



# Amélioration et évolution des recyclages à Matagglo.

**MORATA ROYES Anna**



## Remerciements

Je remercie tout d'abord Mademoiselle Clara Fernandez, manager process opérationnel du département fonte et aussi ma tutrice de stage, de m'avoir accueilli dans ArcelorMittal, de m'avoir aidé ainsi que de m'avoir donné ses conseils pendant tout le parcours de mon stage.

Je remercie aussi Monsieur Jeremie Gallet, manager process support, de m'avoir accueilli pour effectuer mon stage de dernière année et Master Catalyse et Procédé au sein du département fonte dans le secteur Matagallo ainsi que toute son aide au long de mon stage.

Je tiens également à remercier Monsieur Lionel Garin, manager environnement. Son aide et sa disponibilité m'ont permis d'avancer dans mon stage.

J'exprime aussi ma gratitude à l'ensemble du service process de Matagallo, Thierry Gheysens, Jean-Claude Boin, Yann Gouverneur, Franck Bruckert, Anthony Lampin, Julie Duvivier, Mathieu Courtin, Margot Lewandowski, Stéphanie Rose, pour leurs explications, pour leur disponibilité, pour les visites du site et pour m'avoir fait partager l'ambiance au sein du process.

Je souhaite remercier Monsieur Bruno Treulier, du Systèmes d'Informations, pour m'avoir aidé à installer et utiliser tous les programmes informatiques et tous les documents dont j'ai eu besoin pendant mon stage.

Je remercie aussi toutes les personnes que j'ai pu rencontrer et qui m'ont aidé lors de mon stage pour l'obtention des informations nécessaires.

## **Résumé**

L'usine ArcelorMittal Dunkerque produit tous les ans 7 millions de tonnes d'acier, principalement à partir de divers minerais de fer, mais également en recyclant des coproduits sidérurgiques. Chaque matière première possède ses avantages chimiques (taux de Fer, énergie), mais également ses inconvénients (Phosphore, zinc...).

Le stage consiste, d'une part, à améliorer le suivi et la prévision des recyclages et d'autre part, à réaliser des études sur l'impact des nouveaux recyclages pour voir si leur consommation est possible, et si c'est le cas, en optimiser la quantité. Pour faire cela, nous avons analysé les éléments qui peuvent poser problèmes (grâce à la charte qualité des recyclages ainsi que la charte qualité fonte) et nous avons identifié quelles sont les limitations.

## **Summary**

The ArcelorMittal Dunkerque plant produces 7 million tons of steel every year, mainly from diverse iron ore, but also by recycling steel-making reverts. Every raw material possesses its own chemical advantages (iron rate, energy), but also drawbacks (Phosphor, zinc...).

The internship I am currently carrying out consists of, on one side, improving the follow-up and the forecast of recycled materials. On the other side, develop studies on the impact of new recycled materials to see if it is possible to reuse them, and if it's the case, optimise the quantity that is recycled. For this purpose, we have analysed the elements which can raise problems (using the charter quality of the recycled products as well as the charter quality of cast iron) and have identified what their limitations are.

## **Mots clés**

Recyclage, aggloméré, acier, fonte, laitier, charte qualité, résiduels.

## Sommaire

1	Le groupe .....	4
1.1	ArcelorMittal-Atlantique.....	5
2	Introduction.....	7
2.1	Objectifs .....	7
2.2	Les coproduits .....	8
2.3	Etat de l'art .....	10
3	Recyclage des fines réfractaires .....	12
3.1	Cas d'étude .....	12
3.2	Résultats et discussion.....	14
4	Recyclage du mélange TLS (Top Layer Sintering).....	18
4.1	Cas d'étude .....	18
4.2	Résultat et discussions .....	19
4.2.1	Analyse générale.....	19
4.2.2	Analyse spécifique silice.....	20
5	Recyclage des calamines .....	22
5.1	Cas d'étude .....	22
5.1.1	Etude initiale .....	22
5.1.2	Etude détaillée.....	23
5.2	Résultat et discussions.....	25
5.2.1	Etude initiale .....	25
5.2.2	Etude détaillée.....	26
6	Conclusions et perspectives .....	29
6.1	Recyclages.....	29
6.1.1	Fines réfractaires magnétiques.....	29
6.1.2	TLS.....	29
6.1.3	Calamines .....	30
6.2	Changements réalisés pendant mon stage.....	31
6.3	Perspectives futures .....	31
7	Les references .....	32
8	Annexes.....	33
8.1	Annexe 1 : Matières premières .....	33
8.1.1	Les minerais .....	33
8.1.2	Les fondants / Les entrées de MgO .....	34
8.1.3	Le charbon .....	34
8.2	Annexe 2: Procédé d'agglomération .....	35
8.2.1	Etape d'homogénéisation .....	35
8.2.2	La nodulisation .....	36
8.2.3	Le chargement.....	38
8.2.4	L'allumage .....	40
8.2.5	Le frittage .....	42
8.2.6	Refroidissement et conditionnement.....	42
8.2.7	Captations des fumées .....	43
8.3	Annexe 3 : études ISO corrigés .....	44

# 1 Le groupe

Le groupe ArcelorMittal, leader de l'industrie sidérurgique, produit 10 % de l'acier mondial. L'existence de ressources minières dans le groupe est un facteur favorable pour limiter la hausse des coûts des matières premières.

Présent dans plus de 60 pays, avec 310 000 salariés, ArcelorMittal est leader sur tous les marchés mondiaux.

Les différents produits d'ArcelorMittal :

- Aciers plats au carbone,
- Aciers longs au carbone,
- Aciers inoxydables.

Les grands marchés d'ArcelorMittal :

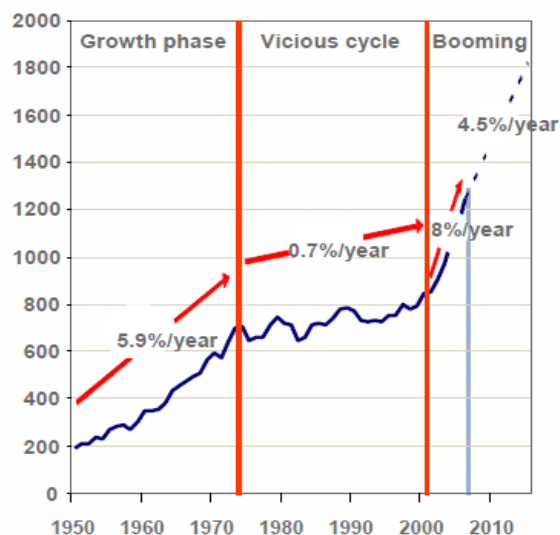
- Automobile: il est le premier fournisseur mondial d'acier destiné à l'industrie automobile, avec une part de marché de 55%. Il a une présence industrielle mondiale, avec 42 chaînes de revêtement en Europe, Amérique du Nord, Amérique du Sud et en Afrique.
- Construction: il est aussi le premier fournisseur d'acier du secteur de la construction, avec une production annuelle d'environ 35 millions de tonnes destinées à ce marché.
- Electroménager: ce marché-là enregistre un taux de croissance pouvant atteindre jusqu'à 5% dans certaines régions.
- Emballage: il est constamment à la recherche de nouveaux concepts d'emballages pour une différenciation à travers les solutions acier (canettes, boîtes à ouverture facile...)

Les valeurs d'ArcelorMittal :

- Développement durable : guider l'évolution de la sidérurgie de façon à assurer le meilleur avenir possible à l'industrie et aux générations futures.
- Qualité : attirer et développer les meilleurs talents, afin que les clients bénéficient des meilleures solutions.
- Leadership : esprit d'entreprise qui crée chaque jour de nouvelles opportunités à porter au premier plan de l'industrie sidérurgique, et aller au-delà de ce que le monde attend de l'acier.

La production :

Pendant 25 ans, l'industrie sidérurgique a connu une surcapacité chronique et les prix chutaient de 3% chaque année. Depuis 2000, l'importante demande de la Chine et dans une moindre mesure des autres marchés émergents, a réduit cette surcapacité et les prix augmentent partout dans le monde.



**Figure 1.** Production globale annuelle d'acier (Mt)

Par ses propriétés de recyclage, l'acier est le matériau le plus respectueux de l'environnement. Pour certaines applications, 90% de l'acier employé est recyclé.

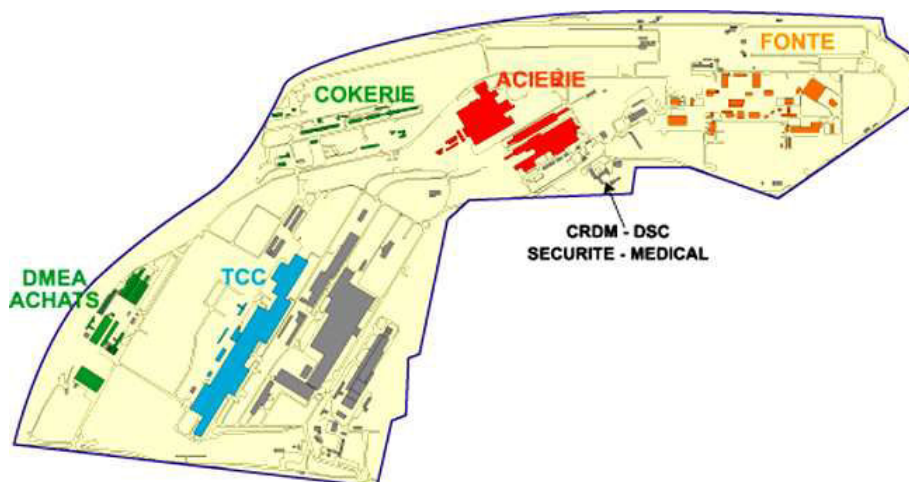
Environ 600 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> peuvent être économisées par an grâce au recyclage de l'acier à l'échelle mondiale.

### 1.1 ArcelorMittal-Atlantique

ArcelorMittal Atlantique a un périmètre large au nord de la France. Les principales installations sont à Dunkerque, Mardyck, Montataire, Desvres et La Praye. Le site de Dunkerque, avec 3400 salariés, produit annuellement 6,7Mt de brames et 4,7Mt de coils.

Suivant les engagements environnementaux du groupe, le site de Dunkerque a le défi de réduire des émissions atmosphériques et être capable de produire plus de 7 millions de tonnes de brames par an en manipulant plus de 14 millions de tonnes de minerai de fer et de charbon.

Le site de Dunkerque, d'une surface de 450 hectares, est une usine intégrée avec un quai de déchargement des minerais, deux chaînes d'agglomérations, une cokerie, trois hauts fourneaux, trois convertisseurs, trois stations de traitement de poche, quatre coulées continues et un Train Continu à Chaud (TCC).



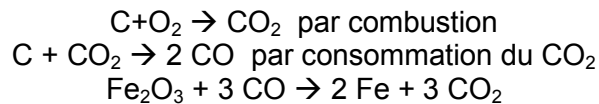
**Figure 2.** Différentes unités de l'usine de Dunkerque.

## Description générale du procédé de fabrication d'acier

Le département fonte comprend Matagallo, la cokerie et les hauts fourneaux (HFx) :

- L'unité Matagallo fait de l'aggloméré à partir des minerais, coproduits et additifs.
- La cokerie sert pour l'approvisionnement des hauts fourneaux en coke (produit à partir de charbons) comme utilisation de combustible.
- Les hauts-fourneaux utilisent cet aggloméré, ainsi que le coke, pour former de la fonte.

La combustion du coke dans les HFx permet de réduire le fer, initialement sous forme oxydé dans les minerais et aggloméré :



Dans l'aciérie on transforme la fonte qui arrive des hauts fourneaux, riche en C, S et P, en acier liquide. L'excès de carbone contenu dans la fonte est éliminé dans un convertisseur à oxygène.

L'acier sauvage obtenu est alors traité dans une station d'affinage pour régler très précisément sa composition chimique finale définie en fonction des besoins du client. L'acier en fusion est versé en continu dans le moule de la machine de coulée continue. En traversant ce moule, il commence à se solidifier sous forme de brame.

Le Train Continu à Chaud (TCC) est l'unité qui reçoit les brames d'acier pour les convertir par laminage en de l'acier plus fin et malléable. Cet acier est enroulé en bobine appelée coil.

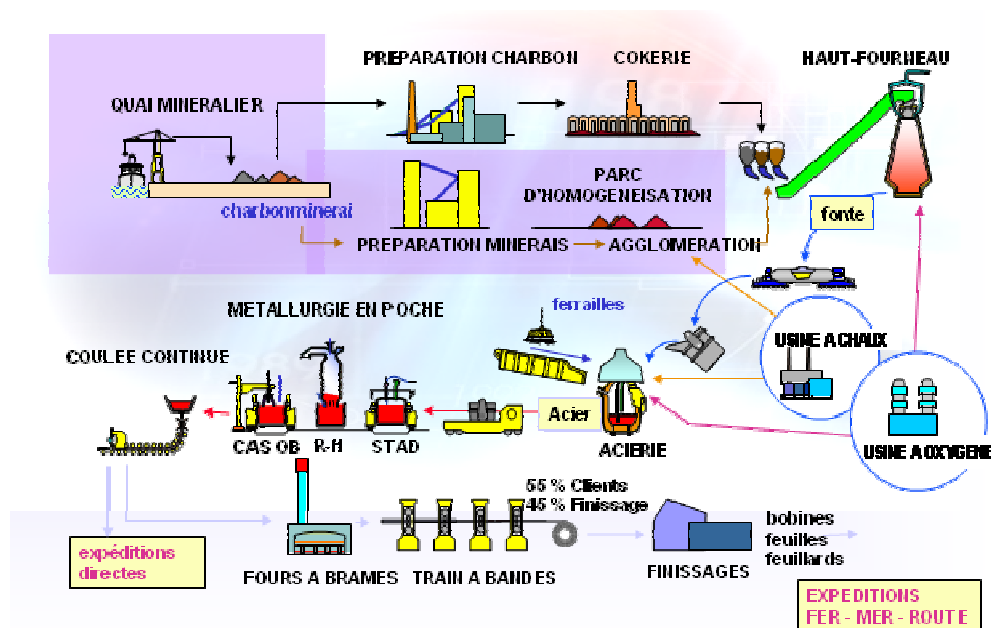


Figure 3. Schéma général de la chaîne de production.

On peut voir qu'il y a différentes phases de transformation (chimique et granulométrique) des minerais ainsi que les équipements nécessaires pour l'obtention finale de l'acier. Le point de fonctionnement de ce procédé là est toujours le résultat du compromis entre la quantité, le coût, la qualité et l'environnement.

Pour ma part, j'ai effectué mon stage au sein de l'équipe process en charge du choix des matières premières consommées, du recyclage et des paramètres du procédé d'agglomération pour atteindre les objectifs.

## 2 Introduction

### 2.1 Objectifs

L'objectif principal de mon stage consiste à optimiser la consommation actuelle des coproduits (en étudiant leurs impacts et les processus dans lesquels ils sont introduits), ainsi que permettre l'introduction des nouveaux recyclages.

Pour l'accomplissement de cet objectif, il faut :

1. Suivre les recyclages chaque semaine et optimiser la quantité par rapport aux contraintes et à la problématique de stockage.
2. Analyser les écarts entre les analyses réelles et théoriques du Top Layer Sintering (TLS) : voir chapitre 4.
3. Comprendre les origines de nouvelles matières à recycler.
4. Analyser les éléments qui peuvent poser des problèmes (grâce à la charte qualité des recyclages).
5. Voir l'impact chimique des nouveaux recyclages sur la qualité.
6. Etudier les influences de ces matières en fonction du tonnage à consommer.
7. Optimiser la consommation des coproduits.
8. Regarder le fonctionnement de recyclage des autres usines ArcelorMittal.
9. Etudier les impacts sur la qualité des nouveaux essais de recyclage.
10. Apporter des solutions à ces problématiques.
11. Essayer ces solutions et voir le résultat.

Le recyclage est très important parce qu'il permet de valoriser les coproduits, qui remplacent des matières premières qui constituent 75% du coût de la production d'acier. Cela permet de réaliser d'importantes économies.



## 2.2 Les coproduits

Les coproduits sont tous les résidus générés dans le processus de production de l'acier. Ils viennent de toute l'usine et chaque coproduit a un traitement et un stockage différent par rapport à sa chimie.

Le recyclage est un levier efficace pour économiser des matières premières mais il faut savoir qu'il est limité par les quantités stockées disponibles ainsi que par les impuretés ou poisons contenus dans les coproduits qui peuvent affecter la chimie de l'aggloméré et, en conséquence, de l'acier. Nous pouvons distinguer différents types de coproduits par rapport au secteur de l'usine:

- Mataglo:

- Nettoyage Carboné (nettoyage parc charbon pour agglomération).
- Nettoyage parc déchargement de bateaux.
- Nettoyage des autres parcs de stockage des minerais.

Recycler cela nous donne un gain minéral (en carbone et en fer).

- Hauts-Fourneaux (HFx):

- Fines de retour : fines de criblage sous accus HFx (agglomérés + minerais rocheux + boulettes).
- Poussières de gaz : poussières issues du dépoussiérage du gaz produit par le haut fourneau.
- Poussières diverses (poussières d'assainissement, etc.).

Recycler cela nous donne un gain minéral (fer) et en combustible.

- Aciérie:

- Poussières diverses issues des équipements de dépoussiérage.
- Laitier de poche ou scories mousseuses : laitier affinage aciérie.
- Réfractaires usagés: partie fine provenant du convertisseur.

Recycler ces coproduits nous donne un gain minéral (fer).

- Etincelles fonte : issues des laitiers de désulfuration de la fonte à l'entrée de l'aciérie.
- Etincelles aciérie : produites à partir des laitiers de convertisseur et d'affinage.
- Boues classificateur : proviennent de la récupération gaz au convertisseur (fraction la plus grossière).

Recycler ces trois coproduits nous donne un gain minéral (fer) et combustible.

- Boues fines d'aciérie qui proviennent de la récupération gaz au convertisseur (fraction la plus fine).

