



confidentiel

développement et vérification de modèles  
permettant de prédire et d'améliorer  
les performances d'installations industrielles  
de flottation

volume 1 - rapport de synthèse

A. Broussaud

Décembre 1985  
85 DAM 052 MIN

contrat C.C.E.  
convention n° MSM 021 F-RS

## R É S U M É

Le département "Minéralurgie" de la Direction des Activités Minières du B.R.G.M. a conduit de 1983 à 1985 des recherches dans le cadre du contrat avec la Commission des Communautés Européennes n° MSM-021-F-RS intitulé :

"Développement et vérification de modèles permettant de prédire et d'améliorer les performances d'installations industrielles de flottation".

Quatre problèmes distincts ont été abordés :

- les bilans matière statistiquement cohérents,
- la libération minérale, avec le département "Minéralogie-Géochimie-Analyse" de la Direction de la Technologie du B.R.G.M.,
- la simulation et l'optimisation du "flowsheet" d'une usine, avec la société "Barytine de Chaillac",
- la modélisation d'une cellule de flottation, avec l'Institut du Génie Chimique de Toulouse.

Ces problèmes font respectivement l'objet des volumes 2 à 5 du rapport final de l'étude. Le rapport de synthèse (volume 1) résume les objectifs, les méthodes, les résultats et les conclusions pour les différents problèmes traités. Il contient aussi en annexe deux des quatre publications effectuées dans le cadre de la recherche.

L'étude a essentiellement permis :

- surtout de montrer la faisabilité et éveiller l'intérêt de l'industrie pour une approche nouvelle : l'optimisation d'une usine par simulation. Une compétence a été acquise dans ce domaine,
- d'améliorer l'efficacité du logiciel de bilans matière du B.R.G.M. et d'en faciliter la pénétration industrielle,
- de lever une ambiguïté et de développer des méthodes nouvelles pour l'interprétation des mesures de libération minérale par analyse d'images,
- de proposer une modélisation de la cellule de flottation. Cependant le modèle proposé reste qualitatif et spécifique et de nombreux progrès seraient nécessaires dans ce domaine qui nécessite encore une approche fondamentale patiente.

## TABLE DES MATIERES

RESUME

OBJECTIFS .....	1
METHODES .....	3
ANALYSES DES RESULTATS .....	6
CONCLUSION .....	10
REFERENCES .....	11

0  
000

<u>ANNEXE 1</u> - Prédiction par simulation de l'influence de modifications de flowsheet sur les performances de l'usine de flottation de Barytine de Chaillac (Indre, France) .....	12
--	----

<u>ANNEXE 2</u> - New approaches to the interpretation of one dimensional and two dimensional measurements of mineral liberation .....	26
--	----

0  
000

## OBJECTIFS

La banalisation de l'informatique ouvre la porte à de nouveaux progrès dans la compréhension, la conception et le fonctionnement des installations industrielles de traitement des minerais, notamment de flottation. Dans cet esprit, quatre problèmes distincts ont été abordés avec le souci commun de mettre à la disposition des ingénieurs praticiens des outils performants :

- Les bilans matière cohérents. Il est depuis longtemps clair que l'ingénieur a besoin pour évaluer et conduire une usine de traitement de minerai de pouvoir en établir un bilan, faisant apparaître pour chaque secteur de l'usine la matière entrée, et la matière sortie par chaque flux. Malheureusement le minerai est une matière solide hétérogène, variable dans le temps, sur laquelle il est extrêmement difficile de faire des mesures précises. Aussi l'ingénieur dispose-t-il au mieux pour établir son bilan d'une grande quantité d'informations plus ou moins erronées et contradictoires que seul un logiciel informatique permet d'exploiter rationnellement. En l'absence de logiciel approprié, les bilans sont établis de façon arbitraire en n'utilisant qu'une partie de l'information disponible.

Le B.R.G.M. a développé un logiciel à cet effet à partir de 1981. L'objectif initial dans le cadre du présent programme était de confronter les résultats avec ceux d'un logiciel concurrent développé par Warren Spring Laboratory (G.B.). Nous verrons qu'il a en fait été possible d'aller beaucoup plus loin que cet objectif initial.

- La libération minérale. La flottation est un procédé industriel qui permet de séparer d'une suspension de particules de solide dans l'eau certaines particules rendues sélectivement hydrophobes par des réactifs appropriés. Pour que cette séparation soit efficace il est nécessaire que les particules de minerai soient assez petites pour que chacune ne soit constituée que d'un seul minéral, c'est-à-dire que le minerai ait atteint un degré suffisant de "libération minérale".

