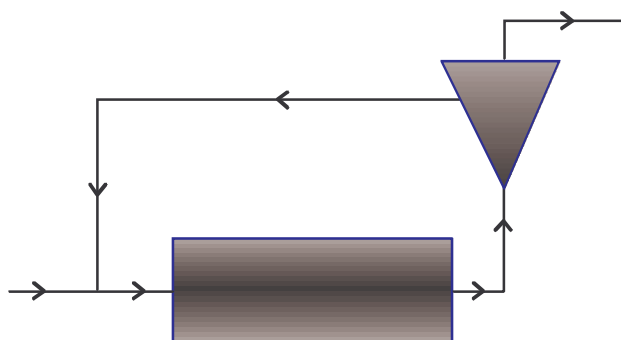


Ateliers de Broyage

Optimisation et Modélisation

(CEMTECH 93 , St Petersburg)



Alain Cordonnier - Christophe Obry

1. Introduction

FCB a réalisé ces dernières années d'importants travaux de recherche dans le domaine du broyage et notamment de la simulation numérique du broyeur à boulets. Une partie de ces travaux, menés à l'époque en collaboration avec la Société des Ciments Français, a fait l'objet d'une publication présentée aux "journées d'études sur les nouvelles techniques de broyage et économie d'énergie" les 25 et 26 octobre 1989 à Paris et reproduite dans les numéros d'Août et de Septembre 1991 de la revue "World Cement". Cette publication expose les principes théoriques fondamentaux de la modélisation et de la simulation d'un circuit quelconque de broyage équipé d'un broyeur à boulets.

A l'issue de ces travaux, FCB se trouvait doté de deux nouveaux outils :

- ✓ Un test de broyabilité (FCB Index) précis, fiable et parfaitement représentatif du mécanisme de fragmentation tel qu'il se passe dans un broyeur à boulets industriel. Ceci nous permet de définir le rendement relatif de l'atelier par rapport au FCB Index baptisé σ (sigma) :

$$\sigma = \frac{\text{FCB Index Specific Energy}}{\text{Industrial Specific Energy}}$$

- ✓ Un programme de calcul de simulation d'atelier de broyage avec broyeur à boulets comportant notamment une nouvelle formulation des fonctions de broyage. Ce programme prend en compte toutes les configurations et conditions de fonctionnement d'un atelier industriel (séparateur, charge en boulets et son classement, ventilation etc).

Nous apportons aujourd'hui un certain nombre de compléments concernant les derniers développements théoriques d'une part et les résultats obtenus sur le terrain d'autre part.

Enfin, le succès remporté aujourd'hui dans tous les cas où nous avons appliqué la modélisation nous a permis de définir deux méthodes d'investigation utilisées dorénavant en routine.

2. Avancées Théoriques

2.1. Modèle de Blaine

2.1.1. Objectif

La simulation numérique repose sur le calcul et l'évolution des différentes granulométries dans un circuit, mais ignore la notion de surface spécifique Blaine qui est le critère le plus couramment employé pour le broyage du ciment. Il était donc important de pouvoir calculer le Blaine directement à partir de la distribution granulométrique complète. En effet, les corrélations simples (Blaine vs $R_{8\mu}$ et autres) sont insuffisantes car elles ne prennent pas en compte l'homogénéité des granulométries (pente Rosin Rammler par ex.) qui dépend de l'atelier (séparateur, charge circulante etc).

2.1.2. Moyens

Une étude systématique de corrélation entre le Blaine et la distribution granulométrique pour différents produits a montré qu'il est impossible de réaliser un modèle indépendant de la matière étudiée. La solution passe par un complément de calcul au test de broyabilité (FCB Index) et à la détermination des fonctions S et B (cf figure 1).

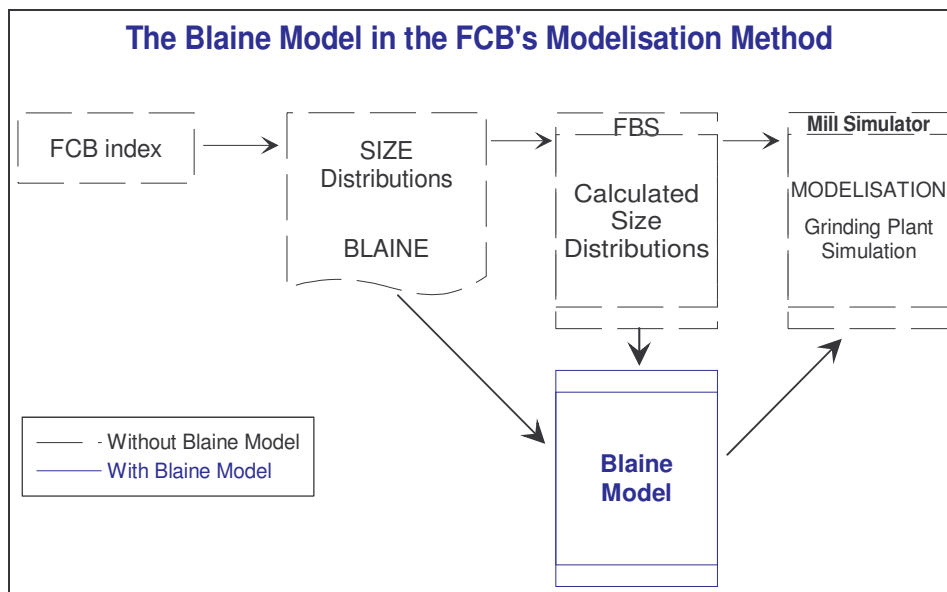


Figure 1 : Intégration du modèle de Blaine dans la méthode de modélisation

En effet, le FCB Index nous donne, pour des conditions standard, un ensemble de mesures (granulométries et Blaine) couvrant la plage étudiée (ciment de 2000 à 4000 Blaine environ). Cet ensemble est ensuite consolidé (dépouillement FCB Index et calcul des granulométries par FBS : première étape de la modélisation). Ceci nous permet de caler les deux paramètres du modèle de Blaine sur des données cohérentes.