Recycler ce coproduit nous donne un gain en minéral (fer), en fondants et en productivité (la chaux est sous forme de CaO vive).

- Laitier débordement: provient du convertisseur de l'aciérie.
- Laitier du convertisseur de stock ancien (appelé aussi Laitier du Puytouck).
- Laitier de désulfuration ou stérile fonte, provient de la fonte (entrée à l'aciérie) partie stérile.

Recycler ces trois coproduits nous donne un gain minéral (fer) et en fondants.

- Train Continu à Chaud (TCC):
  - Battitures Dunkerque : provient du traitement des eaux chargées en huile du TCC (1<sup>er</sup> étape de traitement, fraction grossière).
  - Boues Traitées de Laminoir (BTL) : boues chargées en huiles issues des décanteurs (2<sup>ème</sup> étape traitement des eaux).
  - Boues Grasses de Laminoir (BGL) : boues issues des filtres à sable fortement chargées en huiles (dernière étape de traitement).

Recycler ces trois coproduits nous donne un gain minéral (fer).

- Autres coproduits :
  - Oxydes de décapage.
  - Boues EXD : boues issues des traitements des eaux du site de Dunkerque.
  - Pailles de Liège : fraction grossière issue du traitement des eaux des trains de Liège.
  - Calamines de Lorraine : fraction grossière issue du traitement des eaux des trains de Lorraine.

### **Contraintes des coproduits**

Tous les coproduits qui sont recyclés et aussi tous les futurs coproduits que nous voulons recycler ont des impuretés ou poisons qui doivent être contrôlés.

Nous pouvons classer les différents recyclages en fonction de leur nature et des éléments chimiques problématiques:

- Les battitures, les calamines et les BGL:
  - Elles ont une grande teneur en huiles qui risquent de se déposer et d'encrasser les électrofiltres des ateliers d'agglomération. La génération des matières huileuses dans les fumées peut causer des incendies dans les électrofiltres en cas d'augmentation de température.
- Les boues fines d'aciérie:
  - La forte teneur en zinc cause des problèmes sur les hauts fourneaux. A cause de la température d'ébullition du Zn, il est recirculé dans les hauts fourneaux, et donc il n'est pas éliminé. Il s'évapore quand il arrive dans la partie inférieure du haut fourneau, après il monte et quand il arrive à la partie supérieure du fourneau, il est refroidit et il commence à descendre une autre fois. De plus, il peut se solidifier sur les parois des hauts fourneaux et baisser son rendement.
  - Le chlore génère des particules résistives (NaCl, KCl ...), difficiles à capter par les électrofiltres et donc, il baisse leur efficacité.
- Les étincelles fonte:
  - Le soufre donne de problèmes environnementaux car il y a la formation de SOx. De plus, le soufre donne des problèmes de ségrégation à l'acier et change ses propriétés physiques.
- Les laitiers d'aciérie:
  - Le manganèse change les propriétés d'élasticité de l'acier.
  - Le phosphore change les de dureté et résistance de l'acier.

Sur le soufre, le manganèse et le phosphore, il existe des limitations imposées par rapport aux nuances de l'acier.

## 2.3 Etat de l'art

Depuis quelques années, ArcelorMittal Dunkerque a commencé à recycler des coproduits générés au long du processus de production de l'acier.

Les coproduits ne sont pas recyclés de la même manière parce que chacun a des contraintes différentes. En continu, ArcelorMittal essaie d'améliorer la façon de les recycler pour augmenter la quantité valorisée.

### Situation début mai 2012

Nous pouvons classer les coproduits par rapport au lieu de leur recyclage :

1. Dans la pré-homogénéisation, avant d'être mis sur le tas d'homogénéisation (voir annexe 2 : procédé d'agglomération) :
  - Etincelles Fonte.
  - Etincelles Acier.
  - Poussières de gaz.
  - Nettoyage.
  - Poussières diverses.
  - Boues Classificateur.
  - Boues fines d'aciérie (bas Zn).
  - Scories Mousseuses.
  - Laitier de débordement.
  - Réfractaires usagés : magnétiques et non magnétiques.
2. Une autre partie est mise directement sur le tas d'homogénéisation :
  - Battitures.
  - Calamines de Lorraine.
3. Recyclage directement sur les chaînes:
  - Boues fines d'aciérie : recyclage partiel uniquement durant les campagnes en ferrailles non galvanisées. Pendant les campagnes de ferrailles galvanisées, les boues ont une teneur en zinc élevée et elles ne peuvent pas être recyclées directement sur chaîne. Nous en profitons pour recycler les boues fines bas zinc restantes sur la pile pré-homogénéisée.
  - TLS (Top Layer Sintering, voir chapitre 4). L'objectif du TLS est principalement de pouvoir augmenter les recyclages des coproduits contenant des huiles (matières stockées pendant très longtemps), comme par exemple les Boues Grasses de Laminoir (BGL). Cependant, ce recyclage cause beaucoup de problèmes qu'il faut solutionner.
4. Recyclage au broyage charbon (à Matagglo)
  - Les BGL y sont aussi recyclées (injection dans le haut fourneau avec le charbon).

### Perspectives du stage

Amélioration et augmentation des recyclages problématiques :

- Dans le cas des fines réfractaires, nous voulons voir leur impact sur la qualité.
- Dans le cas du TLS, nous voulons éliminer les écarts des analyses réelles et théoriques qui nous affectent directement sur notre prédiction et, de plus, sur la qualité. Pouvoir prévoir la composition chimique avec précision peut nous permettre d'anticiper des problèmes de qualité ainsi que recycler plus.
- Nous voulons aussi augmenter la consommation de recyclages mis directement sur le tas d'homogénéisation, tels que les calamines externes (de Liège, autres usines de Lorraine et des aciéries électriques). Pour cela il faut étudier leurs impacts et la façon de les recycler (voir chapitre 5: recyclage des calamines).

- Dans le cas des boues fines d'aciérie pressées, nous voulons optimiser le recyclage des boues de basse teneur en zinc et réussir à consommer celles qui pour l'instant sont stockées et qui ont une teneur en zinc plus élevée (ce point ne fait pas partie du rapport du stage).
- Par rapport aux laitiers du Puytouck, il faut savoir qu'anciennement il y avait une séparation granulométrique du laitier en différentes piles. La partie la plus petite était recyclée dans le tas d'homogénéisation, et la partie plus grossière était utilisée dans l'aciérie. Suite à une décision de ne plus recycler la partie grossière à l'aciérie, celle-ci a été stockée. L'idée est de commencer à déstocker la partie la plus grossière du laitier du Puytouck dans le TLS et sur chaîne.

Avec l'augmentation des recyclages, il faut aussi étudier les problèmes de flux matières, parce que la capacité de stockage est limitée. Le recyclage des différents coproduits doit donc parfois être adapté en fonction de cet aspect.

## 3 Recyclage des fines réfractaires

### 3.1 Cas d'étude

Les fines réfractaires du convertisseur sont des coproduits qui proviennent des réfractaires utilisés dans le convertisseur pour garantir sa résistance à la fonte en fusion. Les réfractaires ont un point de fusion très élevé donc ils nous servent de protection. Les réfractaires sont changés régulièrement et la partie la plus fine est stockée pour pouvoir être recyclée. Tous ces réfractaires proviennent du convertisseur mais il y a une séparation des fines magnétiques et non magnétiques par rapport à la composition chimique.

Dans cette étude, l'objectif est de regarder si les fines réfractaires magnétiques et non magnétiques ont un impact sur la qualité de l'aggloméré. Il y a eu différents essais en introduisant ces coproduits dans la pile pré-homo et des problèmes de qualité de l'aggloméré ont été observés (bas indice de qualité). Il faut donc essayer de voir si c'est le fait d'introduire ces coproduits là qui a pu occasionner le problème, et si c'est le cas, voir pourquoi.

Au niveau de l'aggloméré, il y a plusieurs types de qualité :

- La résistance de l'aggloméré à froid (ISO): pour voir la résistance des matériaux et sa dégradation par choc.
- La résistance à chaud (RDI): pour voir la dégradation de l'aggloméré sous conditions de réduction.
- La granulométrie :
  - l'inférieur à 5 mm.
  - le supérieur à 40 mm.

La qualité sur laquelle nous avons eu de soucis est sur la résistance de l'aggloméré à froid.

L'étude que nous avons réalisée nous oriente l'effet de la résistance des matériaux et sa dégradation par choc. Pour mesurer cela on utilise un indice appelé ISO. Ce test est normalisé dans la Norme ISO 3271 (1995).

Il a pour but de déterminer :

- L'indice de cohésion, mesure de la résistance du matériau à la rupture ou à la dégradation par choc et abrasion. Il est exprimé en pourcentage de la fraction de > 6.3 mm.
- L'indice d'abrasion, mesure de la dégradation du matériau par abrasion. Il est exprimé en pourcentage de la fraction < 0.5 mm.

Pour avoir une idée, la valeur ISO à Dunkerque doit être supérieure à 80.8 %.

Nous pouvons analyser les différents effets (positifs et négatifs) d'une grande partie des variables qui jouent un rôle sur la qualité de l'aggloméré, tels que:

- Mélange des composants qui constituent le tas.
- Hauteur de couche de la chaîne : il y a une relation entre la hauteur et le temps de cuisson. l'objectif est d'arriver au bout de la chaîne avec toute la couche cuite. Donc si on augmente la hauteur de la couche on doit régler la vitesse de chaîne, la dépression sous couche, l'enfoncement des herses...
- Le débit des fines de retour, c'est la quantité de fines (aggloméré <5mm) réintégrée au process. Plus on a des fines, plus la perméabilité augmente.
- L'indice de basicité : plus il diminue, plus il y a de silice par rapport à la chaux, et plus on produit de laitier.
- L'enfoncement des herses : plus l'enfoncement est grand, meilleure est la perméabilité, mais il faut faire attention, la perméabilité doit être correcte parce si le mélange est très perméable la cuisson se fait vite, ce qui impact la qualité.

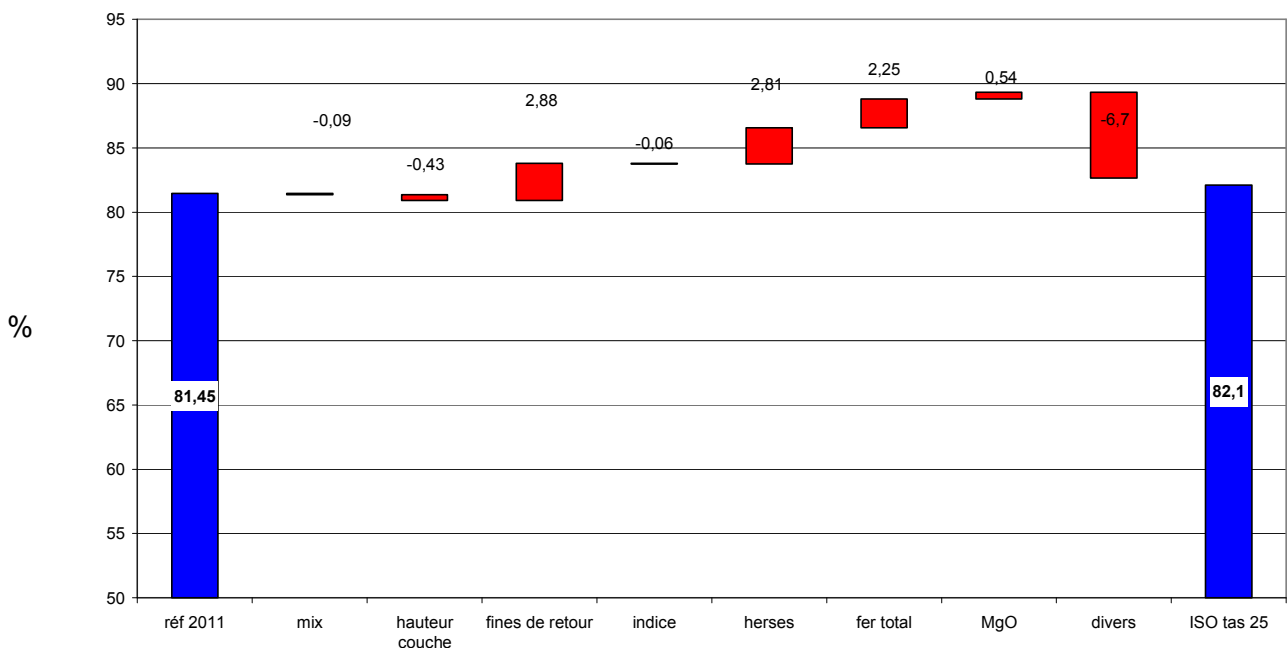
- Le fer total : élément principal de l'acier, on regarde sa teneur. Plus on a de fer, meilleure pour la qualité de l'acier.
- Le manganèse : élément qui occasionne des problèmes à l'aciérie par rapport aux différentes nuances de l'acier.
- Consommation de combustible : peut affecter la qualité parce que plus il y a de combustible plus on forme du  $Fe^{2+}$  (fer pré-réduit).
- Productivité (en T/m<sup>2</sup>) : en général, à forte productivité, l'indice de qualité devient juste et, à faible productivité le > 40 mm augmente.
- Taux de marche : plus il est élevé, plus la production de la chaîne est importante et donc cela permet d'avoir de la marge et donc de pouvoir faire plus de réglage process.
- Vitesse chaîne : elle est liée à la perméabilité, donc elle dépend de la hauteur de couche et de l'enfoncement des herses. De plus, le fait que la chaîne soit ralentie occasionne des soucis granulométriques.

Pour pouvoir mesurer qualitativement tout ça on prend comme référence la valeur moyenne de la qualité de l'aggloméré de l'année 2011.

D'ailleurs, il y a d'autres variables pour lesquelles on ne peut pas mesurer les effets. C'est le cas des recyclages qu'on veut analyser, mais aussi des nouveaux minerais.

Ces impacts sont analysés sous la forme suivant :

**Analyse des écarts ISO tas 25 et référence 2011**



**Figure 4.** Exemple d'étude ISO

Dans le graphique ci-dessus, on peut voir les différents impacts qui jouent un rôle dans le test de qualité ISO.

### 3.2 Résultats et discussion

Nous allons voir les résultats obtenus sur l'impact du recyclage des fines réfractaires magnétiques et non magnétiques du convertisseur.

Dans le tableau suivant on peut voir un résumé des piles qui ont été analysées avec tous les tonnages des coproduits qui constituent chaque pile. On observe que dans des piles 75, 76, 77, il y a les fines magnétiques et non magnétiques et dans les piles 72, 77, 78 il y a des boues d'aciérie introduites pendant des campagnes ferrailles zinguées à l'aciérie.

**Tableau 1.** Proportion en recyclages

	PH71	PH72	PH73	PH74	PH75	PH76	PH77	PH78 *	PH79
<b>Boues Aciérie Pressées</b>	0	<b>5%</b>	0	0	0	0	<b>2%</b>	<b>1.35%</b>	0
<b>Fines réfractaire non magnétiques</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0.62%</b>	0	0
<b>Fines réfractaire magnétiques</b>	0	0	0	0	<b>2.73%</b>	<b>6.1%</b>	<b>0.96%</b>	0	0
<b>Laitier du Puytouck</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>10.3%</b>

\* pile 2 fois plus petite que le reste

Pour faire cette étude nous avons pris les valeurs de la hauteur de couche, débit des fines de retour, indice de basicité, enfoncement des herses, composition de fer total et de manganèse pour chaque consommation de tas ainsi que la valeur ISO obtenue. En prenant comme référence l'année 2011, et en utilisant comme document de base un fichier Excel avec les différents impacts standard de l'ISO nous avons pu voir les effets des variables connues. La différence entre la valeur ISO du tas qu'on analyse et la somme de tous les effets des variables connues, nous donne l'effet des variables inconnues.

Pour pouvoir diminuer l'impact occasionné par les arrêts de chaîne et problèmes de fonctionnement, on a recalculé l'analyse avec les valeurs moyennes de la hauteur de couche, débit des fines de retour, enfoncement des herses filtrées à < 95% de taux de marche. Cela nous permet de ne conserver que les données en marche stable.

Nous observons qu'il y a plus d'effets négatifs inconnus les semaines où l'on a mis les fines réfractaires.

**Tableau 2.** Effets inconnues.

Tas Homog	Pile Pre-homog	ISO standard	Production (T/m2)	Effets inconnus (dont possible effet des réfractaires)
21	PH71	81,60	45,26	-6,30
22	PH72	80,60	36,74	-5,50
23	PH73	81,10	36,27	-6,10
24	PH74	81,30	37,63	-5,90
25	PH75	82,10	41,6	-6,70
26	PH76	80,80	35,0	-7,40
27	PH77	80,60	36,15	-6,00
28	PH78	81,00	33,40	-1,80
29	PH79	80,10	38,07	-4,00

Comme nous l'avons vu précédemment, il y a une relation entre productivité et qualité. Cet actionneur n'est pas le plus impactant ni le seul. En effet, le tas 25 a un ISO très élevé malgré la forte productivité. Déterminer l'impact des coproduits mis en faible quantité va donc être difficile.

On a réalisé différentes modifications sur l'étude ISO standard de l'usine pour essayer de réduire les impacts des effets inconnus. L'effet du combustible (charbon) ainsi que des minerais utilisés récemment n'étaient pas pris en compte. Ils ont donc été intégrés. Pour cela nous avons fait un bilan de toutes les études disponibles sur Dunkerque et nous avons intégré les différentes données dans le fichier de calcul.