La mesure de la "libération minérale" est très importante pour la mise au point d'un procédé de flottation, car elle permet de définir la finesse du broyage préalable nécessaire. Pour effectuer une telle mesure, il faut d'abord réaliser une section polie d'un grand nombre de particules enrobées dans une matrice de résine, sur laquelle on effectue des mesures automatiquement avec un analyseur d'images. Le B.R.G.M. a développé depuis plus de 10 ans une méthodologie à cet effet. Bien que la méthodologie soit opérationnelle, une difficulté fondamentale subsiste pour le passage de mesures dans le plan de la section polie à l'information dans l'espace à trois dimensions qui intéresse l'ingénieur de traitement de minerais.

L'objectif initial dans le cadre du présent programme était de sélectionner entre deux façons de conduire les mesures dans le plan (mesures à deux dimensions dans le plan et mesures à une dimension, le long de droites d'observation alléatoires dans le plan) celle qui conduisait à la meilleure information sur l'espace à trois dimensions utilisable en pratique. Là encore, nous verrons qu'il a été possible de dépasser cet objectif.

- Le développement de modèles de flottation. Les appareils industriels dans lesquels s'effectue la flottation des minerais ou cellules de flottation, ont un fonctionnement complexe du fait notamment de la présence de mélanges triphasés (fines particules de minerai solides, phase liquide constituée d'eau et de réactifs en solution, bulles d'air auxquelles s'attachent les particules hydrophobes). Il est utile de développer des modèles physiques et mathématiques de ces appareils pour permettre d'une part l'amélioration de leur conception et de leur fonctionnement, et d'autre part la prévision de leur performance pour la conception ou l'optimisation d'une usine de traitement de minerai.

Dans ce contexte l'objectif initial portait sur deux types de modèles :

- . il s'agissait d'une part de contribuer à élaborer un "modèle de connaissance", c'est-à-dire un modèle reposant sur la compréhension de phénomènes physiques, et explicitant l'influence de paramètres tels que agitation, débit d'air. Cette recherche est de caractère fondamental,
  - . il s'agissait d'autre part de définir des modèles mathématiques relativement simples, rapidement opérationnels, permettant sans attendre les futurs progrès au niveau fondamental, de prendre en compte la flottation dans les logiciels de simulation et de CAO (conception assistée par ordinateur). Ce deuxième objectif a un caractère appliqué.
- La confrontation de résultats calculés ou obtenus en laboratoire, et de résultats menés à l'échelle industrielle. Les essais industriels coûtent toujours cher à cause des quantités de matière et de la taille des appareils concernés. Ils sont dangereux car en cas d'échec ils menacent la production de l'usine. Ils sont enfin très difficiles à interpréter à cause de l'imprécision inévitable des mesures. Toute nouvelle méthodologie fiable permettant de prédire efficacement des résultats industriels et donc de limiter la quantité d'essais industriels pour améliorer une usine apporte donc un progrès important.

L'objectif initial du contrat sur ce problème était très général, et prévoyait par exemple l'examen de l'apport de mesures hydrodynamiques, ou des informations sur la libération minérale pour l'interprétation des résultats industriels. Une réflexion en cours d'étude a conduit à recentrer cet objectif :

- . les modèles de cellules de flottation prenant en compte les paramètres hydrodynamiques ne sont pas encore assez précis pour être utilisables dans l'interprétation quantitative des résultats industriels,
- . la mesure de libération minérale et notre logiciel de bilan matière statistiquement cohérent constituent par contre des outils opérationnels utilisés dans nos activités commerciales pour la compréhension des procédés. Il n'a donc pas paru indispensable de donner dans le cadre du présent contrat de nouvelles démonstrations de leur efficacité,
- . la simulation est a priori l'outil le plus séduisant pour prévoir des résultats industriels. Des modèles mathématiques relativement simples du type de ceux mentionnés plus haut permettent déjà de simuler des usines complètes de flottation. Aussi a-t-il été décidé de consacrer une part importante de la recherche à l'évaluation de l'apport concret de la simulation pour l'optimisation d'une usine existante. Ce travail a été conduit avec la société "Barytine de Chaillac".

## METHODES.

Les objectifs de l'étude font apparaître des sujets techniquement distincts. Aussi la recherche a pu être décomposée en modules en grande partie indépendants, auxquels correspondent des méthodes de travail distinctes.

Bilans matière cohérents (volume 2). L'échange de données prévu avec Warren Spring Laboratory (Grande Bretagne) pour comparaison des résultats de calculs n'a pas pu avoir lieu. Le B.R.G.M. a bien fait parvenir deux jeux de données complets à WSL, mais aucun jeu de données ni résultat de calcul n'est parvenu en retour au B.R.G.M.

Nous sommes cependant restés fidèles à l'esprit du programme en confrontant les résultats obtenus avec le logiciel développé par le B.R.G.M. aux résultats obtenus avec un logiciel développé par l'Université Laval (Québec), à partir d'un ensemble de données réelles concernant une usine de flottation de barytine. Cette confrontation a montré une grande similitude des résultats, alors que les algorithmes des deux logiciels sont très différents, et peut être interprétée comme une vérification du logiciel.