2.1.3. Conclusions

- Le modèle de Blaine complète la carte d'identité du produit étudié.
- Intégré dans notre simulateur de broyeur à boulets, il nous permet d'associer à toutes les granulométries calculées le Blaine correspondant.
- Nous pouvons dorénavant imposer au simulateur de rechercher une solution de circuit permettant de produire un Blaine donné. Par exemple, si on choisit le Blaine et la charge circulante, le simulateur détermine le réglage du séparateur et le débit de produit fini, tout comme le ferait l'opérateur d'un circuit industriel.

2.2. Modèle de Courbe de partage de séparateurs granulométriques

FCB a mis au point, testé et aujourd'hui validé une formulation mathématique universelle de la courbe de partage d'un séparateur granulométrique (Cf figure 1). Cette fonction nous donne la valeur du rendement R_i pour la maille X_i . Elle consiste en la combinaison de deux sigmoïdes (courbes en S), l'une décrivant la coupure granulométrique et l'autre le soutirage dans les fins.

Les paramètres de cette fonction ont un sens physique :

- Mc : Maille de coupure du séparateur.
- Pt : Pente.
- Ms : Maille "de coupure" du soutirage.
- Pts : Pente de soutirage.
- St : Soutirage maximum.
- Stg : Soutirage global.

Leur signification est explicitée sur la figure 2. La figure 3 nous montre dans quelle mesure les paramètres permettent de simuler n'importe quel type de séparateur.

$$R_i = Stg + (1 - Stg) \cdot \left[\frac{Str}{1 + \left(\frac{X_i}{Ms}\right)^{Pts}} + \frac{1 - \frac{Str}{1 + \left(\frac{X_i}{Ms}\right)^{Pts}}}{1 + \left(\frac{Mc}{X_i}\right)^{Pt}} \right]$$

Avec : $Str = \frac{St - Stg}{1 - Stg}$

Figure 1 : Formule universelle FCB de calcul de rendement

| | First Generation | Second Generation | Third Generation |
|-----|------------------|-------------------|------------------|
| mc | 20 | 20 | 20 |
| pt | 2.5 | 3.5 | 6 |
| Ms | 6 | 5 | 6 |
| Pts | 1.5 | 2 | 2.5 |
| St | 0.7 | 0.5 | 0.2 |
| Stg | 0.4 | 0.3 | -0.05 |

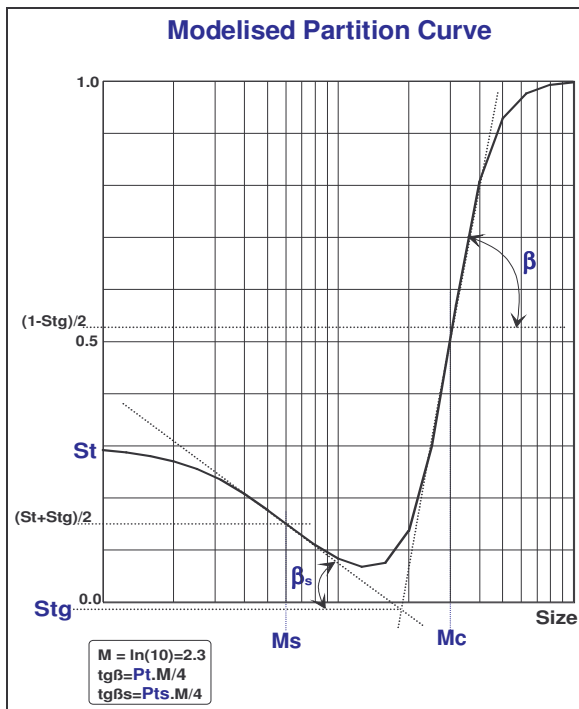


Figure 2 : Signification des paramètres

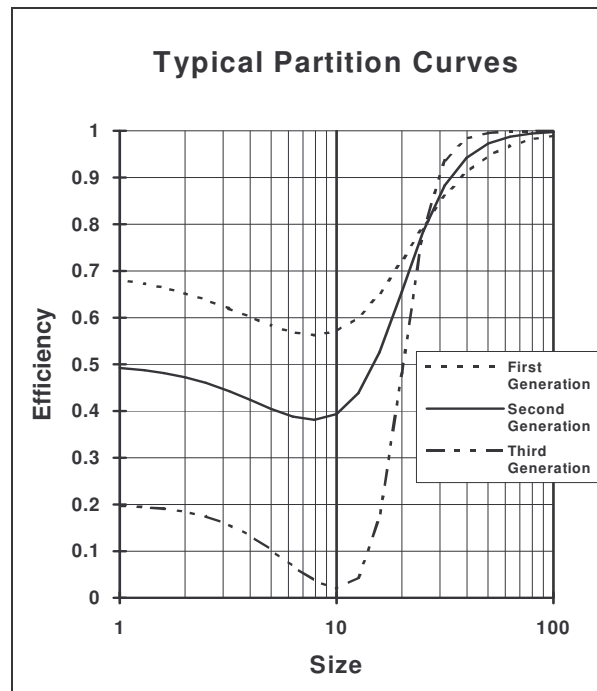
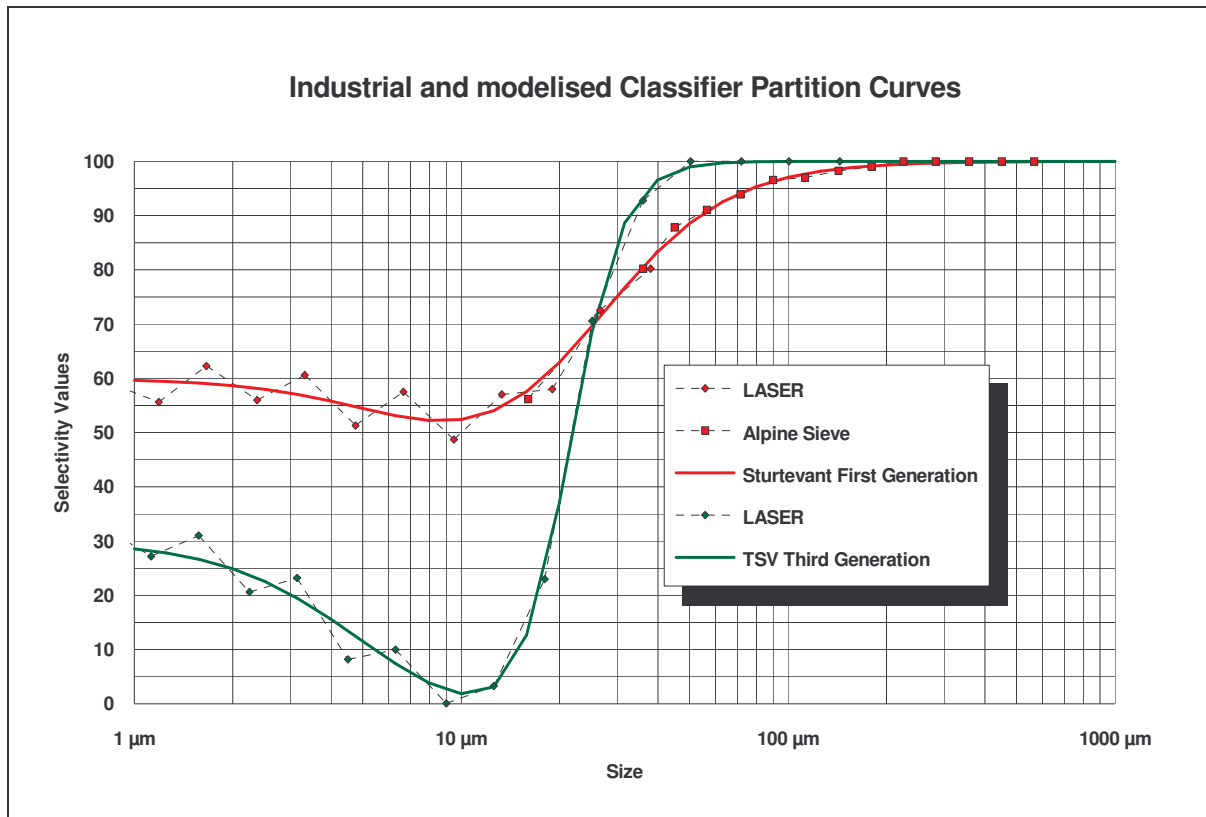