Avec cette étude plus détaillée des impacts, on obtient les résultats suivants :

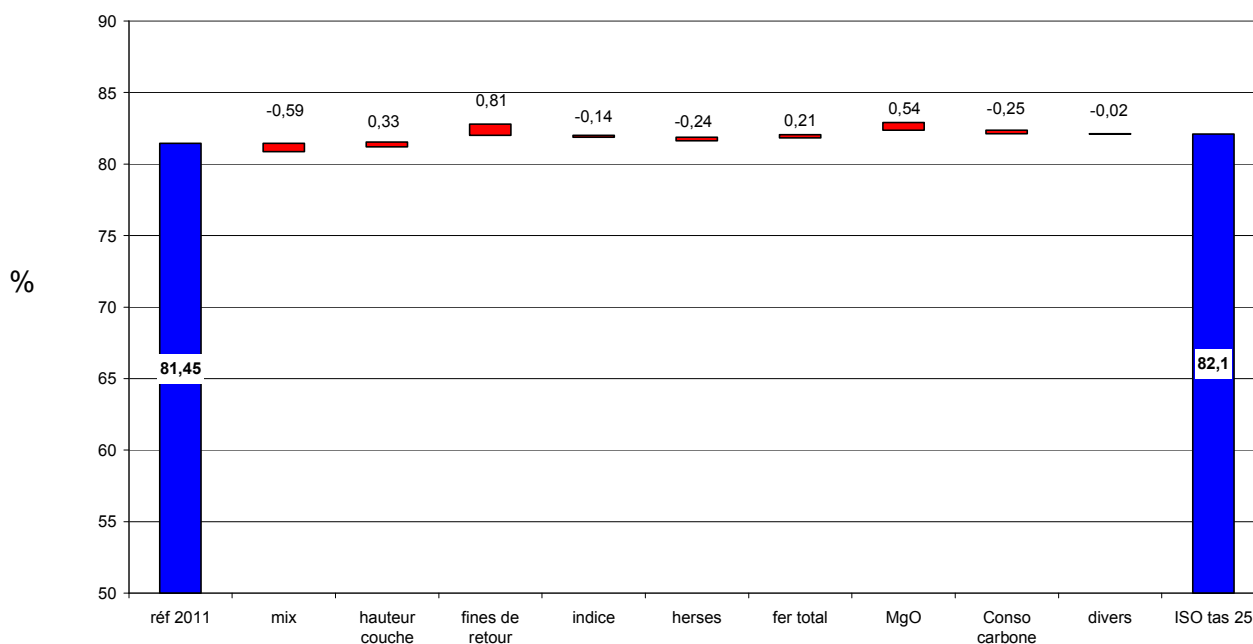
**Tableau 3.** Amélioration des écarts des effets inconnus.

Tas	Pile	effets inconnus avec ISO standard	effets inconnus avec ISO modifié
21	PH71	-6,30	-0,63
22	PH72	-5,50	-2,25
23	PH73	-6,10	-1,50
24	PH74	-5,90	-0,35
25	PH75	-6,60	-0,02
26	PH76	-7,40	0,55
27	PH77	-6,00	-0,14
28	PH78	-1,80	-2,76
29	PH79	-4,00	-3,20

Il y a donc une diminution des effets inconnus (sauf dans l'étude ISO du tas 28). Cela nous permet d'avoir moins d'interférences et aussi d'être plus proche de voir le possible effet des fines réfractaires.

Sur le tas 25 la bonne valeur d'ISO s'explique par les effets positifs, plus importants que les effets négatifs (exemple les fines de retour, la teneur en fer, la magnésie...) comme on peut voir sur la figure 5.

**Analyse des écarts ISO tas 25 et référence 2011**



**Figure 5.** Étude ISO standard correspondant à l'aggloméré obtenu du tas 25



Si nous analysons les tas 25,26 et 27 (qui contiennent des fines réfractaires), nous pouvons dire que :

- Sur le tas 25
  - L'ISO était meilleur que les autres : grâce principalement à un impact positif de la hauteur de couche, des fines de retour, du manganèse, ainsi qu'une meilleure teneur en fer.
  - Les effets divers sont presque nuls et il peut y avoir une compensation entre les différents effets (positifs et négatifs) des minerais inconnus ainsi que des autres recyclages.
- Sur le tas 26
  - L'ISO diminue de 1.3% par rapport à l'ISO précédent. Cet effet est principalement due à l'ajout des minerais (notamment le Sera Azul, nouveau minerai de fer utilisé en quantité importante), et dans une petite partie à l'effet des herses et de la consommation du carbone.
  - On observe un effet positif qui peut être à cause de l'effet des minerais et recyclages
  - Le fait d'avoir doublé le tonnage en fines réfractaires magnétiques de la pile 75 à la 76, ne nous montre pas une influence négative directe sur les effets divers.
- Sur le tas 27
  - L'ISO est assez bas, comme dans le tas précédent, mais dans ce cas là, c'est principalement à cause de la hauteur de couche, et dans une petite partie les minerais connus, les herses et la consommation du carbone.
  - En prenant des données de taux de marche constante, on passe d'un impact positif à un impact négatif. Dans ce tas là, il peut avoir aussi l'influence des boues d'aciérie.

D'ailleurs, on observe que sur les tas 22 et 28 qui ne contiennent que des boues fines d'aciérie, les effets divers sont de -2.25% et -2.76% respectivement. Cet effet peut être à cause de l'introduction des boues fines d'aciérie mais aussi des autres recyclages et des minerais.

- Sur le tas 22
  - L'ISO était de 80.6% principalement à cause de l'impact négatif des minerais et recyclages inconnus ainsi que du mélange des minerais connus et de l'enfoncement des herses.
- Sur le tas 28
  - L'ISO était de 81% principalement à cause de l'impact négatif minerais et recyclages inconnus ainsi que de la hauteur de couche et dans un moindre mesure aux minerais connus.

Nous pouvons voir aussi qu'avec le tas 29, qui contient 10% de recyclage du laitier du Puytouck, on a -3.2% de diminution de l'ISO.

Nous pouvons conclure que :

1. Soit les fines magnétiques ont un impact masqué par l'impact d'autres minerais et recyclages. Dans ce cas là, si elles ont un impact masqué, cela implique que l'impact des autres minerais et recyclages est plus important.
2. Soit elles ont un impact négligeable (peut être car les quantités utilisées sont faibles). Dans ce cas, pour aller plus loin, nous pouvons regarder l'impact des fines réfractaires sur la chimie du pré-homo mais aussi l'impact de toute la pile de pré-homo contenant les recyclages sur la chimie du tas :

a) Influence de la chimie des fines réfractaires sur la chimie du pré-homo

**Tableau 4.** Influence des fines réfractaires

	Fines réfractaires magnétiques	PH 75	
		sans fines	avec fines
<b>Fe T</b>	27,440	47,386	46,833
<b>SiO2</b>	8,207	7,490	7,510
<b>CaO</b>	22,948	12,431	12,723
<b>MgO</b>	<b>6,967</b>	2,511	2,635
<b>Zn</b>	0,022	0,045	0,045
<b>S</b>	0,088	0,271	0,266
<b>% de fines</b>	2,77		

Nous pouvons voir que la qualité de la pile de pré-homogénéisation est légèrement moins bonne en ajoutant les fines réfractaires. Il y a une diminution de l'ordre d'un 1.2% de Fer. D'autre part la Magnésie augmente de 5% avec l'ajout des fines réfractaires. Ce point doit être suivi afin de ne pas dépasser les limites dans l'aggloméré.

b) Influence de la chimie de la pile pré-homo sur chimie du tas

**Tableau 5.** Influence du pré-homo

	PH75	TAS 25	
		sans PH	avec PH
<b>Fe T</b>	46,833	54,372	53,960
<b>Sio2</b>	7,510	4,495	4,660
<b>CaO</b>	12,723	7,156	7,460
<b>MgO</b>	<b>2,635</b>	0,948	1,040
<b>Zn</b>	0,045	0,004	0,006
<b>S</b>	0,266	0,026	0,039
<b>% de PH</b>	5,47		

Nous pouvons voir que la teneur du tas est modifiée : diminution de 0.76% du Fer et augmentation de 10% Magnésie. Il faut savoir que la variation de la teneur en Magnésie apportée par les fines réfractaires est de 0.5% sur la totalité du tas.

Nous ne pouvons pas conclure que le fait d'introduire les fines réfractaires en faible quantité (0.15% sur la totalité du tas) peut avoir un impact direct sur la qualité de l'aggloméré. Il y a un impact inconnu liée aux minerais et aux recyclages mais dont on ne connaît pas la proportion. Pour l'instant nous savons que l'on peut continuer en recyclant les fines réfractaires à cette quantité là.

## 4 Recyclage du mélange TLS (Top Layer Sintering)

### 4.1 Cas d'étude

Le TLS est un système d'agglomération de la couche supérieure permettant le recyclage de coproduits. Les polluants et les matières huileuses présents dans les fumées de la couche supérieure sont obligés de passer dans la couche inférieure où ils sont détruits dans le front de flamme à 1300 °C. Le système TLS permet donc recycler des matières à forte teneur en huiles sans risque dans les électrofiltres. Ce système est intéressant car il y a des stocks importants et anciens présents sur le site (boues grasses de laminoir).

Le mélange TLS utilisé est constitué principalement de BGL et de fines de retour, mais il peut y avoir aussi du laitier de débordement, des poussières de gaz, du nettoyage, des boues pressées aciérie et de la castine. On veut essayer de mettre aussi le laitier du Puytouck pour maximiser les recyclages et pour économiser de la castine et de l'olivine.

Cependant, après le démarrage de la consommation du TLS il y a eu différents soucis : d'un côté, l'augmentation des émissions poussières en cheminé dépassant la limite environnementale (ce point ne fait pas partie du sujet du stage), d'un autre côté de grands écarts entre la composition chimique prévue et réalisée du TLS. Nous avons réalisé une étude pour trouver les causes de ce dernier phénomène et aussi pour pouvoir avoir un modèle de prédiction représentatif.

Pour réaliser le calcul de la composition chimique du TLS théorique, nous avons créé un fichier Excel. Ce fichier nous permet aussi de suivre tous les mix TLS et leurs écarts par rapport aux analyses théoriques et réelles du mix.

Pour faire cela, nous avons besoin des compositions chimiques de chaque coproduit ainsi que son pourcentage massique dans le TLS. Les compositions chimiques sont issues d'analyses faites sur les différentes matières par ArcelorMittal. Le pourcentage massique est ajusté régulièrement en fonction des contraintes chimiques.

Premièrement nous avons pris la moyenne de toutes les analyses 2012. Nous avons vu que dans cette moyenne-là il y a un écart moyen de 8% sur le fer par rapport aux valeurs réelles. Ce pourcentage est élevé par rapport à la charte de qualité. On travaille dans une échelle industrielle (de l'ordre de grandeur de milliers de tonnes par semaine) et ce pourcentage de 8% implique beaucoup d'erreur de prévision.

Nous avons essayé de prendre une moyenne des analyses chimiques des coproduits sur un mois : le mois avant de la constitution de chaque pile de TLS. L'objectif étant d'avoir des analyses moyennes plus proches de la composition des matières.

En faisant cela, nous avons vu que dans 62% des fois on diminue cet écart. Cependant, il faut savoir que l'amélioration n'est que de 0.98% de fer (en moyenne), ce qui reste faible. Donc nous avons pu obtenir des améliorations mais on n'arrive pas à notre objectif. Le problème vient d'autre part, et pour le solutionner, nous avons analysé les possibles causes de la variabilité. Ce point est détaillé dans la partie résultat.

## 4.2 Résultat et discussions

### 4.2.1 Analyse générale

Nous avons fait une étude plus détaillée des écarts réels et théoriques des différents composants chimiques. Dans les graphiques suivants on peut voir pour chaque élément chimique l'évolution des écarts par rapport aux différents mélanges TLS.

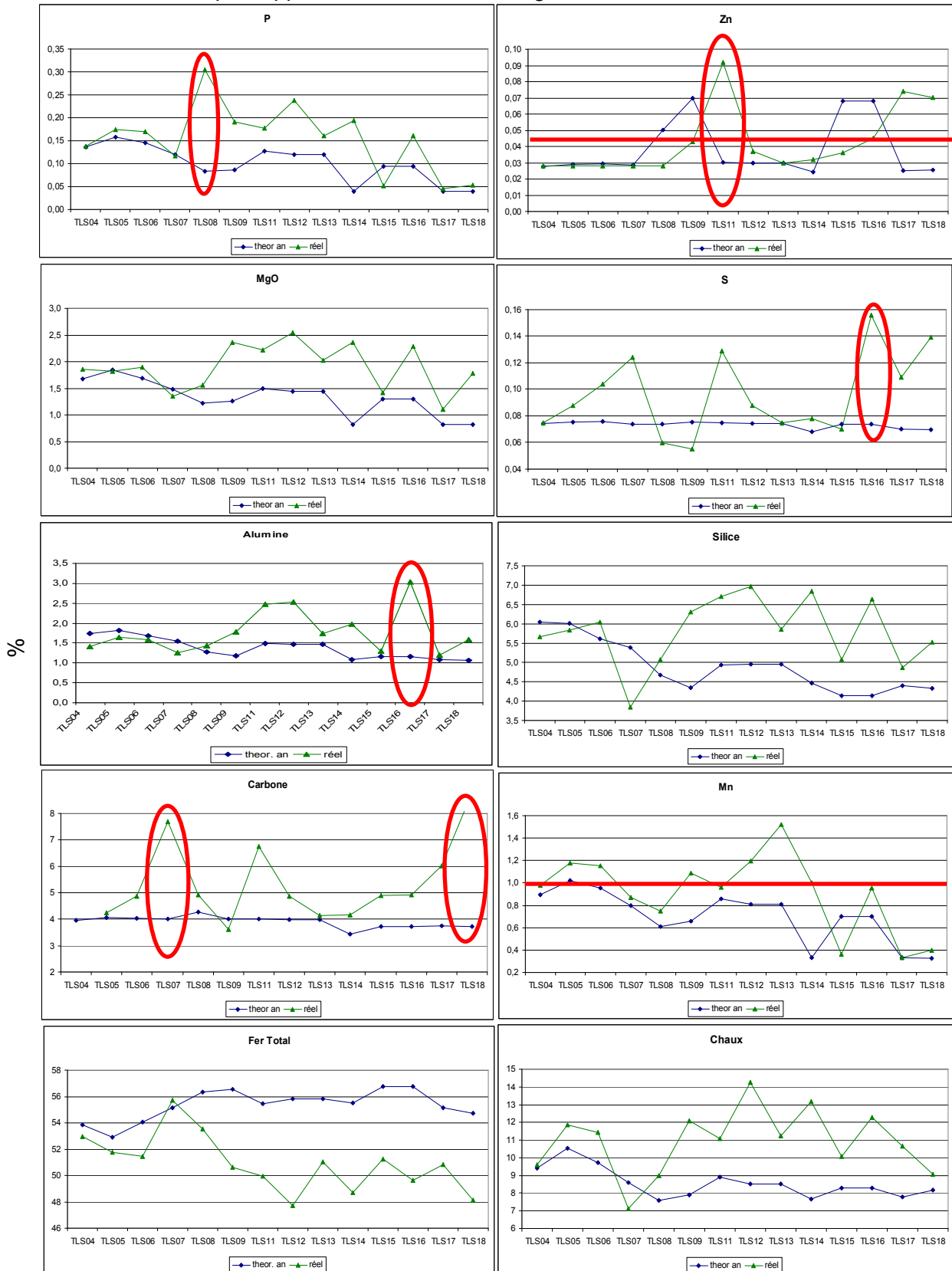


Figure 6. Évolution des écarts des différents composants chimiques.

Les lignes rouges du Zn et Mn représentent le seuil maximal qui ne doit pas être dépassé.

Comme on peut voir sur les graphiques précédents, il y a des pics remarquables par rapport à la composition du TLS. De plus, on peut voir aussi par rapport aux analyses d'alumine, de silice et de soufre, un pic sur le TLS 16. Cela peut être dû à des erreurs sur les mesures liées au fait qu'il n'y a qu'une analyse pour chaque mix TLS. D'ailleurs, les écarts de ces trois premiers TLS étaient moins variables que les suivants mais, il y a des écarts permanents que l'on doit analyser pour pouvoir les réduire. Il faut considérer que si l'on a des analyses réelles plus élevées que les théoriques, on peut dépasser les contraintes chimiques. Donc il faut toujours avoir des analyses théoriques majorantes.

Les écarts du phosphore, magnésie, alumine, chaux et manganèse peuvent être à cause du laitier de débordement, coproduit qui a la teneur la plus élevée de ces composants là. Le manganèse par contre a eu un écart depuis le début. Cela nous porte à penser qu'il y a des autres coproduits qui en contiennent. Par exemple les BGL et les fines HFX. En plus, l'analyse réelle du Mn a une teneur plus élevée que la théorique. Ça n'est pas bon d'un point de vue chimique parce que les analyses théoriques doivent assurer une marge de sécurité pour ne pas dépasser les contraintes.

Par rapport au zinc, il y a d'un côté un pic qui semble être décalé (mauvaise base de données des analyses théoriques) et d'un autre côté un incrément de l'écart sur les derniers mix TLS. Cela peut être parce qu'on a mis des boues fines d'aciérie (TLS 15 et 16), composant qui contient le plus de zinc. Les valeurs de zinc réelles des deux derniers TLS peuvent aussi être élevées à cause de l'introduction d'une castine avec une teneur plus élevée en zinc.

Le carbone a aussi des pics qui peuvent être en grande partie dus à des erreurs de mesure. La possible variation du carbone peut être liée aussi au process et à la variabilité du combustible utilisé sur les hauts fourneaux. En effet, le recyclage qui a plus de carbone est les poussières de gaz des hauts fourneaux. Cependant, l'impact des poussières des hauts fourneaux ne peut pas être aussi fort que observé dans les TLS 07, 11 et 18. Il y a donc des influences inconnues. Tous les coproduits n'ont pas des analyses régulières de carbone. Il faut donc analyser le carbone sur chaque coproduit.

