0.51	1.0	1.5	2.0
Nature du liant	Bentonite	Chaux	Chaux	Chaux
SI (%)	9.66	5.16	4.85	4.18
SI <sub>mini</sub> (%)	3.76	0.72	1.66	0.9
SI <sub>maxi</sub> (%)	14.72	10.17	7.21	10.56
RDI+3.15	73.84	81.20	65.66	66.12
RDI-0.5	17.64	11.64	25.02	27.35

**4. CONCLUSION**

Les caractéristiques optimales (NC, RCBH, RCBE) de toutes les boulettes vertes de minerai de fer de Gara Djebilet liées à la bentonite et à la chaux hydratée sont excellentes.

L'utilisation de la chaux hydratée confère aux boulettes les meilleures résistances à la compression. A l'état humide, ces boulettes sont plus plastiques que les boulettes liées à la bentonite. A

l'état sec, ces boulettes sont plus rigides, et sensibles à l'écrasement et aux chocs thermiques. Les boulettes de basicité 1.5 sont préférées car elles ont une plasticité suffisante afin de résister à l'écrasement et une résistance assez élevée pour éviter l'éclatement pendant la déshydratation au cours de l'opération de séchage.

Les essais de bouletage et de simulation des conditions de la cuve du haut fourneau pour les boulettes de minerai de fer de Gara Djebilet ont permis de mettre en évidence les points suivants:

Les essais de la confection des boulettes vertes de qualité optimale ont conduit à obtenir avec la bentonite comme liant, un minerai de fer broyé à une surface spécifique de 3750 cm<sup>2</sup>/g (200 Kg/h) et bouleté avec un taux de 0.6 % de bentonite. Alors qu'avec la chaux comme liant et moyen de réglage de la basicité 1.0, 1.5, et 2.0, un minerai de fer broyé à une surface spécifique de 3875 cm<sup>2</sup>/g (100 Kg/h).

Les résistances moyennes aux chutes et à la compression obtenues au cours du bouletage sont les suivantes :

Pour 0.6% de bentonite NC=69, RCBH=2.8 Kgf, et RCBE = 6.03 Kgf

Pour une basicité 1.0, NC=30, RCBH=1.53 Kgf et RCBE=8.25 Kgf

Pour une basicité 1.5, NC=30, RCBH=2.2Kgf et RCBE=8.77Kgf

Pour une basicité 2.0, NC= 30, RCBH=2.53Kg et RCBE=9.05 Kgf

Les résultats montrent que par rapport aux boulettes liées à la bentonite, la qualité des boulettes vertes utilisant de la chaux est relativement meilleure. Ces boulettes seront moins sensibles au choc thermique et à l'écrasement pendant la cuisson. La bonne valeur optimale est donnée par les boulettes de basicité 1.5. Ces boulettes ont une plasticité moyenne pour résister à l'écrasement et sont assez rigides pour éviter l'éclatement pendant la phase de séchage.

Le cycle thermique qui été retenu comme optimal pour les boulettes de Gara Djebilet montre que d'une manière générale, la qualité physique des boulettes cuites obtenues au cours des cycles thermiques retenus est excellente, à savoir une résistance à la compression supérieure à 250 Kgf et une résistance à la cohésion supérieure à 90 % et à l'abrasion inférieure à 5%. Chimiquement, les boulettes liées à la bentonite et les boulettes à basicité 1.0 sont préférées dans le cas où on cherche à enrichir le lit de fusion du haut fourneau.

Les essais ont montré que les boulettes liées à la bentonite et à la chaux pour une basicité 1.0 ont une mauvaise réductibilité. Celles-ci, une fois chargées dans le haut fourneau, exigent une quantité de coke supplémentaire pour être réduites alors que la marche à faible mise au mille coke est recherchée.

Les boulettes de basicité 1.5 ont un indice de réduction moyen (RI=50%) tandis que les boulettes de basicité 2.0 sont plus réductibles (RI=61,16%). Ces deux types de boulettes peuvent être chargés dans le haut fourneau.