Figure 3 : Les trois générations de séparateur sont modélisables

Deux cas pratiques de modélisation de courbe de partage à partir de granulométries industrielles sont rassemblés dans la figure ci-dessous. La courbe concernant le Surtevant nous montre un exemple de séparateur de type "Première génération" tandis que l'autre (TSV) nous montre le séparateur de type "troisième génération" FCB.



2.3. Distribution des temps de séjour

Les différents bilans industriels réalisés pendant la période de validation du simulateur nous ont montré que l'écoulement de la matière dans un broyeur est complexe et fortement dépendant de sa conception.

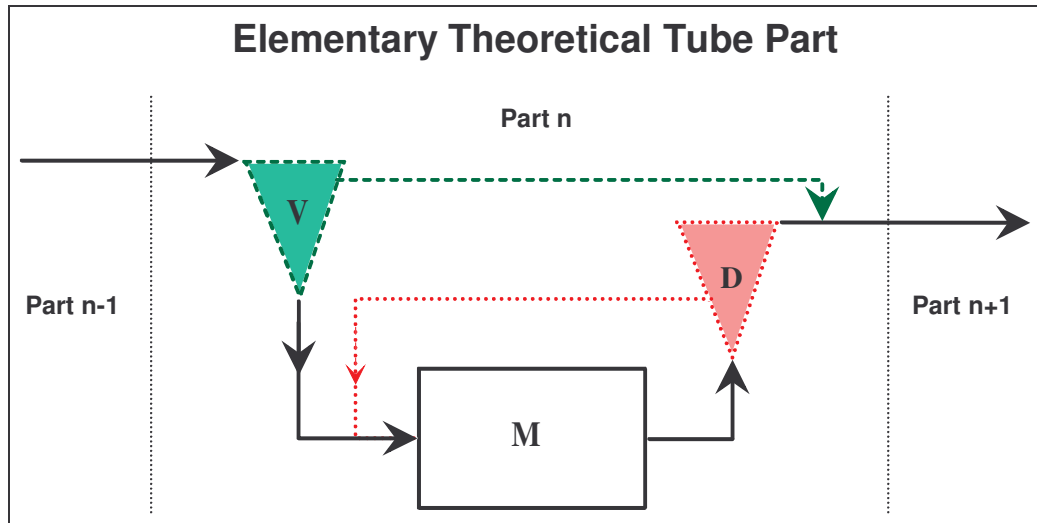
En effet, dans un broyeur industriel l'écoulement n'est pas du tout du type "piston" (écoulement en masse) mais présente un taux de mélange important: on peut dans la pratique assimiler le broyeur à une succession de mélangeurs parfaits dont chacun à un ratio longueur sur diamètre d'environ 0,5.

Cependant d'autres phénomènes viennent compliquer cette approche :

- ✓ Ventilation du broyeur qui provoque un avancement différentiel des fines par rapport aux grossiers.
- ✓ Tendance au coating qui se traduit par un ralentissement et un surbroyage d'une partie des fines.
- ✓ Bourrage du broyeur qui se manifeste par une traversée sans effet de broyage d'une partie de la matière.
- ✓ Effet de cloison qui augmente d'une part localement la vitesse des gaz et donc les envolées, mais aussi crible le produit.

Ces différents phénomènes sont simulés de la manière suivante :

- Le broyeur est découpé en tranches élémentaires
- Chaque tranche élémentaire est équipée de deux séparateurs virtuels permettant de simuler les différents points cités précédemment.



- V : Simulation de la ventilation et/ou d'un "by-pass" (bourrage).
 D : Simulation d'une grille et/ou de coating
 M : Tranche élémentaire de broyeur assimilée à un réacteur parfaitement mélangé.

Cette approche de broyeur en "tranches" a permis une programmation modulaire et simple du simulateur, et donne une grande souplesse à l'utilisation.