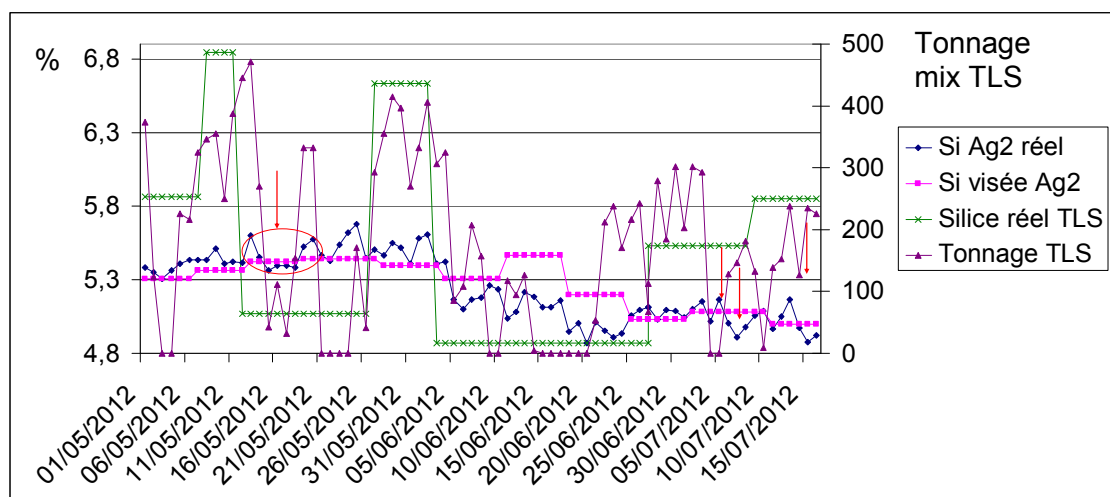
Nous pouvons voir que la teneur en fer réelle est plus basse que prévue. C'est parce que toutes les analyses réelles des autres composants qui constituent le TLS sont plus hautes que les analyses théoriques. La teneur en fer est importante d'un point de vue chimique pour pouvoir obtenir de l'acier de bonne qualité donc il faut diminuer cet écart. Pour cela il faut que les analyses théoriques soient proches des analyses réelles.

Dans le cas de la silice, nous pouvons voir trois pics des analyses réelles correspondants aux TLS 07, 14 et 16. Il doit y avoir plus de silice dans le laitier de débordement et le nettoyage que prévu. De plus, on a vu que sur la chaîne d'agglomération qui contient le TLS, il y a un écart par rapport à la silice, qui n'existe pas sur l'autre chaîne. Donc, le comportement du TLS sur cette chaîne a été étudié pour voir s'il est vraiment la cause de cet écart.

#### **4.2.2 Analyse spécifique silice**

Dans la figure 7, nous pouvons voir la teneur en silice réelle de chaque TLS et la silice réelle de la chaîne d'agglomération (donnés avec l'échelle principale). De plus, il y a la silice visée pour chaque journée (échelle principale aussi) et après il y a le tonnage (échelle secondaire).

On peut voir qu'au début mai, la valeur de silice visée dans l'agglomération était de 5.3 et la valeur réelle de la silice du TLS était de 5.9. Par conséquent, si la quantité du mix TLS introduit sur chaîne est élevée (350 T), la silice de l'agglomération sera plus élevée, le mix TLS n'étant pas pris en compte dans le fichier de calcul de tas.



**Figure 7.** Effets de la variation de la teneur en silice.

Si la silice réelle du mix TLS est plus faible que la silice visée de l'aggloméré, l'ajout du mix TLS provoquera l'effet inverse. Dans toutes les cas, le mélange TLS impacte la teneur en silice de l'aggloméré, en fonction du tonnage consommé.

Nous observons ce comportement sur la figure 7 à l'exception de la période signalée en rouge due à d'autres phénomènes (les minerais mis dans le tas d'homogénéisation n'ont peut être pas la teneur prévue à cause d'une mauvaise mélange et il y a plus de silice qui est consommé cette journée là). Dans le tableau 6, nous pouvons voir une estimation de l'impact du TLS dans la chaîne d'agglomération :

**Tableau 6.** Variations chimiques par rapport à l'ajout du TLS.

%	Fe T	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Mn	P	Zn	S
Δ TLS 18	-0,715	0,037	0,028	-0,013	0,045	0,006	0,002	0,004	0,009
Δ TLS 19	-0,704	0,060	0,013	-0,001	0,048	0,005	-0,001	0,007	0,009
Δ TLS 20	-0,550	0,067	0,007	0,016	0,026	0,009	-0,007	0,003	0,006

Nous pouvons voir qu'il y a aussi des écarts par rapport au fer total, de -0.7% approximativement, et cela affecte la qualité de l'aggloméré. La silice qui régule la basicité de l'aggloméré impacte également la qualité. Donc la silice est un paramètre important à maîtriser.

Avec le recyclage actuel on est dans la limite de la charte qualité de l'aggloméré lorsque l'on met du TLS et ça nous permet de valoriser 80Kg de déchets par tonne d'aggloméré.

## 5 Recyclage des calamines

### 5.1 Cas d'étude

Les calamines sont un coproduit qui provient de la phase de laminage de l'acier dans le train continu à chaud. Pour l'instant il est possible de recycler les calamines produites à Dunkerque (battitures) et les calamines de Florange, mais l'objectif de cette étude est de valoriser des calamines d'autres sites. On récupère des calamines de Liège, des autres usines de Lorraine, et des aciéries électriques. Elles ont une nature très différente parce que le processus d'obtention de l'acier n'est pas du tout le même donc, nous devons trouver la meilleure façon pour les recycler. Nous devons optimiser la quantité pour ne pas dépasser les contraintes chimiques de l'acier. Comme ça nous pouvons changer ses propriétés physiques qui ne sont pas en concordance avec les spécifications du client.

Dans l'étude de recyclage des calamines il faut prendre en compte qu'elles ont une forte teneur en matière organique ainsi qu'en éléments résiduels, tels que le Cu, Cr, Ni, Mo, V et Sn.

La matière organique pose de problèmes sur les électrofiltres (encrassement, perte d'efficacité, augmentation des rejets et risque d'incendie). Elle est présente dans les déchets du TCC parce que l'huile est essentielle pour pouvoir faire le laminage de l'acier (bon fonctionnement des rouleaux, contrôle de la température, etc.).

Les métaux résiduels ne posent pas de problèmes dans la qualité de l'agglomère mais, par contre, il faut faire attention parce que si dans l'aggloméré on ne contrôle pas la quantité de ces éléments, il y aura des problèmes de qualité sur l'acier. Les métaux résiduels sont des éléments qui ne réagissent pas, il est difficile de les oxyder, donc ils sont conservés dans tout le processus de production. Les deux résiduels les plus critiques sont à priori le Cr et Cu. Le V peut l'être aussi.

#### 5.1.1 Etude initiale

Premièrement, nous avons voulu voir l'impact (de manière majorante) des métaux résiduels des calamines sur la fonte pour voir à priori s'il est intéressant de les suivre ou pas; Nous avons fait différentes hypothèses et scénarios possibles.

Hypothèses générales :

- La teneur en eau, en l'absence d'analyse, est considérée à 0% (le plus restrictif).
- Analyses de référence de l'année 2011 comme analyses valides, mais il faut savoir que ces analyses ne sont pas précises.
- Tous les métaux résiduels vont dans la fonte (aucune oxydation).

Hypothèses particulières :

Scénario 1 : tonnage à recycler en septembre 2012 (déstockage).

1000 t/semaine de calamines de Lorraine

1000 t/semaine de calamines de Liège

1000 t/semaine de nouvelles calamines (groupe 1 : première sélection des calamines qui sont de nature similaire)

Scénario 2 : tonnage à recycler à long terme réaliste (estimation de consommation réelle).

500 t/semaine de calamines de Lorraine

250 t/semaine de calamines de Liège

320 t/semaine de nouvelles calamines

Scénario 3 : tonnage à recycler à long terme potentiel (estimation de consommation maximale).

500 t/semaine de calamines de Lorraine

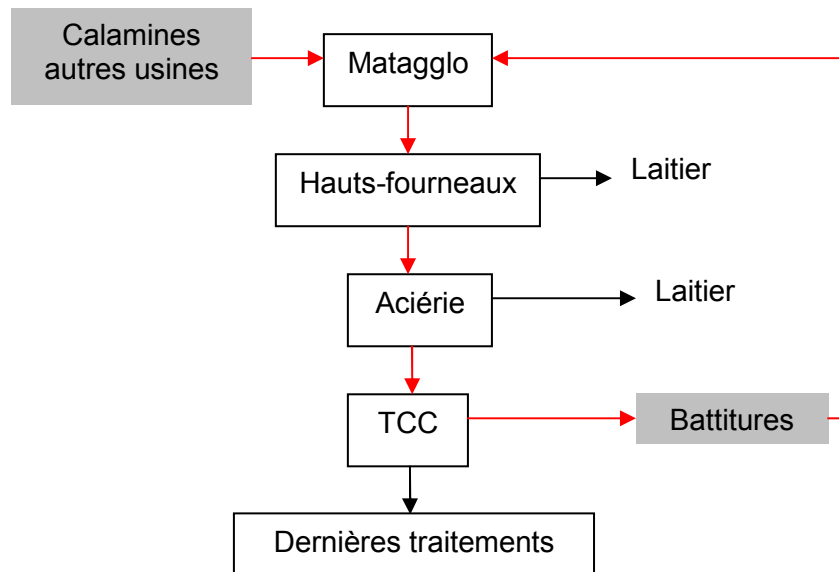
250 t/semaine de calamines de Liège

2000 t/semaine de nouvelles calamines

### 5.1.2 Etude détaillée

Le but de cette étude est de connaître tous les apports possibles des métaux résiduels dans tout le procédé de fabrication de l'aggloméré (voir annexe 2) jusqu'à l'obtention de l'acier ainsi que pouvoir faire une prédiction de la quantité de calamines qu'on peut mettre dans la pré-homogénéisation en fonction des limitations en résiduels de la fonte obtenue. Pour cette dernière partie, on a fait un benchmark en demandant les méthodes de recyclage des calamines dans d'autres usines, ainsi qu'en demandant les problèmes par rapport aux limitations du cuivre dans les nuances plus restrictives de l'acier.

Voici un petit schéma pour comprendre le chemin des métaux résiduels que nous devons suivre.



**Figure 8.** Circuit des métaux résiduels.

#### Benchmark

Dans le benchmark que nous avons réalisé sur d'autres usines sidérurgiques (Lorraine, Espagne ...), nous avons trouvé différentes choses à prendre en compte :

##### 1. Sur les métaux résiduels :

- Sources (matières premières) :
  - Le Cr pénalise principalement la nuance plus restrictive.
  - Les sources principales de Chrome : Olivine (25%) et Carajas (5%).
    - Substitution de l'olivine par un autre apport de magnésie.
  - Les sources principales de Cu : Carajas (5%).
- Sources (coke) :
  - Il apparaît que la teneur en Cu (et en Cr notamment) des cendres ne peut être négligées.
- Sources (HF) :
  - Pertes thermiques : une corrélation entre la perte thermique et le cuivre existe : plus de perte donne plus de cuivre dans la fonte.
  - Le coefficient de partage fonte/laitier n'est pas nul pour le Chrome contrairement au Cu.
  - Une diminution de l'indice de basicité du laitier serait favorable à un transfert en métaux résiduels vers le laitier.
  - Pour l'essentiel, le Cu de la fonte vient de l'aggloméré.



- Aciérie
  - Certaines ferrailles ont un Cu à 0.018% et sont donc plus riches en Cu que la fonte. Leur impact doit être pris en compte.

## 2. Sur les huiles

- L'objectif est de consommer des huiles inférieures à un teneur de 0,5%. Entre 0,5 et 1%, des pénalités sont appliquées au fournisseur, et au-delà de 1%, les calamines ne doivent être plus acceptées.

### Méthodologie

#### 1. Demande d'analyses :

Pour faire le bilan des résiduels qui rentrent dans le tas d'homogénéisation, Nous avons regardé toutes les analyses (de l'année 2010 jusqu'à 2012) des minerais, des additifs et des recyclages. Pour cela il faut faire une sélection en effaçant toutes les anomalies qui peuvent perturber la réalité.

Pour pouvoir faire cette étude il faut avoir, premièrement, des analyses représentatives de toutes les calamines que l'on veut recycler, et aussi de tous les minerais et additifs utilisés dans le processus. Pour réduire la dépense, nous avons demandé aux laboratoires de faire les analyses des matières les plus importantes dont on ne connaît pas les résiduels. On a regardé surtout les matières premières qui apparaissent sur le benchmark ainsi que les matières qu'on consomme en grande quantité.

L'analyse des résultats obtenus nous permet de déterminer les matières qui contiennent le plus de résiduels:

- Les sources principales de Cr : les scories mousseuses (33%)\* et l'olivine (27%). Si on compare avec le benchmark, le Carajas passe d'un 5% à un 1%.
- Les sources principales de Cu : les calamines (23%), Carajas (11%) et battitures (10%).
- Les sources principales de Ni : l'olivine (70%).
- Mo : Sera Azul (16%) et après les calamines de Lorraine (10%).
- V : les scories mousseuses (19%), castine (6%) et le coke (5%).

\*pourcentage lié à la teneur en résiduels

Ces produits doivent être suivis en résiduels.

#### 2. Modèle prédictif :

Il faut savoir que chaque semaine il y a une constitution du tas, et chaque tas est différent en fonction de nos besoins. Notre objectif est de faire un modèle (de composition chimique) prédictif, de l'aggloméré et la fonte. Pour faire cela, nous nous sommes basé sur un document utilisé anciennement pour optimiser le calcul de tas. Aujourd'hui ce document n'est plus utilisé (parce qu'il y a un programme qui fait ces calculs) mais c'est un document qui prend en compte presque tous les paramètres.

Ce modèle doit être actualisé et adapté à son utilisation hebdomadaire. Pour intégrer les résiduels dans le logiciel (Excel), une modification des macros a du être faite :

- D'abord, nous avons dû comprendre son fonctionnement
  - On peut distinguer la partie des minerais et les recyclages qui constituent le tas (avec ces contraintes, etc.) ainsi que l'ajout du combustible et fondants nécessaires dans l'aggloméré et la fonte.
- Ensuite, nous avons actualisé toutes les analyses dans le fichier Excel.
- Après, nous avons modifié la macro de façon à intégrer huile et résiduels.

- Pour finir, nous avons fait des essais pour vérifier que ces changements sont corrects et ne modifient pas l'optimisation du tas.

### 3. Bilan en résiduels :

Nous avons réalisé un bilan massique des résiduels. Ce bilan a été divisé en deux parties :

- Partie agglomération :

Nous avons regardé l'apport en résiduels (g/tonne fonte) de toutes les matières qui rentrent dans le tas et la chaîne d'agglomération. Par rapport aux calamines, nous avons estimé le scenario 1, le plus immédiat qui doit être abordé en septembre. Les résultats sont présentes figure 10 chapitre 5.2.2.

- Partie fonte :

Nous avons regardé l'apport en résiduels (g/tonne fonte) des matières plus importants qui rentrent dans le haut fourneau.

À la sortie du haut fourneau on obtient de la fonte et du laitier. On doit connaitre le coefficient de partage de la fonte (variable en fonction des différentes conditions de température, temps de contact, additifs, etc.), pour pouvoir déterminer le bilan résiduel.

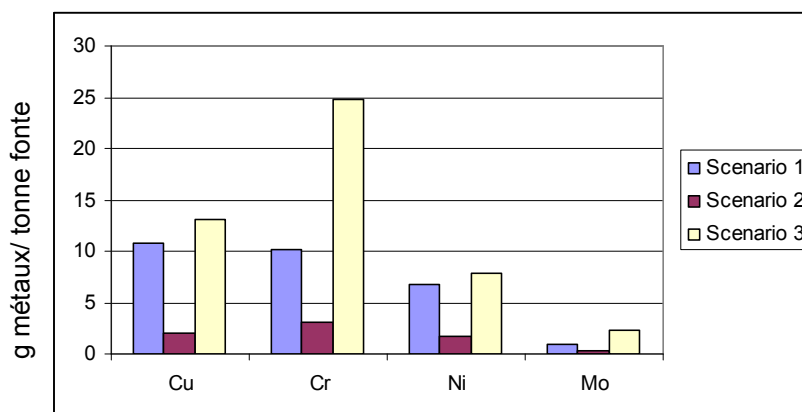
Pour l'instant, on ne peut pas déterminer ce coefficient de partage à cause des difficultés liées à la méthode d'échantillonnage du laitier. Le laboratoire d'analyse a travaillé pour le moment, avec des analyses du laitier broyé puis pastillé mais cette méthode ne permet pas de rendre les résultats sur les résiduels. Du coup, ils doivent essayer de faire des perles par fusion. D'autre part le laboratoire ne peut pas pour l'instant rendre de résultats sur le Mo car une courbe d'étalonnage doit être créée.

## 5.2 Résultat et discussions

### 5.2.1 Etude initiale

Cette étude est réalisée dans le cas la sortie des hauts fourneaux est de la fonte (pas de résiduels dans le laitier).

Avec ces premières estimations sur la base des analyses moyennes (voir chapitre 5.1.1), on obtient les résultats suivants :



**Figure 9.** Apport en métaux résiduels dans la fonte en recyclant des calamines.

On observe avec cette étude qu'on augmente la teneur en métaux résiduels de la fonte entre 0 et 25 ppm et que la fonte finale peut avoir au pire (cas du scenario 3) un incrément de 13 ppm en

Cu, 25 ppm en Cr, 8 ppm en Ni et 2 ppm en Mo. Sur les autres métaux (V et Sn) les analyses ne sont pas encore disponibles mais à priori cela ne semble pas avoir un impact important parce que le benchmark a montré que la partie qui peut poser des problèmes est l'ensemble Cu-Cr-Ni.

Après avoir montré cette étude à l'aciérie, nous avons conclu qu'à priori il n'y a pas de problèmes de consommation de ce recyclage dans le scénario 1 et 2 mais dans le scénario 3 il faut faire attention à une possible limitation par rapport au Chrome. Une étude plus détaillée est réalisée pour réaffirmer la possible consommation des calamines des scénarios 1 et 2 et voir les limites du scénario 3 ainsi que dans des situations plus spécifiques.

### 5.2.2 Etude détaillée

Compte tenu de la problématique d'analyses des résiduels sur le laitier, on a fait la même hypothèse. La fonte est la totalité des sorties des hauts fourneaux, donc tous les résiduels restent dans la fonte (situation majorante).