Le gonflement en cours de réduction de toutes les boulettes est généralement normal, les boulettes de basicité 1.5 accusent un gonflement maximal de 7.21%.

Les indices de désagrégation des boulettes de Gara Djebilet liées avec la bentonite et à la chaux de basicité 1,5 et 2.0 se situent dans le domaine des valeurs répondant aux exigences du haut fourneau [16].

Compte tenu de tous les résultats à savoir un meilleur SI, un RDI acceptable et un RI suffisant, les boulettes de basicité 1.5 sont recommandées pour une alimentation au haut fourneau.

## REFERENCES

[1] S. Guerrak, *Geology of the early Devonian Eolithic iron of the Gara*

*Djebilet field, Saharan plat form Algeria, The geology reviews, (3) (1988) 333 – 358.*

[2] S. Kheraif, K.Rahmani, V. Djafari, *Etude minéralogique d'un aggloméré de minerai de Gara Djebilet*, Rapport au laboratoire de métallurgie extractive, Ecole Centrale de Paris, 1986.

[3] L. Ivanier, *Mission à la mine de Gara Djebilet*, Rapport IRSID, RC 517, 1975.

[4] J.L. Gerbe, F. Pazdej, F.Jemoin, *Etude de l'agglomération en boulettes du minerai de fer de Gara Djebilet*, IRSID, MCF, RC 713, 1977.

[5] Nippon Steel Corporation, *Rapport des essais sur le minerai de Gara Djebilet*, NSC, 1978.

[6] L. Kab, *Etude mécanique et métallurgique du minerai de fer de Gara Djebilet* 1977.

[7] Klockner, industrie GmbH, *Rapport sur l'investigation des échantillons de minerai de fer de Gara Djebilet*, 1984.

[8] Fried - Krupp, GmbH, *Etude sur l'utilisation du minerai de fer de Gara Djebilet, Tindouf, Algérie*, Essen, tome I, 1967, Tome II, 1968.

[9] S. Kheraief, *Pelletisation et simulation des conditions de la cuve du haut fourneau pour les boulettes de Gara Djebilet*, Thèse de magister. Annaba. 1992

[10] E. Gooden, I. Smith, *Equations mathématiques pour la granulométrie*, Rapport du C.R.M. Liege, 1980.

[11] H. Geesen, J.L. Gerbe, *Etude de l'agglomération en boulettes d'un*

*minerai. Procédure des essais*, Minerai-rapport.133, 1974.

[12] N. Ponghis, Leroy V., Fascicule 3 : sur les réactions en agglomération. CNRM DS 51, 1970.

[13] P. Lecompte, R. Vidal, A. Poos, A. Decker, *Essais de qualité pour les minerais agglomérés et boulettes, Essais de ramollissement et de gonflement*, CIT,(3) (1969) 553 – 564.

[14] ISO 4696 . *Essais de désagrégation à basse température*, 1ère édition 1984- 03-01.

[15] A. Send, A. Winzer, *Indice de qualité et caractérisation de réduction des boulettes*, CIT ( 5) (1967) 1091 – 1102.

[16] C. Barry, A. Didier, Y. De lassat, J.L. Letailleur, *Qualité de la charge du haut fourneau*, 2ème partie, IRSID, session fonte 1987.

[17] R. Vidal, N. Ponghis, A. Poos, *Le gonflement des boulettes et son influence sur la marche du haut fourneau*, CIT,(10), 1967, p.2109 – 2116.

[18] H.A. Kortann, O.P. Burghardt, *Moyens d'action sur la qualité des boulettes de minerai de fer utilisées dans le lit de fusion du haut fourneau*, Rev. Mét., Vol. 9, 1976, p.625 – 636.

[19] B. Bjorkvall, P.A. Limoni, *Production et utilisation des boulettes fondantes*. Rev. Mét., (9), 1976, p.583 – 604.

[20] J.T. Moon, R. Walker, *Gonflement de compacts d'hématite pendant leur réduction*, CIT, (7–8), 1967, p.2109–2116.