3. La modélisation sur le terrain

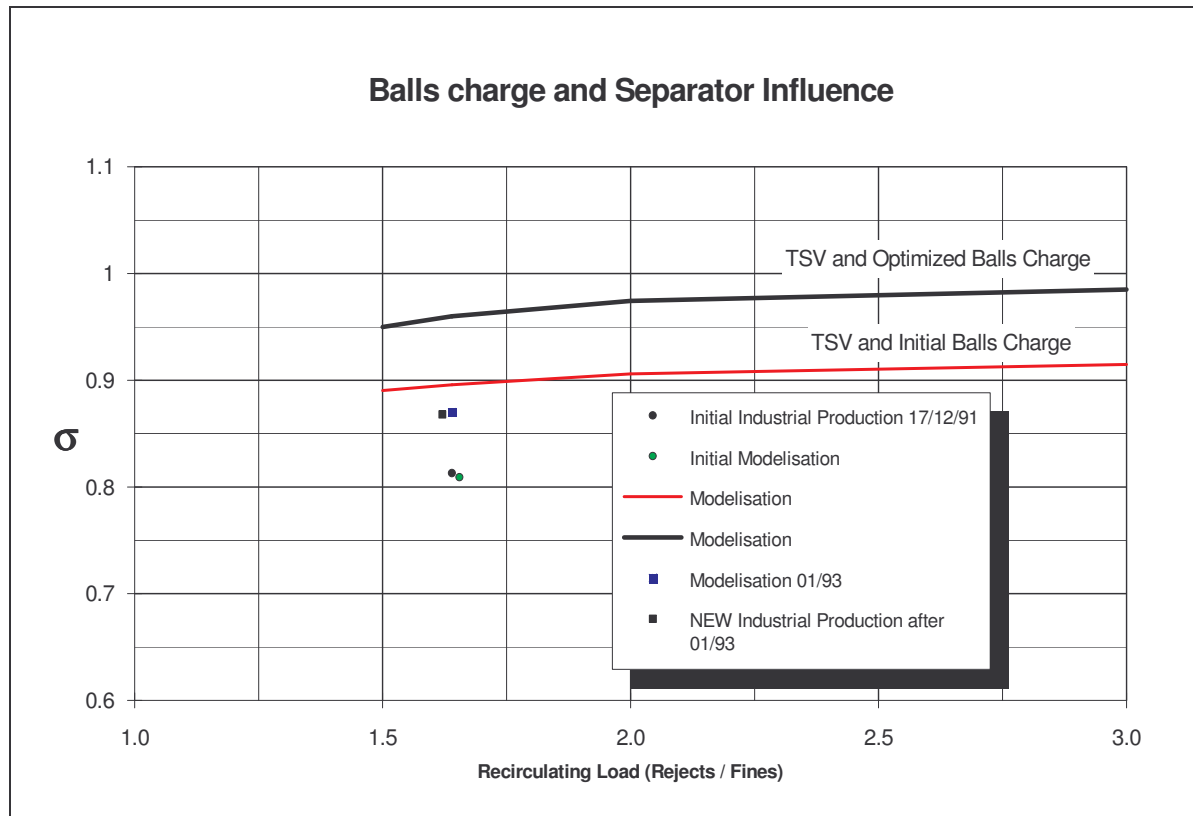
3.1. Préconisation de charge en boulets

Pour un exploitant en Belgique, désireux d'augmenter sa capacité de production d'un ciment de 3700 Blaine à 48.5% de laitier, nous avons réalisé une modélisation complète comportant un bilan industriel, une simulation de l'atelier actuel et plusieurs simulations théoriques dont l'objectif était de trouver des solutions d'optimisation du fonctionnement. A partir de ces simulations deux propositions concrètes ont vu le jour :

- Préconisation d'une nouvelle charge en boulets.
- Proposition d'implantation d'un TSV à la place des deux séparateurs de première génération Sturtevant.

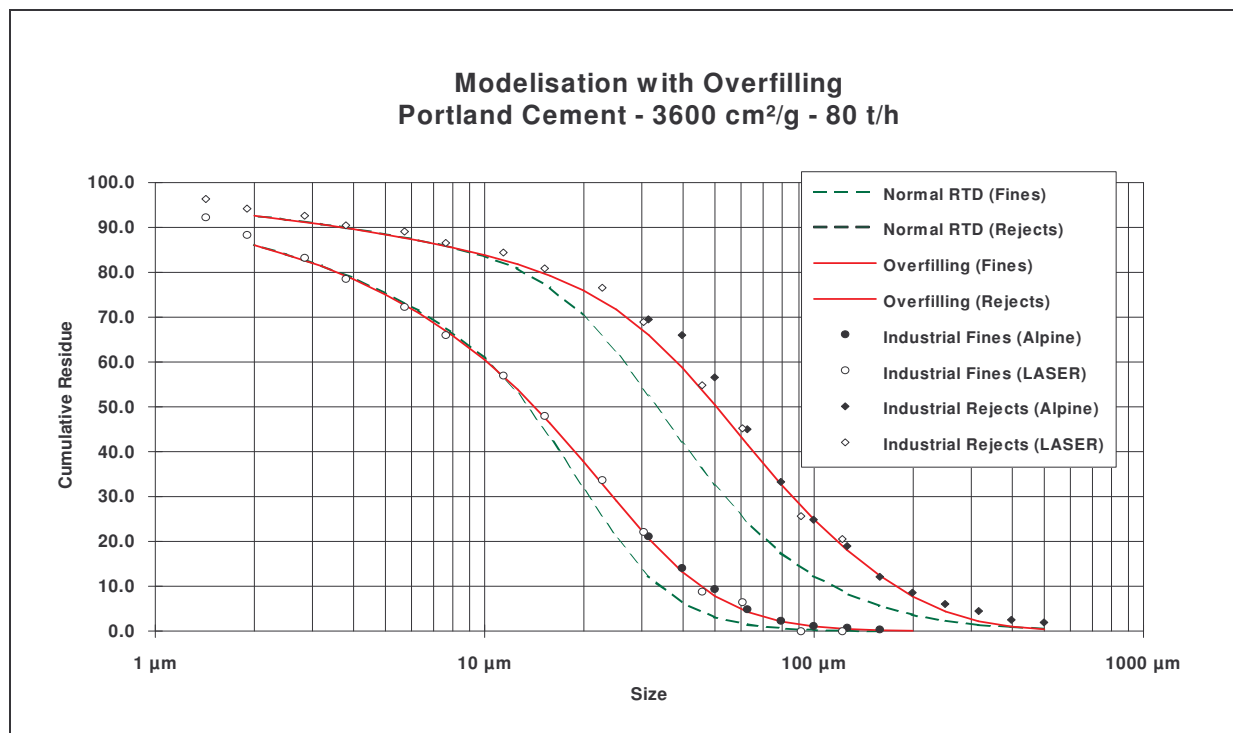
Nous avons annoncé un gain potentiel de 7,2% avec la nouvelle charge. L'exploitant a modifié sa charge suivant nos préconisations. Aujourd'hui, les statistiques sur plus de 6 mois de fonctionnement font apparaître un gain moyen de 7% avec cette nouvelle charge !