Après la réalisation de cette étude, on peut voir quelles sont les matières qui apportent le plus de résiduels :

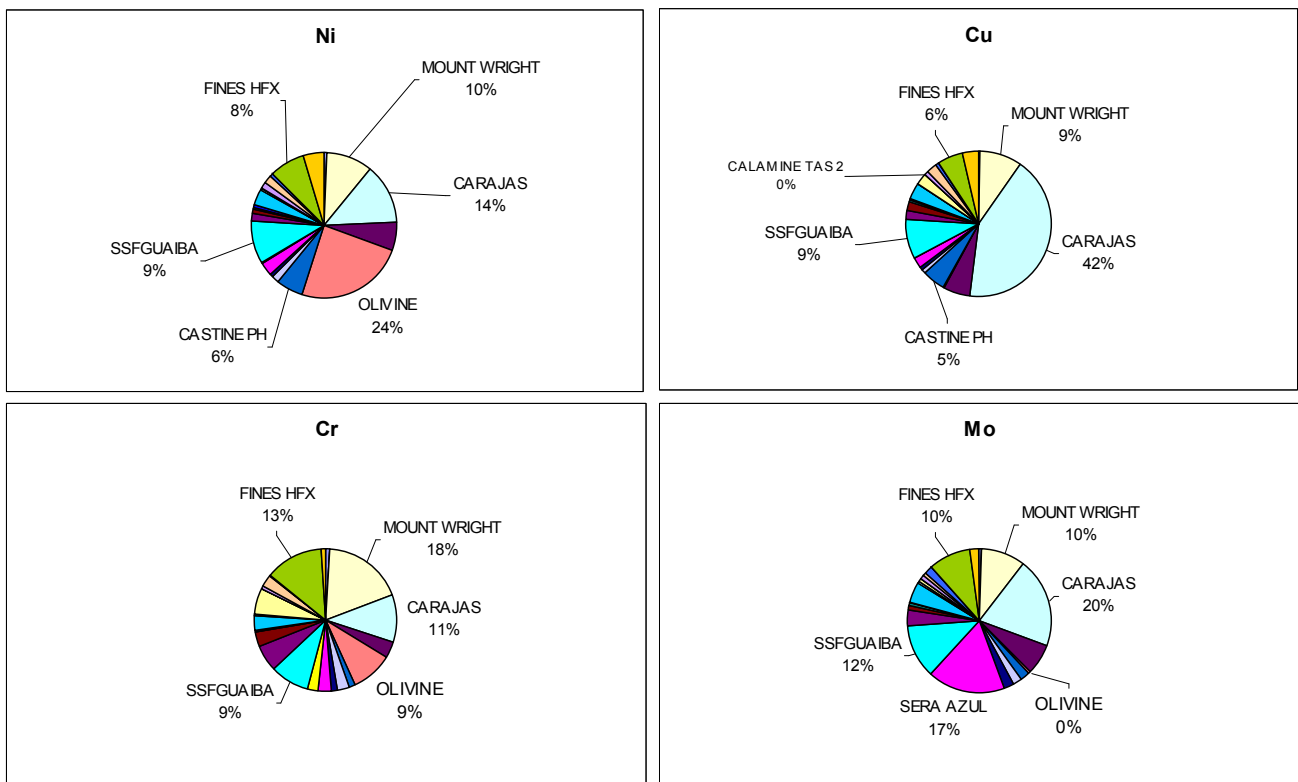


Figure 10. Apport en métaux résiduels des différentes matières.

Il faut savoir à priori, que ces matières, sauf les calamines, ne doivent pas causer des problèmes à l'aciérie si on les consomme dans les valeurs standards. C'est dans le cas d'une variation inhabituelle de la consommation des minerais qu'il faut faire attention.

En effet si l'on regarde la figure 10, on peut voir que l'Olivine est la principale source de Ni (24%) et une source importante de Cr (9%).

Le Carajas, comme on a vu dans le benchmark réalisé, est effectivement une source qui contient tous les résiduels en grande proportion. C'est le principal apport de Cu (42%) ainsi que de Mo (20%) et une source à considérer en Ni (14%) et Cr (11%).

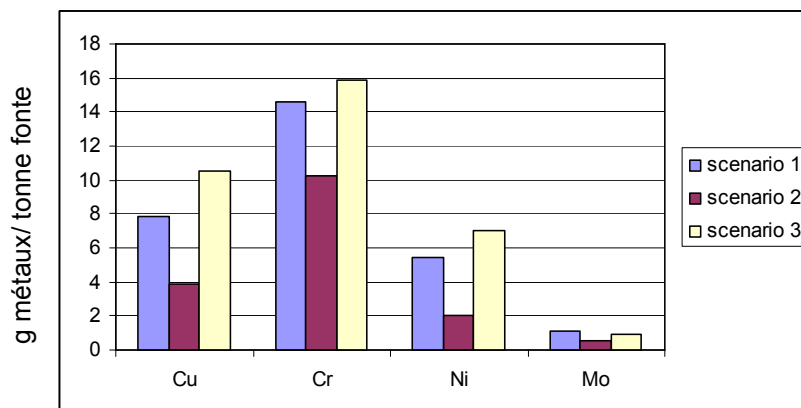
Un autre minerai de fer qui contient beaucoup de résiduels et nouveau à notre connaissance, est le Mount Wright, présent comme la source la plus importante en Cr (18%) et en une quantité égale ou supérieure à 9% dans les autres métaux résiduels.

Il faut signaler aussi que le Sera Azul apporte 17% du total de Mo et que le SSFG est un minerais de fer qui apport un pourcentage considérable en résiduels.

Les fines de retour nous donnent une idée de la quantité en résiduels de l'aggloméré par rapport au total des entrées.

### 1. Confirmation du recyclage des calamines dans les différents scenarios

Après une étude plus détaillée des entrées en résiduels : plus d'analyses (avec des valeurs d'humidité) et plus d'information par rapport aux limites imposées par l'aciérie, nous avons vu que dans les différents scénarii il n'y a pas de problème pour recycler la quantité prévue.



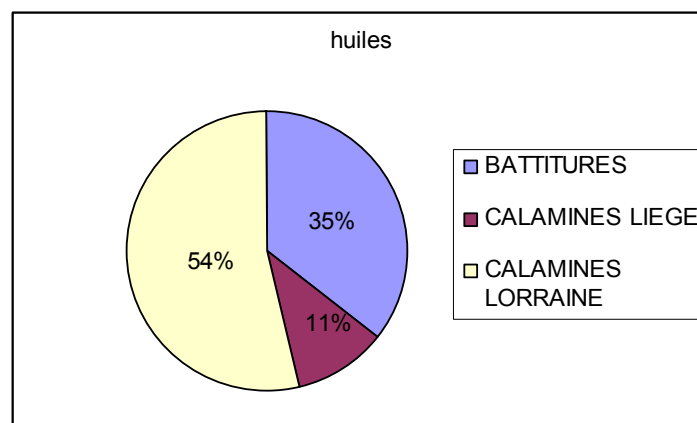
**Figure 11.** Apport en métaux résiduels dans la fonte par l'ajout des calamines.

On ne dépasse pas la limitation en résiduels mais par contre, on peut dépasser la limite de teneur en huiles. Des analyses en huile doivent être demandées pour les nouvelles piles.

### 2. Cas de ne recycler que les calamines de Liège et Lorraine (pas des nouvelles calamines dont on ne connait pas encore leurs teneurs en huiles)

Compte tenu des différentes contraintes, le maximum de battitures et calamines que nous pouvons mettre dans le tas est de 3,2%.

La limite est imposée par les huiles mais la limitation en chrome est très proche. Les battitures ont un teneur en huile élevée (40% de plus que calamines Lorraine). Cependant, compte tenu des tonnages, l'apport principal d'huile dans le mélange est du aux calamines Lorraine (54% des apports) :



**Figure 12.** Apport en huiles des différentes calamines.

Avant la mise en place des essais de recyclage des calamines, il faut :

- Avoir les analyses des huiles des piles qui vont être consommées.
- Optimiser le fichier Excel (une fois par semaine) avec les analyses actualisées tant pour les calamines que pour les autres matières (extraction automatique avec une macro).

Le fichier créé pendant le stage permet de voir :

- Quelle est la valeur limitante pour le recyclage (huiles ou métaux résiduels).
- Quelle est la matière qui a la teneur la plus élevée en ce composant là.
- Quelles sont les possibles modifications qui peuvent être réalisées sur les autres matières premières si l'on dépasse la limite (et si l'on veut recycler la même quantité).

Nous sommes donc arrivés à notre objectif. En réalisant le benchmark des autres usines et en cherchant les points faibles de la notre pour pouvoir les améliorer, nous avons pu optimiser la quantité de calamines à recycler. Nous avons fait un modèle adaptable aux différentes situations actuelles et futures.

Il reste cependant encore quelques faiblesses à solder :

- Compléter les analyses des additifs ajoutés directement dans les hauts fourneaux. Le benchmark à montré que ce n'était pas significatif mais il est nécessaire de vérifier ce point.
- Analyser régulièrement l'aggloméré sur les résiduels afin de vérifier que le bilan théorique calculé à partir des entrées est cohérent.
- Analyse du laitier (pour calculer le coefficient de partage).
- Effectuer différentes études du coefficient de partage en fonction de la température.

Avec les essais à réaliser en septembre on pourra renforcer le modèle et chercher des solutions viables d'un point de vue chimique et de qualité.

## 6 Conclusions et perspectives

### 6.1 Recyclages

#### 6.1.1 Fines réfractaires magnétiques

Nous avons étudié les impacts sur la qualité des nouveaux recyclages, notamment en fonction du tonnage à consommer.

Nous avons vu que :

- L'impact des fines réfractaires peut être masqué par l'impact d'autres minerais ainsi que d'autres recyclages. D'ailleurs, si vraiment ils ont un impact masqué, cela peut impliquer que les autres minerais ou recyclages ont un impact plus important.
- L'impact des fines réfractaires peut être négligeable parce qu'on les a mis sur le tas en faible quantité. Pour l'instant, les fines réfractaires peuvent être recyclées dans les quantités actuelles.

Il y a un impact inconnu lié aux minerais et aux recyclages mais dont on ne connaît pas l'importance. Pour pouvoir arriver à connaître tous ces impacts, on a besoin de beaucoup d'essais différents.

Solutions possibles :

- Réaliser des essais sur chaîne en introduisant le maximum des fines réfractaires possible (le calcul effectué indique une valeur de 11% dans la pile pré-homo par rapport à ses contraintes chimiques) et regarder l'impact sur l'ISO. Cela nous permettrait d'économiser 10% d'olivine et de réduire de 2% la teneur en Ni, car l'olivine est l'apport principal de magnésie et de Ni dans le tas (voir chapitre 5 : recyclage des calamines).
- Réaliser des essais sur une installation d'essais en faisant une représentation de la réalité avec les mêmes conditions de fonctionnement de la chaîne pour déterminer les différents actionneurs des nouvelles matières et des recyclages. Il est impossible de faire cet essai sur chaîne car il y a un risque pour la marche des hauts fourneaux et il y a toujours de réglage process qui ne permet pas de faire des comparaisons.

#### 6.1.2 TLS

Les écarts entre les analyses réelles et théoriques du TLS ont été réalisées et nous avons vu la possible origine de ces variations ainsi que les éléments sur lesquels il faut faire attention si la valeur théorique est moins restrictive que la réelle.

- Le TLS
  - Il est possible que, d'un point de vue chimique, le mélange TLS ne soit pas homogène.
  - S'il y a beaucoup d'écart, il est probable que l'échantillonnage n'est pas bien réalisé, il faut trouver une méthode de prise d'échantillons plus stricte pour avoir des valeurs plus représentatives.
  - Plus de précision avec le pesage. La constitution du mélange TLS doit être au moins majorante pour ne pas dépasser les contraintes chimiques.
- Les BGL
  - Il y a beaucoup de variabilité avec les valeurs obtenues des analyses.
  - Manque d'analyses ; il n'y en a que 5 pendant plus d'une demi-année.
  - Il peut y avoir de mauvaises prises d'échantillons aussi.

La solution pour optimiser les recyclages par rapport aux contraintes chimiques est de faire:

- Une analyse des BGL pour chaque tas de TLS, parce que les BGL proviennent d'un stock très ancien (depuis le démarrage du site) qui peut être très variable.
- Plus de deux analyses par mois du laitier de débordement.
- Plus d'une analyse par TLS déjà constitué. Ça nous donne plus de précision sur ce qu'on introduit sur chaîne. Pour faire cela, une étude de prélèvement du TLS plus exhaustive doit être réalisée. Pour l'instant, il n'y a qu'un échantillonnage chaque 2500 tonnes. Lancement d'un prélèvement toutes les 500 tonnes.
- Un mélange le plus homogène possible.
- Plus d'analyses sur le carbone et le zinc. Ces éléments ne sont pas analysés régulièrement sur tous les coproduits.
- Sur le cas spécifique de la silice, une intégration du TLS pour le calcul de tas doit être effectuée.

Après tout cela, il faudra faire une autre fois la comparaison entre les analyses réelles et théoriques et voir s'il y a une amélioration ou pas.

### **6.1.3 Calamines**

Nous avons regardé les origines des nouvelles matières à recycler pour pouvoir les classifier. D'ailleurs, on a vu l'impact chimique des huiles et des métaux résiduels sur la qualité. Nous avons fait un benchmark pour voir la méthode de recyclage des autres usines ArcelorMittal.

Nous avons pu optimiser la consommation des calamines dans un cas hypothétique et théorique qui pourra être complété dès que les analyses en résiduels du laitier et les analyses en huiles des nouvelles calamines seront faites. Nous avons vu que la limite de recyclage peut être liée aux huiles ainsi qu'aux métaux résiduels, en fonction du cas ou nous sommes. Il faut donc faire cette optimisation chaque semaine avec du fichier créé pendant le stage.

Les solutions d'amélioration pourront être proposées dès que les premiers essais de recyclage des nouvelles calamines seront réalisés en fin septembre.

## 6.2 Changements réalisés pendant mon stage

L'amélioration et l'augmentation des recyclages problématiques :

- Dans le cas du TLS, nous avons pu déterminer la problématique et voir la raison des écarts des analyses réelles et théoriques et ainsi faire des propositions d'amélioration pour les diminuer. Nous avons pu faire plus d'analyses du TLS réel et maintenant on fait un échantillonnage chaque 500T. Cette modification est très récente, donc on ne connaît pas encore si il y a des gains ou pas (très peu de valeurs pour pouvoir faire la comparaison).
- Nous avons augmenté la consommation de recyclages mis directement sur le tas d'homogénéisation, tels que les calamines de Liège et Lorraine, mais pas encore les calamines des autres usines (essai prévu en fin septembre). Nous avons fait un modèle prédictif en prenant en compte les matières avec plus d'influence et nous connaissons nos faiblesses qu'il faut perfectionner.
- Par rapport aux laitiers du Puytouck, nous avons commencé à déstocker la partie la plus grossière en reprenant son recyclage sur chaîne et sur le TLS.
- Dans le cas des boues d'aciérie pressés, nous avons optimisé le recyclage des boues de basse teneur en zinc et on a commencé à faire des analyses de piles historiques stockées.

## 6.3 Perspectives futures

De façon à augmenter encore le recyclage, il faut réaliser les propositions d'amélioration décrites précédemment sur les fines réfractaires. Les essais peuvent être réalisés sur la cuve d'essai aggro à Dunkerque.

Sur le TLS, il faudra refaire un suivi des analyses réelles et théoriques après avoir réalisée les propositions d'amélioration précédemment expliquées afin d'estimer les gains.

Après étude du recyclage des calamines, nous sommes en phase d'essais. Il faudra ensuite étudier cette phase, intégrer les résultats dans le fichier d'optimisation et l'adapter à chaque tas. Si nécessaire, des bilans en résiduels plus spécifiques devront être réalisés pour chaque hauts-fourneaux.

Dans le cas des boues d'aciérie pressées, nous avons optimisé le recyclage des boues bas zinc mais nous devons réussir à consommer celles qui pour l'instant sont stockées et qui ont une teneur en zinc plus élevée.



## 7 Les references

Fichier *ISO Standard*

Fichier Excel *calcul de tas*

Formation, *Certificat interne aciérie*

Fichier *Inventaire des matières premières sur les parcs*

FERNANDEZ C., 2010, Formation Exploitation, *Recyclages, coproduits, matières premières*

GOUVERNEUR Y., 2009, Tableaux actionneurs ST Agglomération SOLLAC DK

GALLET J., 2011, Formation, *Enfournements*

HERMENT B., 2004, Formation, *Le frittage*

LERICHE D., 2010, Couche de protection bedding

LERICHE D., 2010, Les conséquences du talutage au chargement de la chaîne

LERICHE D., 2010, Conditionnement de l'aggloméré

LERICHE D., 2010, Dosage des matières à l'agglomération

LERICHE D., 2010, L'ISO

LERICHE D., 2010, L'humidité du mélange à l'aggloméré des minerais

LERICHE D., 2010, Mécanisme de l'agglomération courbe optimale de fonctionnement  
approvisionnement logistique flux matières

PETITNICOLAS L., 2008, Formation, *Les minerais de fer*

PETITNICOLAS L., 2008, Formation, *Procédé d'agglomération générale*

TANCHON D., 2006, Contrôle de qualité des agglomérés

TANCHON D., 2006, Formation, *L'allumage de la couche*

TANCHON D., 2006, Formation, *La nodulisation à l'agglomération*

TANCHON D., 2006, Formation, *Le repère de cuisson*

SGRO F., 2007, Formation, *Réception et Stockage*

SGRO F., 2007, Formation, *Circuits minerais-pellets*

SGRO F., 2007, Formation, *Castine et Matières diverses*

SGRO F., 2007, Formation, *Homogénéisation et Alimentation Agglos*

## 8 Annexes

### 8.1 Annexe 1 : Matières premières

Les matières premières utilisées peuvent être classifiées en fonction de leur nature et de leur rôle dans le procédé d'agglomération :

#### 8.1.1 Les minerais

Les minerais, provenant surtout des pays tels que Canada, Brésil, Mauritanie et Australie, contiennent beaucoup de fer, composant principal dans l'acier et 3<sup>ème</sup> composant le plus abondant de la croûte du globe terrestre

Il y a trois types de minerai par rapport à leur granulométrie ;

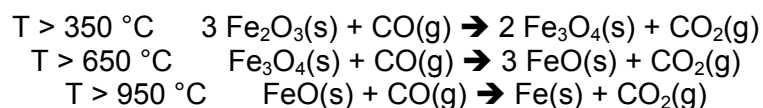
- Minerais Rocheux d'utilisation directe au Haut-Fourneaux (HFx) :
  - Compris entre 5 – 40 mm.
- Minerais pour agglomération (Utilisé pour produire de l'aggloméré, de dimensions 5-40mm)
  - Fins de bases : 1 – 5 mm.
  - Concentrés grenus : 0,15 – 1 mm.
  - Concentrés fins : 0,1 – 0,15 mm.
- Minerais pour boulettage
  - Ultra – fins : inférieur à 0,1 mm.

Les boulettes et les rocheux sont en général plus chers que l'aggloméré, mais également de meilleure qualité pour les HFx que l'aggloméré car ils contiennent plus de Fer.

Classification des minerais qu'on utilise:

- Hematite :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (*fer oxydé*)
  - Fins : Carajas, SSFT, SFOT, Mount Wright
  - Rocheux : LOBT
  - Boulettes : QCM
- Magnetite :  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (*fer pré-réduit*)
  - Fins : GMAB
- Goethite / Limonites :  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (*fer lié à l'eau de constitution*)
  - Fins : Robe River
  - Rocheux : Mount Newman

Réactions de réduction dans les hauts-fourneaux



### 8.1.2 Les fondants / Les entrées de MgO

Le rôle des fondants est de diminuer la température de fusion des minerais et aussi régler l'indice de basicité de l'aggloméré. Les fondants servent aussi de liant, assurant ainsi la résistance de l'aggloméré.

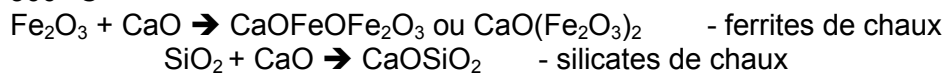
Il y a quatre types de fondants : la castine ( $\text{CaCO}_3$ ), l'olivine ( $(\text{FeMg})_2\text{SiO}_4$ ), la dolomie (contient 90% d'olivine minimum), la dunite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

- La castine donne un apport de CaO, pour les propriétés du laitier HFX, et pour être capable de produire de l'aggloméré de bonne qualité physique (ISO)
- L'olivine, la dolomie, la dunite donnent un apport de MgO dans le laitier HFX, pour qu'il s'évacue correctement du creuset (viscosité), et ainsi qu'il capte bien les alcalins.

L'olivine fait augmenter fortement la quantité de laitier dans les HFX, La dolomie, par contre, dégrade la qualité physique (ISO) de l'aggloméré, et la dunite rocheuse est enfournée aux HFX en petite quantité, donc, difficile à doser. Comme pour les minerais, nous utilisons les 3 pour panacher avantages et inconvénients.

Réactions des fondants:

À T ~ 1 300 °C



À T ~ 900 °C



### 8.1.3 Le charbon

Le coke provient principalement des grandes forêts marécageuses de l'époque carbonifère. Les charbons sont des roches sédimentaires organo-détritiques (végétaux divers, fougères, champignons, algues...)

On peut classer les différents types de charbon :

- Anthracite : utilisé dans l'agglomération et les hauts-fourneaux.
- Houille : utilisé dans la cokerie et les hauts-fourneaux.
- Lignite : utilisé comme électricité.
- Tourbe.

Le charbon est constitué par de:

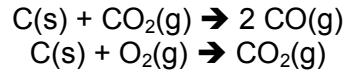
- Vitrinite : principal constituant du charbon, bonnes propriétés mécaniques.
- Exinite : comportement plastique.
- Inertite : comportement élastique.

Les propriétés du charbon sont d'apporter l'énergie thermique nécessaire à la réaction de frittage pour pouvoir faire l'agglomération. Le coke permet de soutenir mécaniquement la charge et de produire l'agent réducteur pour pouvoir transformer le fer dans les hauts-fourneaux.

Dans les hauts-fourneaux on peut distinguer différents types de coke:

- Tout coke: faite à partir de charbons à coke.
- Petit coke: coke consommée dans la charge minérale.
- Charbon de haut-fourneau ou pulvérisé (PCI): injecté aux tuyères.

Réactions de transformation de coke dans les hauts-fourneaux :



Le choix est une optimisation technico-économique : qualité, disponibilité, prix.

## 8.2 Annexe 2: Procédé d'agglomération

Les agglomérés ont un rôle de grande importance dans l'obtention de la fonte. L'utilisation directe des minerais dans les hauts-fourneaux est impossible parce qu'ils sont de plus en plus fins et cela a un effet très dangereux. Les minerais très fins peuvent étouffer le four et aussi former des chambres explosives de gaz.

Le procédé d'agglomération permet par ailleurs de valoriser les coproduits fins de l'usine et de réduire le coût des matières premières qui représentent 85% du coût de l'aggloméré.

Ci-dessous, on peut voir un schéma des différentes étapes de processus d'agglomération est présenté.

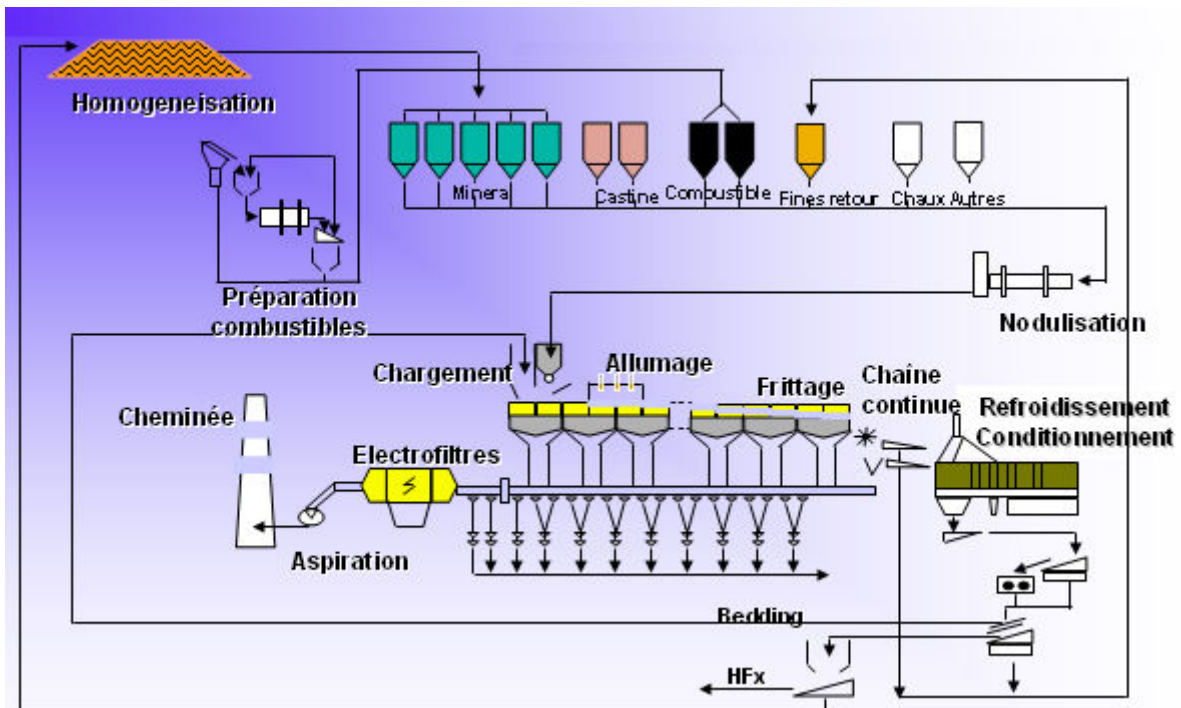


Figure 13. Schéma de la chaîne de production d'aggloméré.

Nous pouvons distinguer différentes étapes :

### 8.2.1 Etape d'homogénéisation

L'homogénéisation dans le procédé d'agglomération est importante parce que il y a différents composants, lesquels ont une composition très variables (minerais, additions, recyclage, ...) et on recherche des bonnes performances sur chaîne (granulométrie) et une bonne qualité / régularité de l'aggloméré (chimie).

L'homogénéisation a pour but de lisser les teneurs chimiques et granulométriques à l'intérieur du tas en déposant les matières longitudinalement et en les reprenant suivant un angle défini. Le tas est constitué en « chevrons superposés ». C'est la méthode la plus courante, de très

loin la plus simple. Elle présente, en outre, l'avantage de permettre en fin de constitution des appoints de matières de réglage.

L'homogénéité du tas est d'autant meilleure si le nombre de filets est élevé, donc que les débits sont faibles.

### Pré- homogénéisation

La pré-homogénéisation est l'étape d'homogénéisation de tous les déchets que l'on cherche à recycler et que l'on peut introduire après sur l'étape d'homogénéisation. La pile a une composition différente chaque semaine parce le stock disponible sur le parc est variable mais la pile pré-homo doit respecter toujours les contraintes chimiques pour la bonne qualité de l'aggloméré.

La limite de chaque composant chimique dans la pile pré-homo est validée chaque semaine et transmise à la société en charge du parc pré-homo.

Sachant le tonnage de chaque matière et sa composition chimique estimée (moyenne des analyses antérieures), on peut faire une estimation de la composition qu'il y aurait dans la pile et nous permettra de voir s'il y a des matières qu'on doit diminuer le tonnage.

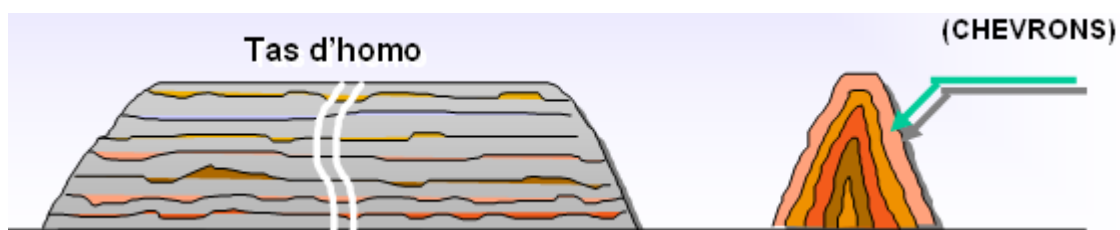
### Homogénéisation

L'homogénéisation a le même principe que la pré-homogénéisation mais le tas contient des couches de minerais ainsi que la couche de pré-homo.

Tous les minerais fins ont des avantages et des inconvénients qu'il faut équilibrer grâce au tas d'homo. Par exemple le Carajas contient beaucoup de fer, mais également beaucoup de manganèse, et est très humide; le CVG contient beaucoup de fer, mais également beaucoup de phosphore et est cher ; le Mount Wright contient peu d'impuretés néfastes (manganèse, phosphore), est très régulier, mais est très fin et le GMAB contient du fer pré-réduit (fer ferreux) et fait économiser du combustible à l'agglomération, mais est fin et siliceux.

Pour assurer une bonne composition de l'homo et respecter toutes les contraintes (agglomération, HFx, aciérie), il faut prévoir la composition de l'aggloméré qui sera produit avec chaque tas d'homo.

Pour la bonne homogénéisation, il est aussi important de suivre la bonne constitution de la pile et d'avoir des chevrons régulières.



**Figure 14.** À gauche constitution du tas homo, à droite les chevrons.

## **8.2.2 La nodulisation**

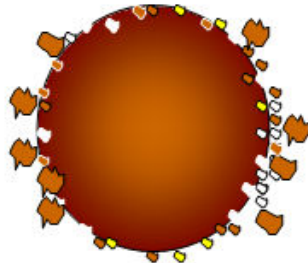
Dans cette étape-là on dose les différents produits qu'on veut noduliser.

Les produits dosés sont, d'un côté les matières premières (le mélange homogénéisé de minerais, essentiellement ; les fondantes et le charbon), et d'autre côté les fines de retour

(recyclage de l'aggloméré trop petit) et additions diverses (chaux vive qui permet améliorer la productivité, poussières d'électrofiltres qui sont riches en fer, etc.).

La nodulisation permet de transformer les fines particules du mélange minéral en micro boulettes (ou nodules) qui seront déposées sur la chaîne d'agglomération.

Les micro boulettes sont constituées d'un noyau autour duquel se collent les fines particules :



**Figure 15.** Micro boulette

On peut voir dans la figure 15 les micros boulettes (3 mm) constituées des particules fines (< 1 mm) autour d'un noyau (>1 mm). Les micro boulettes doivent être suffisamment résistantes au transport, séchage et à la cuisson

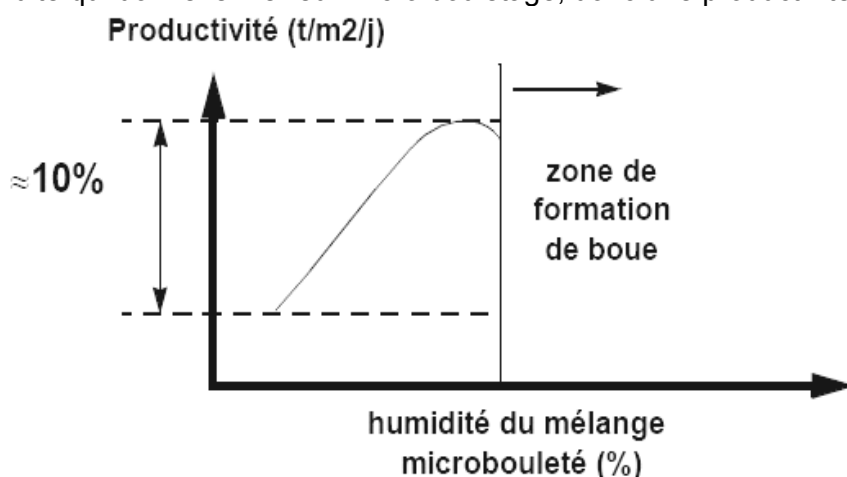
Dans le nodulisateur, le mélange est en rotation afin de permettre le contact entre les particules.

Il y a trois types de mouvement dans le mélangeur :

- Le glissement
- L'éclaboussement :
- La cascade

Grâce à l'aspersion d'eau et boues d'aciérie et la rotation du nodulisateur, on peut avoir un bon contact entre particules. Pour chaque mélange minéral il est nécessaire de trouver :

1. l'humidité qui donne le meilleur micro bouletage, donc une productivité maximale.



**Figure 16.** Productivité maximale.

C'est un paramètre très important du processus Agglo. Il existe une humidité optimale pour chaque mélange minéral. Des tests sont faits à chaque chargement de tas pour trouver l'humidité optimale.

Un mélange trop humide ou trop sec peut anéantir la perméabilité sur chaîne. L'apport de fines de retour chaudes nécessite de contrôler l'humidité selon l'élévation de la T° du mélange. L'apport de chaux vive, selon son taux d'injection, amènera également à revoir l'addition d'eau au mélange.

2. La chaux vive qui augmente la résistance mécanique à chaud des micro boulettes, ce qui permet d'augmenter la productivité.

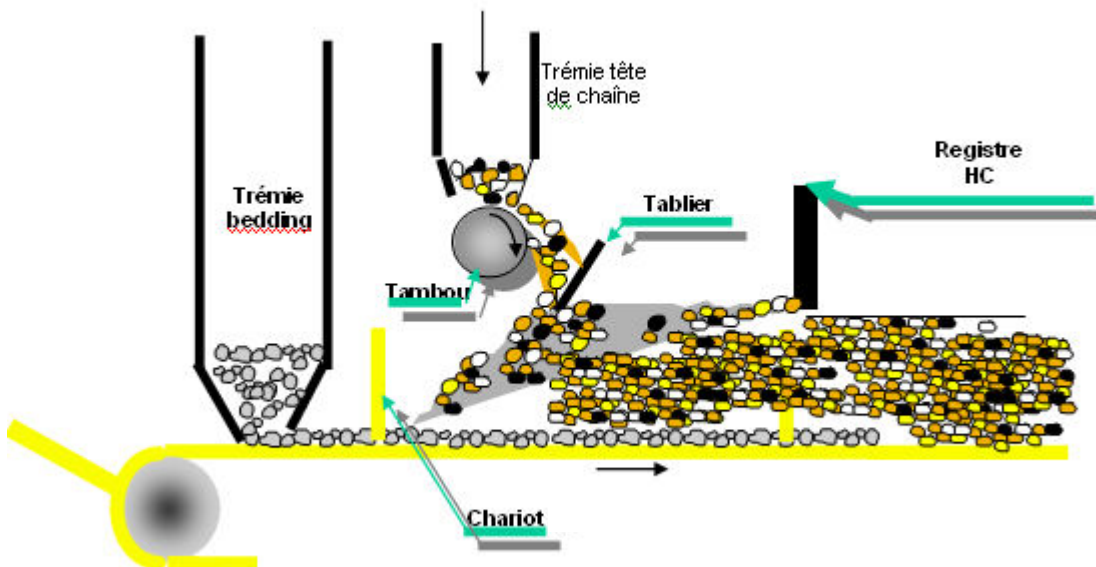
Les matières premières, par contre, ont une double influence. C'un côté, leur granulométrie permet une répartition favorable ou non entre les fines particules et les noyaux. De l'autre côté la nature minéralogique du mélange influe sur la qualité du micro bouletage. Pour chaque mélange minéral il est nécessaire de trouver l'humidité optimale qui donnera le meilleur micro-bouletage.

Le choix des matières premières et l'addition de chaux vive sont des paramètres technico-économiques, sur lesquels l'opérateur ne peut pas avoir d'action. Par contre l'humidité du mélange est un paramètre important à contrôler régulièrement.