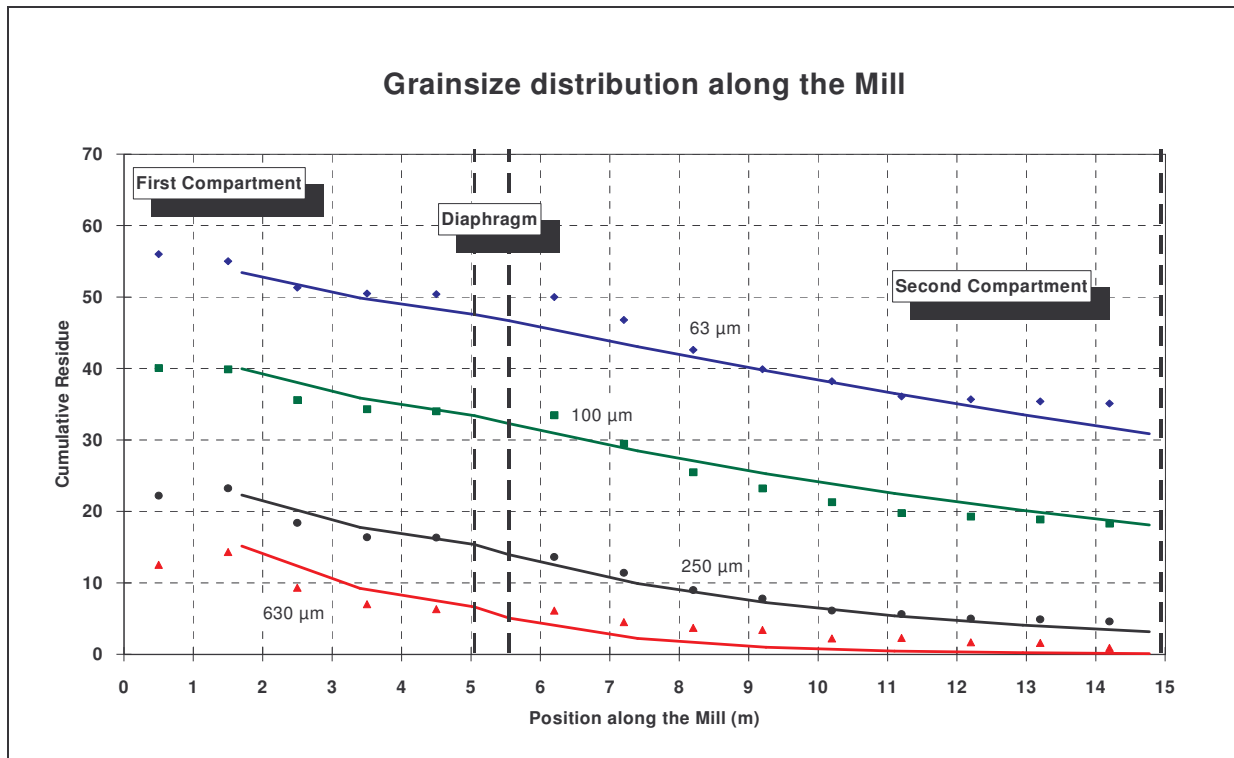
En ce qui concerne le séparateur nous pouvons annoncer avec certitude un gain supplémentaire de 10%. Nous n'avons pas encore de retour industriel puisque le changement de séparateur est encore en projet.



3.2. Broyage en présence de "sur-remplissage"

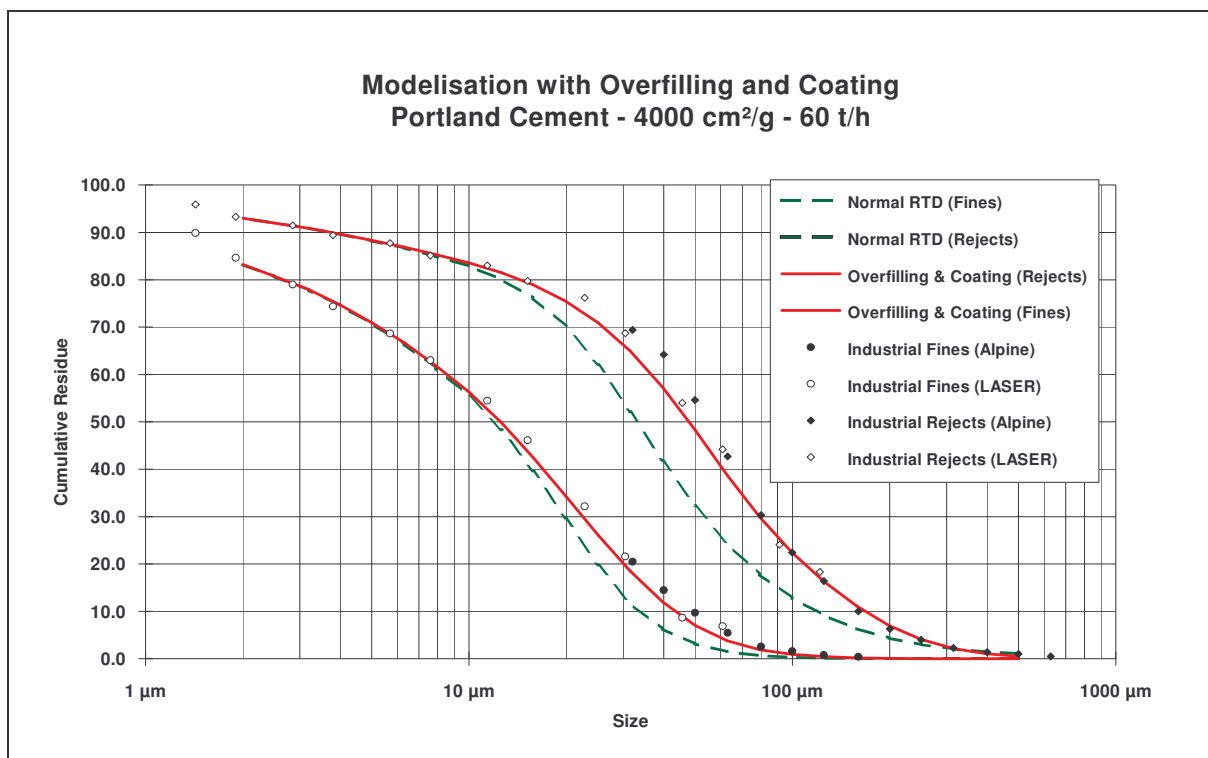
Lors de la modélisation d'un atelier classique de production de ciment portland localisé au Canada, nous avons identifié puis quantifié un sur-remplissage en deuxième chambre. Ceci a été réalisé avec les séparateurs théoriques de type "V" (cf figure du paragraphe 2.3) des parties élémentaires de la deuxième chambre. Nous avons alors retrouvé avec une excellente précision non seulement les granulométries du circuit mais aussi celles à l'intérieur du broyeur.