### 8.2.3 Le chargement

Après la nodulisation on introduit les micro boulettes sur la trémie tête de chaîne. D'ailleurs, il y a une autre trémie, la trémie de bedding, qui forme une couche de protection.

On forme donc un dépôt en continu des micro boulettes sur une grille en mouvement comme on peut le voir sur la figure 17:



**Figure 17.** Chargement matières dans chaîne agglomération.

1. La couche de protection

La couche de protection ou bedding, constituée d'aggloméré recyclé, a comme fonctions principales de protéger les orifices entre les barreaux de chariot pour favoriser le passage des fumées aspirées par les ventilateurs principaux ainsi que protéger les barreaux contre le collage des plaques d'aggloméré scorifié qui diminue la surface d'aspiration.

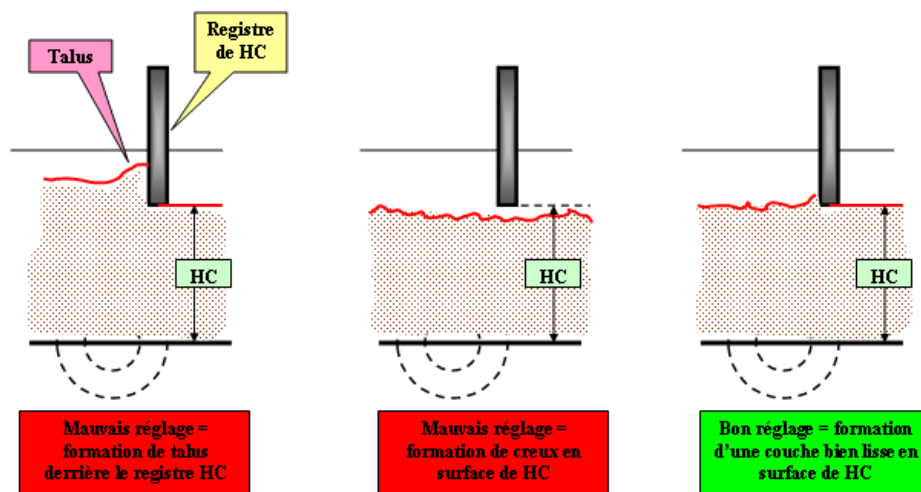
Le bedding protège aussi les barreaux de la grille thermiquement contre l'effet de surchauffe du front de flamme du gâteau d'aggloméré. Il peut diminuer l'aspiration des fines particules du mélange par les ventilateurs, ce qui diminue les pertes dans les matières chargées (fines minérales et combustible solide) et protège aussi les gaines, filtres et ventilateur contre l'abrasion.

La granulométrie et l'épaisseur de cette couche de protection ne sont pas sans incidence sur la productivité de la chaîne ; une granulométrie grossière et une épaisseur égale à 3 fois la médiane de la couche de protection, favorisent un meilleur écoulement des gaz.

- Réglage de la couche de protection

Le chargement doit être continu et régulier afin de respecter la consigne de hauteur de couche. De plus, la vitesse du rouleau se règle en % de la vitesse de chaîne. L'ouverture des registres du bas de trémie détermine l'épaisseur de la couche qui peut être ensuite ajustée à l'aide du racleur.

Des déflecteurs latéraux dans la trémie permettent le réglage sur les joues de chariot pour éviter les talus qui perturbent le chargement et l'allumage



**Figure 18.** Réglage matières dans la chaîne d'agglomération.

- Le mélange

L'opération de chargement du mélange (technologie, débit..) induit une organisation spatiale des microboulettes dans le lit (par gravité).

Cette organisation conditionne en grande partie la suite du processus d'agglomération, puisque la productivité est fonction de la perméabilité aux gaz pendant la cuisson.

Comme on peut le voir sur la figure 17, le mélange tombe sur un plan incliné, le tablier de chute. Sa fonction est de dévier les micro boulettes pour former un talus d'éboulement sur la grille.

Le talus d'éboulement se forme au-dessus de la couche de protection chargée préalablement, soit par extraction directe par avancement de la chaîne, soit par un système analogue à celui du mélange.

- Influence du chargement sur la perméabilité

Le chargement est le dernier point où un réglage est encore possible et important et donc, le dessus de la couche doit être le plus lisse et le moins dense possible. Une densité de chargement élevée diminue la productivité de la chaîne.

D'ailleurs, il faut contrôler régulièrement l'état des herse et surveiller l'évolution des rejets. Les herse sont des barres qui traversent la couche et permettent d'améliorer la perméabilité donc, la production.



La productivité de la chaîne d'agglomération est liée à la bonne perméabilité aux gaz du mélange chargé. Celle-ci peut être obtenue soit par une faible densité de chargement, soit par une ségrégation granulométrique sur la hauteur de couche.

Le phénomène de ségrégation granulométrique sépare plus ou moins efficacement les grosses particules des plus fines. Sans ce phénomène-là, les particules fines se placent dans les espaces libres laissés par les plus grosses et rend la couche moins perméable aux gaz, donc, comme on a dit tout à l'heure, moins productive.

#### 8.2.4 L'allumage

L'allumage est le phénomène d'initialisation du processus de frittage du mélange déposé sur la chaîne. Cette opération est réalisée grâce à l'inflammation du combustible proche de la surface du mélange lors de son passage sous la hotte d'allumage.

L'outil classiquement utilisé est une hotte équipée de brûleurs à gaz et l'apport thermique se fait par convection (grâce à des fumées chaudes oxydantes provenant des brûleurs) et rayonnement (grâce aux flammes des brûleurs et au réfractaire de la hotte).

Les fumées chaudes produites par la hotte pénètrent dans la couche grâce à l'effet de la dépression. Dans un premier temps, il faut porter la charge à une température suffisante pour réaliser les réactions endothermiques ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) et porter le combustible à sa température d'inflammation ( $\sim 700^\circ\text{C}$ ). Dans cette phase, la teneur en oxygène n'est pas importante mais pour l'inflammation du combustible, la présence d'oxygène est nécessaire. Avec plusieurs rampes d'allumage, la combustion doit être de plus en plus oxydante. Il faut savoir que tous les combustibles gazeux sont utilisables mais le choix dépend de considérations techniques (disponibilité et prix).

La combustion doit être terminée au niveau de l'allumage parce que la combustion des fumées ne se poursuit pas dans la couche. C'est pour ça qu'il faut un bon dimensionnement des brûleurs.

L'allumage est déterminé par les caractéristiques technologiques de la hotte et de l'aspiration sous chaîne et par le réglage de la combustion. Dans la partie supérieure de la couche, la résistance mécanique est plus faible et l'aggloméré plus petit.

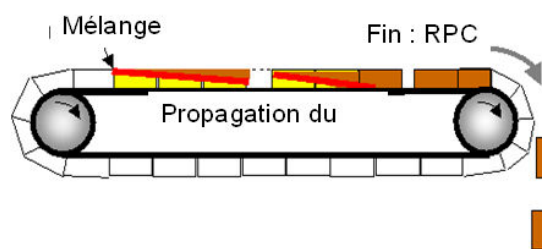


Figure 19. Cuisson agglomérée.

Une augmentation de l'apport thermique à l'allumage implique une diminution de la consommation de combustible solide. En plus, l'augmentation de la teneur en oxygène (si elle est faible, inférieure à 10%) entraîne également une diminution de la consommation de combustible solide. En effet fumées doivent contenir une quantité suffisante d'oxygène pour assurer la combustion du combustible solide, au-delà de cette quantité suffisante, l'oxygène supplémentaire n'est pas utilisé et se retrouve dans les fumées de cuisson (signe d'un excès d'air et donc de fumées moins chaudes).

L'énergie apportée à l'allumage modifie l'état de surface du gâteau et crée ainsi un front de flamme plus ou moins perméable. Lorsque le front de flamme devient épais, et par conséquent

peu perméable, la productivité diminue. Donc, la production et la qualité de l'aggloméré ont une forte dépendance des conditions d'allumage et de cuisson :

- Si l'allumage est insuffisant, il y aurait une augmentation du taux de fines de retour d'où une perte de production et une augmentation de la mise au mille combustible solide.
- Si l'allumage est trop intense, il y aurait une scorification de la couche supérieure qui devient imperméable d'où une perte de production.

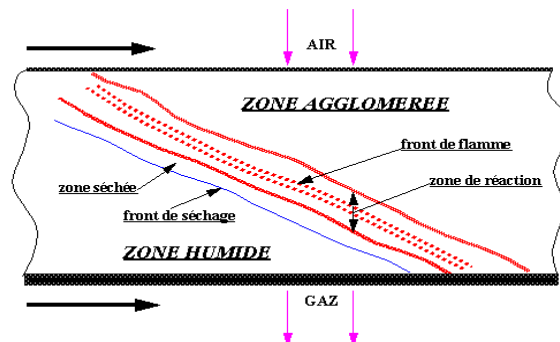
#### 1. Facteurs influençant l'allumage

- Nature des minerais : par exemple entre un minerai à hématite ou une magnétite, l'excès d'air aura un rôle sur la réoxydation de la magnétite.
- Granulométrie et perméabilité du mélange : il faut adapter le débit de fumées en fonction de la perméabilité du mélange. Importance des caractéristiques des matières premières et de l'humidité.
- Basicité : les températures à atteindre dans le front de flamme sont différentes suivant l'indice de basicité.
- Caractéristique d'agglomération du mélange : hauteur de couche, taux de fines de retour, maille de criblage des fines de retour, dépressions, etc.

#### 2. Paramètres d'allumage

- Niveau moyen de température des fumées (rôle de la nature du gaz et du PCI)
- Teneur en oxygène des fumées. Rôle du rapport air / gaz et du profil longitudinal en oxygène.
- Profil de dépression dans les boîtes à vent sous la hotte d'allumage.
- Durée de l'allumage : notion de taux de couverture (longueur hotte / longueur chaîne).

Nous pouvons distinguer 5 zones pendant la transformation de la charge en aggloméré :



**Figure 20.** Phases de transformation agglomérée.

- Couche de protection de la grille (bedding).
- Zone humide (mélange surhumidifié).
- Zone d'échauffement rapide (zone sèche).
- Zone à haute température (front de flamme).
- Zone de refroidissement (aggloméré).

Lors que le front de flamme traverse la couche le phénomène de frittage se produit.

## 8.2.5 Le frittage

Le frittage concerne la zone comprise entre la hotte d'allumage et le bout de chaîne et est la transformation physico-chimique du mélange déposé sur chaîne en aggloméré. Elle est obtenue, comme on a vu tout à l'heure, par passage à haute température.

L'opération de frittage est réalisée par la propagation du front de flamme du haut vers le bas de la couche par aspiration de l'air ambiant par les ventilateurs de cuisson.

Le combustible solide dans le mélange compense la différence entre les apports et les besoins calorifiques en maintenant un niveau thermique suffisant pour atteindre la température de frittage ( $\approx 1350^{\circ}\text{C}$ ).

Du point de vue thermique, le mécanisme de l'opération de frittage est régi par les deux phénomènes suivants: le transfert de chaleur, et la combustion du carbone.

Transfert de chaleur du haut vers le bas de la couche créant un front à haute température dont la vitesse de propagation ne dépend que du débit gazeux traversant la charge (lié à la perméabilité). La combustion du carbone solide créant un front chimique de combustion.

## 8.2.6 Refroidissement et conditionnement

Le phénomène étudié est la transformation du gâteau d'aggloméré chaud, défourné en bout de chaîne, en aggloméré marchand froid et calibré.

Le conditionnement concerne la zone comprise entre le bout de chaîne et les accumulateurs des HFX.

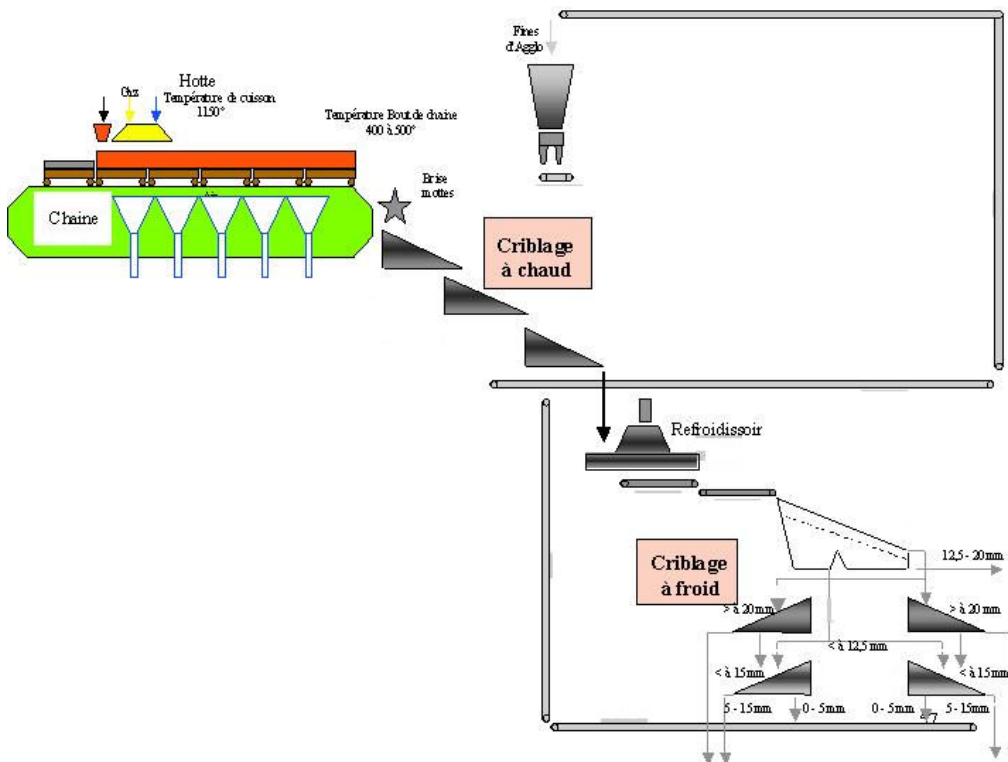


Figure 21. Système de criblage.

L'opération de conditionnement est réalisée en plusieurs étapes successives :

- Criblage à chaud pour séparer de l'aggloméré brut le maximum de particules fines (0-5mm).
- Refroidissement en continu par soufflage d'air ambiant au travers du lit d'aggloméré chargé dans le refroidisseur.
- Criblage à froid pour séparer l'aggloméré marchand, les fines (0-5 mm), et la couche de protection (12.5 - 20 mm).

Pendant ces étapes-là, la granulométrie de l'aggloméré évolue à cause du transport et des chutes: due à la fragmentation et à l'abrasion. Ces étapes permettent la stabilisation de l'aggloméré.

L'objectif du conditionnement est de permettre le transport de l'aggloméré (refroidissement à des températures compatibles) et d'éliminer la fraction fine (recyclée sur la chaîne d'agglomération) et de réduire la fraction grossière afin d'assurer le bon fonctionnement des hautes-fourneaux.

Pour la conduite, l'objectif se traduit par le respect de la granulométrie définie dans la charte qualité établie entre hauts fourneaux et agglomérateurs

### **8.2.7 Captations des fumées**

Pendant tout le procédé de fabrication de l'aggloméré on produit différents types de polluants tels que les poussières, le NO<sub>x</sub>, le SO<sub>2</sub>, les Composés Organiques Volatiles (COV), les métaux lourds.

La formation des poussières est liée à des combustions incomplètes, des phénomènes d'abrasion et d'usure des matériaux.

Les oxydes d'azote sont issus de la combustion du charbon. Ils participent à l'atteinte de la couche d'ozone, à l'effet de serre et à la formation de pluies acides.

Le dioxyde de soufre provient de la combustion de combustibles ou produits contenant du soufre. Combiné à l'eau et l'oxygène atmosphérique, il est à l'origine des pluies acides aussi.

Les composés organiques volatils sont émis lors de la combustion de combustible ou par évaporation. Ils interviennent dans la formation des gaz à effet de serre et de l'ozone dans la basse atmosphère. Les COV regroupent une multitude de substances, ils peuvent avoir des effets variables sur la santé.

Les métaux toxiques tels que le plomb et le cadmium, proviennent de la combustion des charbons et minerais. Ces métaux contaminent le sol et les aliments et ils s'accumulent dans les organismes vivants et peuvent perturber les équilibres et les mécanismes biologiques.

Tous ces polluants doivent être captés et traités afin de respecter les limites légales d'émission.

### 8.3 Annexe 3 : études ISO corrigés

Analyse des écarts ISO tas 21 et référence 2011

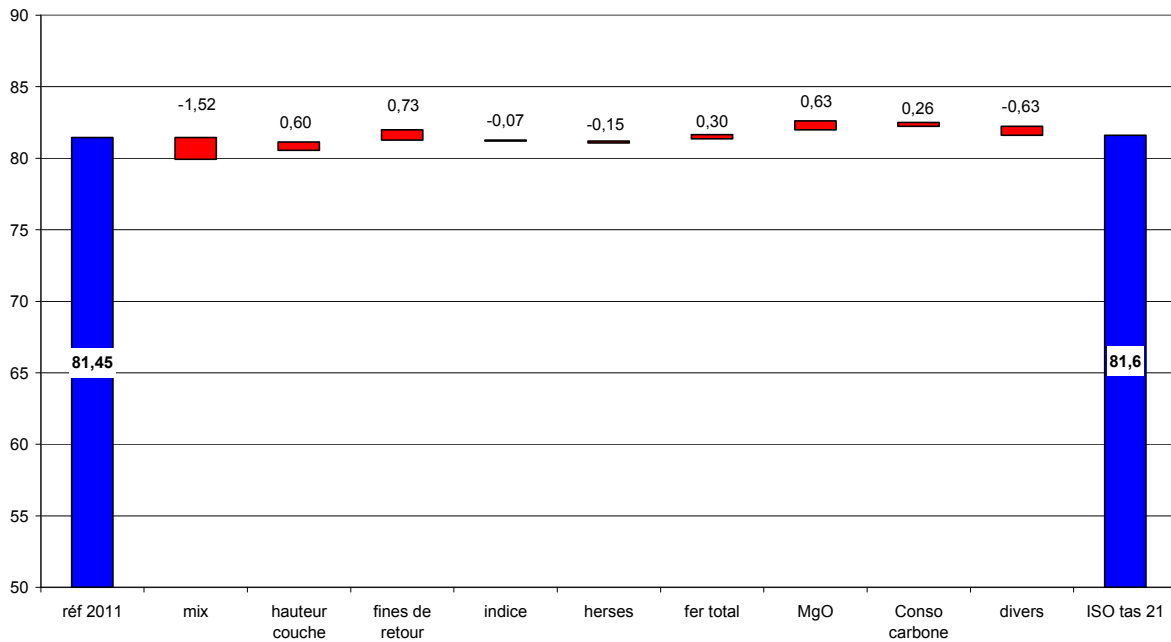


Figure 22. Étude ISO tas 21.

Analyse des écarts ISO tas 22 et référence 2011

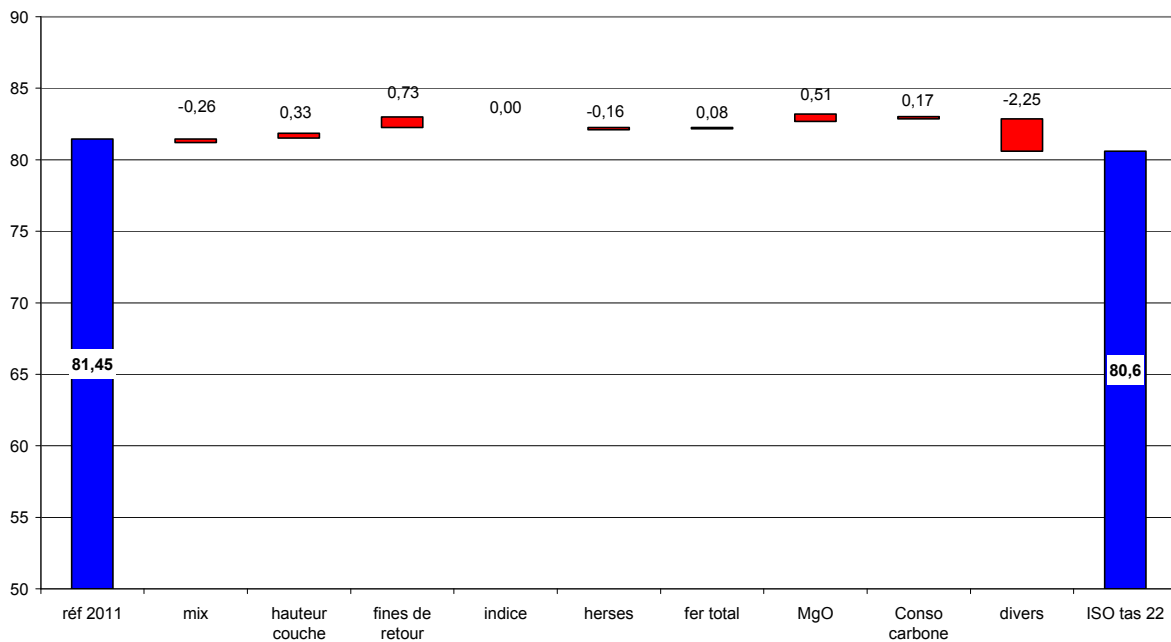


Figure 23. Étude ISO tas 22.

### Analyse des écarts ISO tas 23 et référence 2011

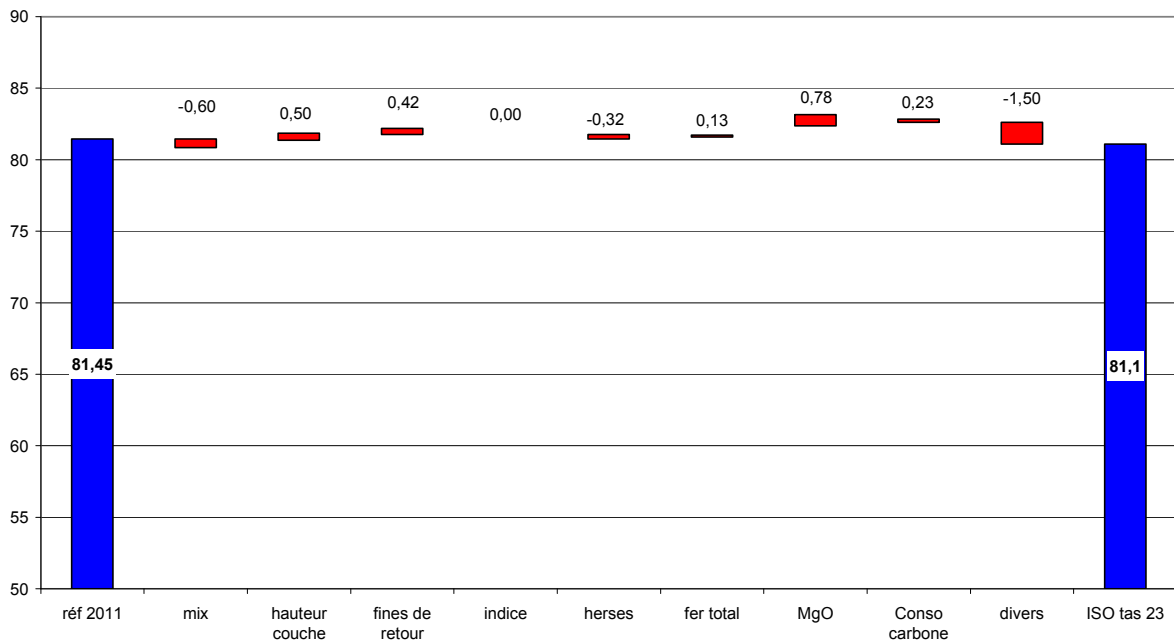


Figure 24. Étude ISO tas 23.

### Analyse des écarts ISO tas 24 et référence 2011

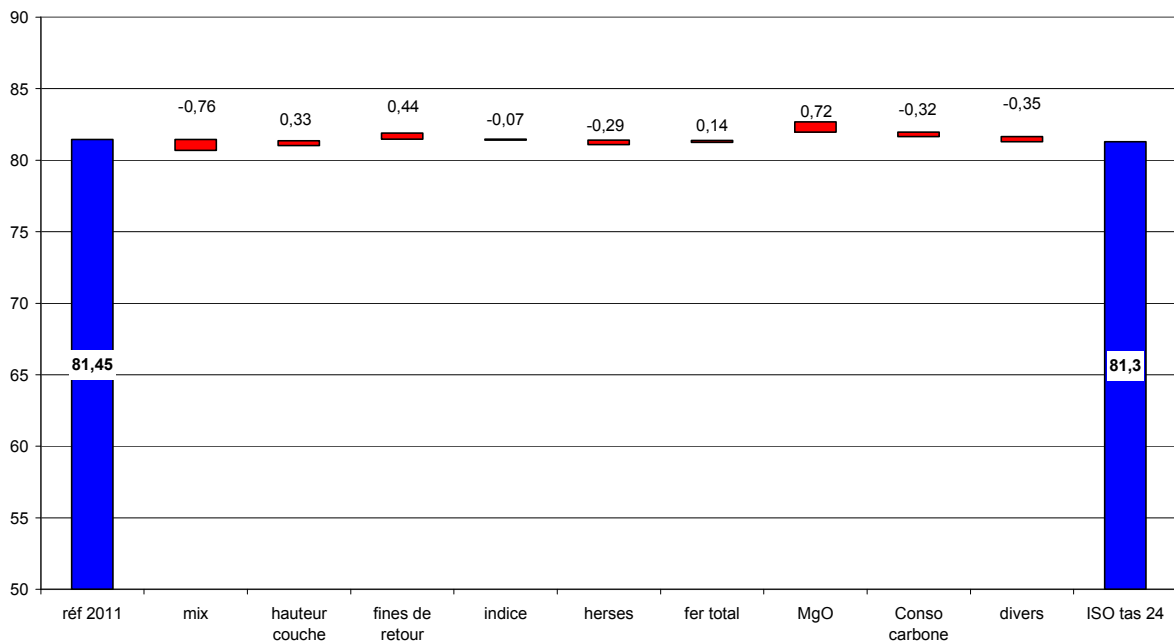


Figure 25. Étude ISO tas 24.

### Analyse des écarts ISO tas 25 et référence 2011

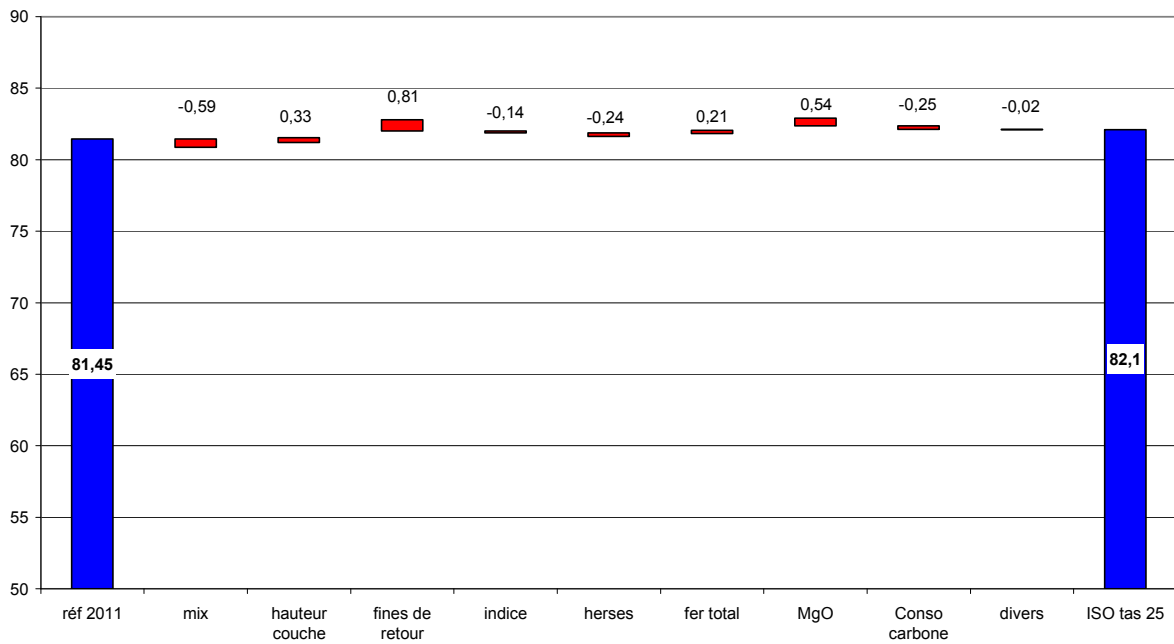


Figure 26. Étude ISO tas 25.

### Analyse des écarts ISO tas 26 et référence 2011

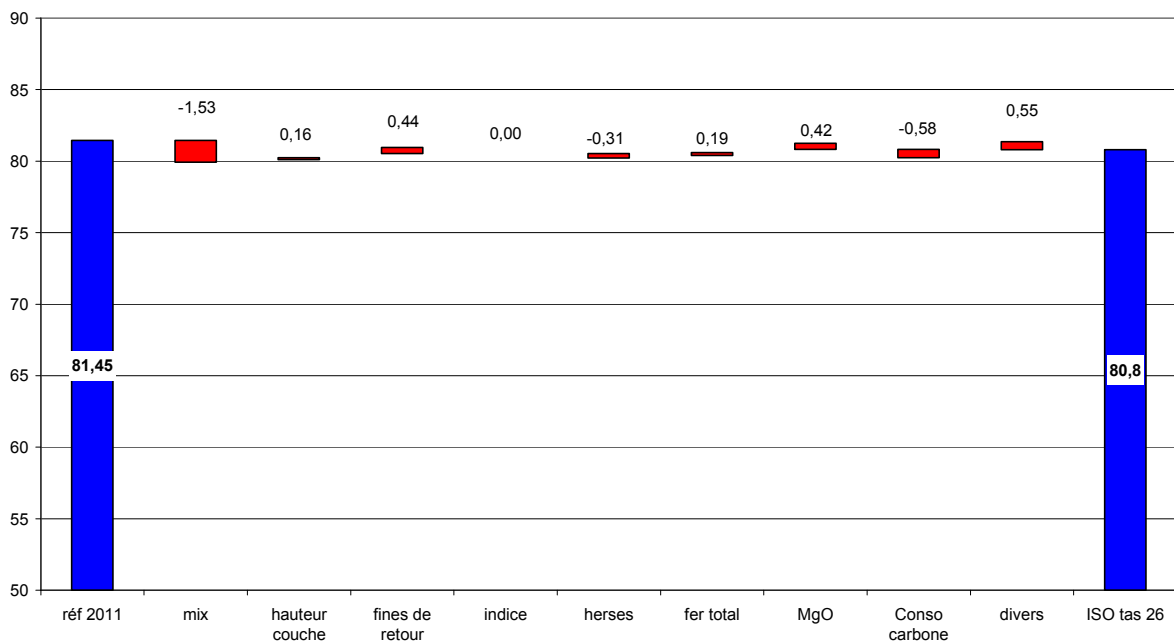


Figure 27. Étude ISO tas 26.

### Analyse des écarts ISO tas 27 et référence 2011

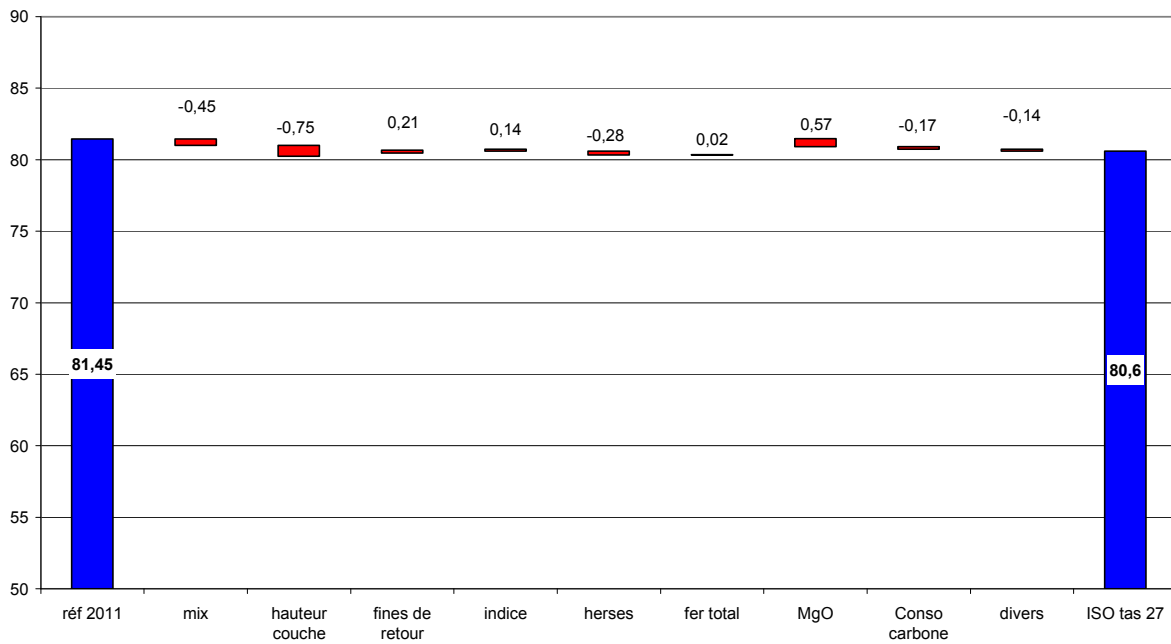


Figure 28. Étude ISO tas 27.

### Analyse des écarts ISO tas 28 et référence 2011

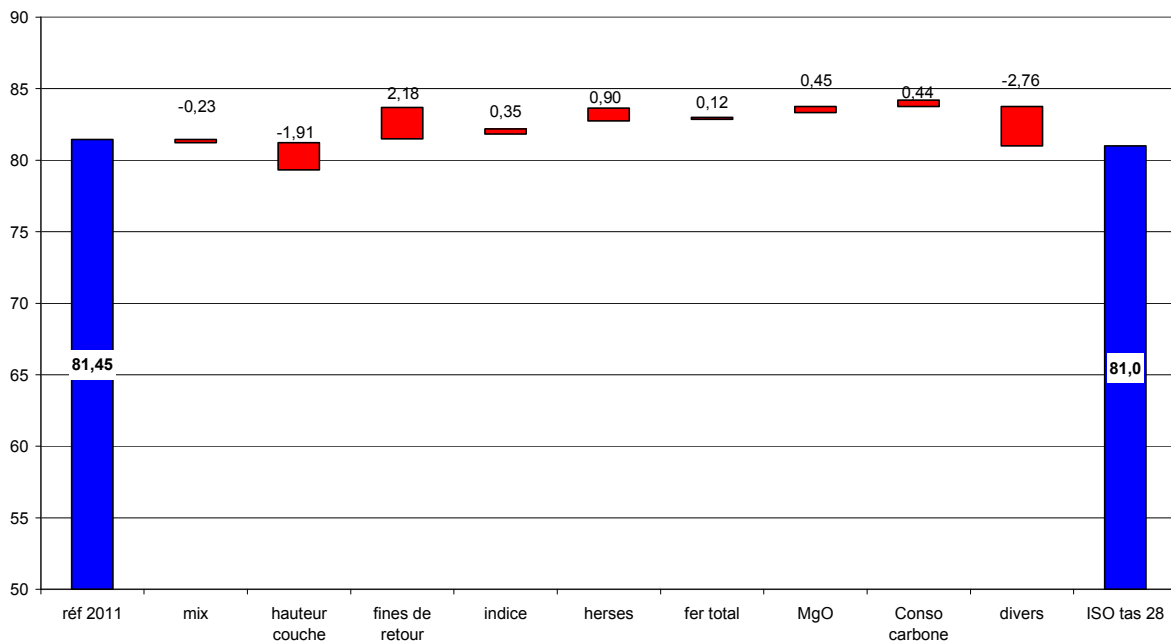


Figure 29. Étude ISO tas 28.