3.3. Broyage en présence de collage (ou enrobage) sur les boulets

Un atelier de broyage de Ciment Portland avec 20% de calcaire localisé en France, nous a permis d'aller encore plus loin dans la simulation de dysfonctionnements. En effet, la deuxième chambre présentait un sur-remplissage important mais malgré l'intégration de ce paramètre (comme pour l'atelier du Canada) la simulation n'était pas totalement satisfaisante. Elle ne l'est devenue qu'avec la prise en compte dans le modèle du problème de collage (enrobage des boulets) dont le bilan de l'atelier faisait état. Cette fois, les séparateurs théoriques utilisés sont ceux de type "D".

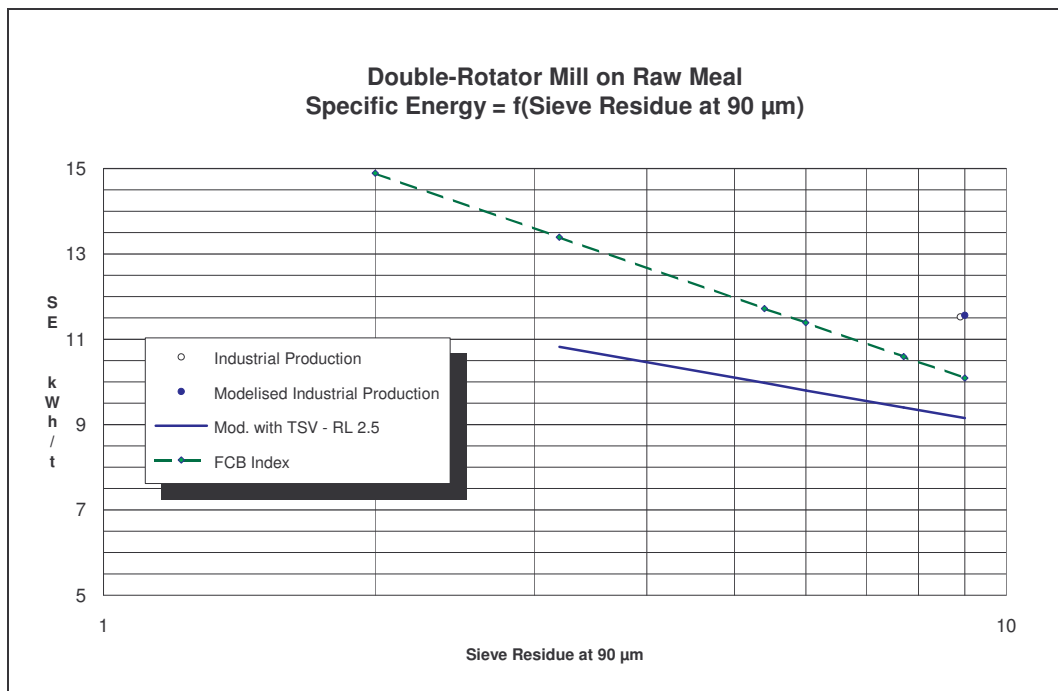


La modélisation de ces types de dysfonctionnements (collage et sur-remplissage) permet bien sûr de mieux comprendre le fonctionnement de l'atelier étudié, mais surtout de quantifier les effets sur le débit et le produit fini et donc d'apprécier objectivement l'intérêt d'une modification éventuelle.

3.4. Quantification de l'influence d'un séparateur

3.4.1. Cas d'un Bi-Broyeur à cru.

Pour un projet d'implantation d'un TSV dans un atelier de broyage de cru de cimenterie localisé en Grande Bretagne, nous avons été amené à modéliser un circuit plus complexe, à savoir un circuit équipé d'un bi-broyeur. La simulation du circuit existant a été en tout point cohérente avec le bilan industriel. Elle a permis de quantifier les possibilités d'augmentation de production en installant un TSV et en optimisant la charge en boulets.

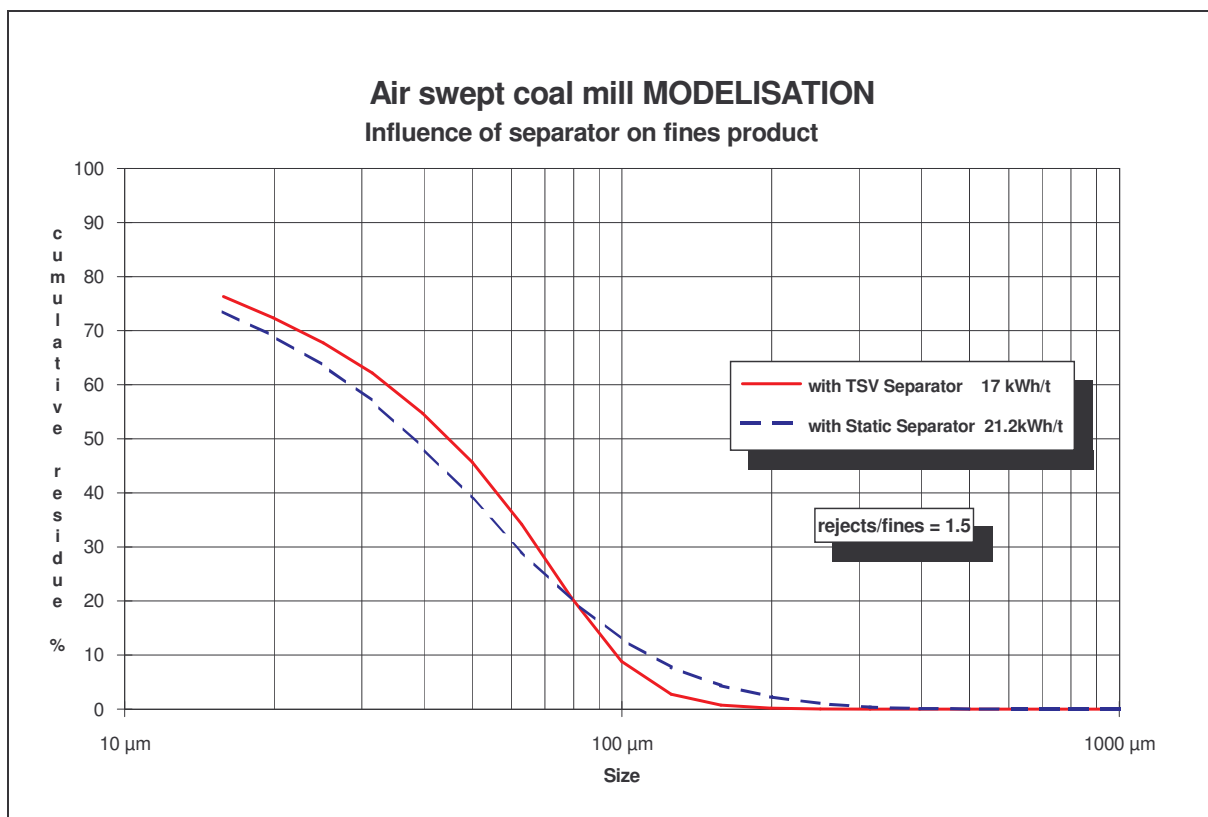
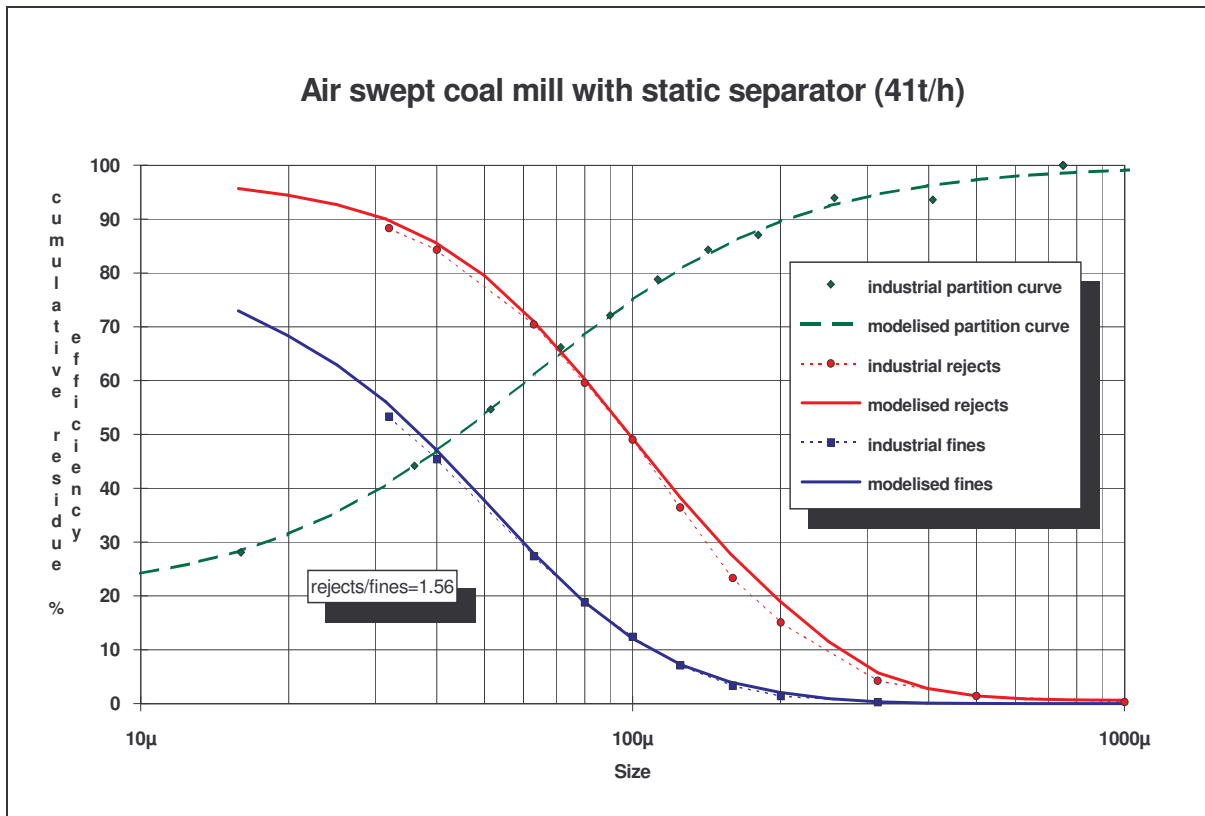


3.4.2. Cas d'un atelier de broyage de charbon.

La simulation de deux ateliers de broyage charbon dans l'industrie sidérurgique a été réalisée pour étudier et quantifier l'intérêt de séparateurs dynamiques TSV à la place des séparateurs statiques existants. Il s'agit de broyeurs à boulets ventilés FCB avec extraction pneumatique du produit à la sortie.

Le modèle s'avère tout à fait capable de simuler ce type de broyeur dont la ventilation très élevée (3 à 4 m/s dans le tube) modifie fortement la distribution des temps de séjour. Nous obtenons une parfaite cohérence aussi bien pour les granulométries du circuit que pour le débit.

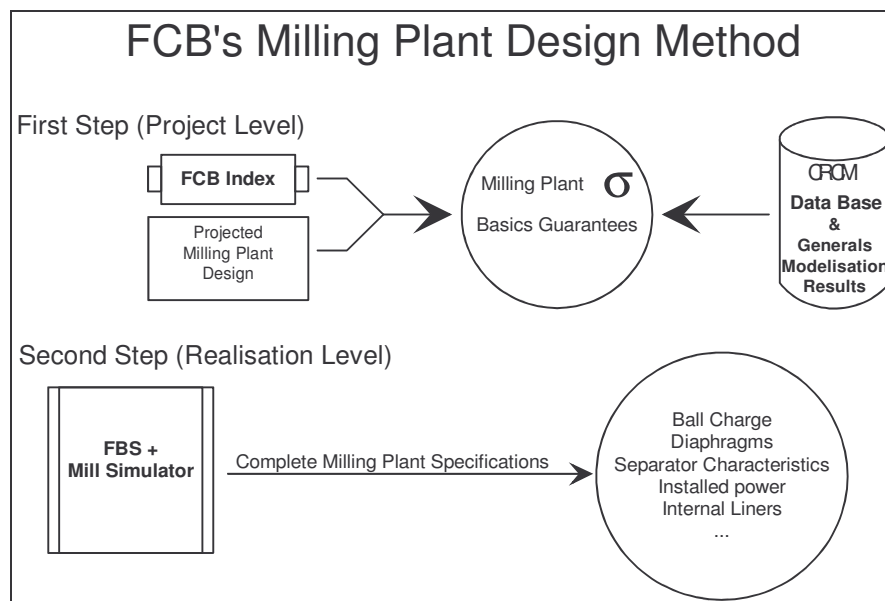
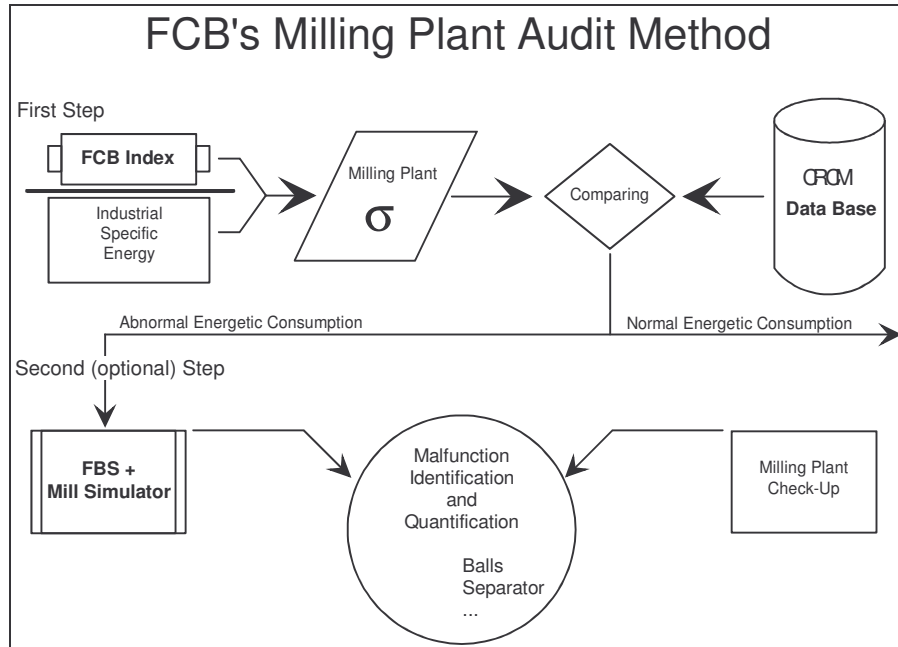
La simulation a permis de quantifier l'impact d'un séparateur TSV sur le débit de l'atelier et sur la courbe granulométrique du produit fini. Ainsi, pour un même d_{80} de 80μ , et à charge circulante constante, le TSV permet une augmentation du débit de 25% et donne un produit fini avec une distribution granulométrique plus resserrée; le refus à 40μ passe de 48% à 54%, tandis que celui à 160μ passe de 4,3% à 0,7%.



L'installation des deux TSV a été réalisé en fin d'année 1992 et a confirmé les calculs.

4. Les méthodes d'investigation FCB

Deux méthodes sont aujourd'hui suivies en routine. La première concerne les audits d'ateliers existants à des fins d'optimisation ou de remplacement d'équipement. La seconde permet de définir précisément un atelier neuf au stade du projet et de la réalisation.



Il est très important de souligner que l'ensemble des caractéristiques de broyabilité du produit sont déterminées avec le test de broyabilité (FCB Index) et le que simulateur permet ensuite de déterminer le débit et les granulométries sans qu'il soit pour cela nécessaire de "caler" le modèle avec un bilan industriel.

Les données du fonctionnement industriel ne sont utilisées que pour prendre en compte les particularités du circuit :

- Courbe de partage du séparateur.
- Anomalies éventuelles telles que bourrage et coating.
- Ventilation du broyeur.

5. Conclusions

- ✓ Le modèle est performant pour toutes les configurations rencontrées dans les ateliers de broyage ciment ou autre.
- ✓ Le modèle permet la simulation d'ateliers présentant des dysfonctionnements. Nous ne simulons pas uniquement des ateliers standards parfaits ! En effet, nous pouvons simuler et QUANTIFIER des phénomènes aussi complexes que le sur-remplissage, l'enrobage des boulets ou encore les très fortes ventilations de broyeur.
- ✓ Le modèle est applicable, et aujourd'hui appliqué, à de nombreuses matières : Clinker, bien sûr, mais aussi charbon, cru, calcaire, laitier, coke, minerai de phosphate, etc.
- ✓ Fort de ces résultats avec le broyage classique en broyeur à boulets, FCB continue ses efforts dans le domaine de la modélisation afin d'étendre son champ d'application au cas du broyage par compression. Ceci devrait donner naissance à un modèle complémentaire qui nous permettra d'intégrer à nos ateliers de broyage numériques des presses à cylindres bien sûr, mais aussi de nouveaux appareils basés sur des principes similaires dont certains, en phase finale de développement chez FCB, verront le jour à la fin de cette année.