Au-delà de cette vérification, il est apparu opportun, pour élargir le champ d'application réel du logiciel de lui apporter quelques perfectionnements :

- des options nouvelles ont été introduites pour permettre l'établissement de bilans matière en présence de jeux de données particuliers,
- la présentation et le dialogue avec l'utilisateur ont été améliorés, pour faciliter la pénétration du logiciel en milieu industriel.

Libération minérale (volume 3). Le travail sur ce sujet a été conduit parallèlement par les départements "Minéralogie-Géochimie-Analyse" et "Minéralurgie" du B.R.G.M.

La méthode expérimentale utilisée seule a une portée très limitée en recherche sur la libération minérale. L'utilisation de particules provenant d'un minerai réel présente en effet un inconvénient majeur : leur "libération minérale" réelle n'est pas connue et ne pourrait l'être qu'au prix de manipulations lourdes dans des cas particuliers rares.

L'approche analytique, largement utilisée dans le monde, nécessite des hypothèses fortes dont le caractère raisonnable ne peut être apprécié que par la confrontation à l'expérience.

La simulation de particules et la simulation de la mesure de leur "libération minérale" par différentes méthodes est alors particulièrement attractive, à condition toutefois de disposer d'un ordinateur performant.

Cette méthode (simulation de particules et de leur observation) a été abondamment utilisée dans l'étude qui a comporté trois phases distinctes :

- une première phase de simulation, orientée vers la comparaison de différents modes de mesure et la recherche de la meilleure évaluation de la réalité à trois dimensions à partir de ces mesures. Un développement théorique important a été introduit, ayant été suggéré par les résultats des simulations,
- une autre phase de simulation, menée indépendamment de la première s'est attachée à rechercher de façon empirique un facteur correcteur à apporter aux résultats d'analyse dans le plan pour trouver un ordre de grandeur de la libération réelle dans l'espace à trois dimensions,
- dans un troisième temps, les conclusions des deux études de simulation ont été confrontées en les appliquant à des mesures réelles sur un minerai de cuivre.

Modèle "de connaissance" de la cellule de flottation (volume 5). Ce sujet de recherche présentant un caractère fondamental, a été abordé en liaison avec une équipe universitaire spécialiste des problèmes de génie chimique et d'hydrodynamique, à l'Institut du Génie Chimique de Toulouse (France). Il fait l'objet d'une thèse, le chercheur étant financé dans le cadre de ce contrat.

L'étude a été conduite sur une base expérimentale. Un dispositif permettant de travailler en continu avec une cellule de laboratoire a été mis au point, puis utilisé pour la flottation d'un mélange synthétique hématite-quartz. Le dispositif expérimental permettait de faire varier et de mesurer les paramètres hydrodynamiques à suivre : vitesse de rotation du rotor (agitateur-disperseur d'air), débit d'air, mais aussi position du soustirage des solides non évacués dans la mousse, et volume de mousse à la surface de la cellule.

C'est à partir des résultats de nombreux essais conduits avec ce dispositif qu'a été conduite une réflexion pour tenter de dégager un modèle "de connaissance".

Simulation d'une usine de flottation (volume 4). Ce module de recherche a été conduit en collaboration avec la Société "Barytine de Chaillac", premier producteur français de barytine. L'usine de la société, implantée dans le département français de l'Indre, produit environ 100 000 t/an de concentré de barytine par un procédé comportant principalement broyage, hydrocyclonage, flottation et filtration.

Très schématiquement l'étude a consisté successivement à :

- . construire un modèle de simulation utilisable avec un logiciel développé par le B.R.G.M,
- . valider ce modèle, en comparant ses prédictions avec des données statistiques disponibles,
- . utiliser ce modèle validé pour simuler différents flowsheets de l'usine et recommander un flowsheet plus performant que le flowsheet initial.

L'étape de construction d'un modèle a elle-même comporté plusieurs phases :

- . d'abord une campagne de mesure a été organisée, pour recueillir des données sur la marche effective des différents appareils de l'usine. Des échantillons ont été prélevés puis soumis à l'analyse granulométrique et chimique dans les laboratoires de l'usine,
- . les données issues de cette campagne étant inévitablement entachées d'incertitudes importantes le logiciel de bilans matière cohérents mentionné plus haut a été utilisé pour dresser un bilan détaillé équilibré de la totalité de l'usine,
- . différents modèles mathématiques simples ont été incorporés dans le logiciel général de simulation du B.R.G.M. pour représenter les opérations unitaires de broyage, d'hydrocyclonage et de flottation,
- . les paramètres ajustables de ces modèles ont été choisis pour que ces modèles représentent au mieux les performances des appareils correspondant au bilan détaillé établi précédemment,
- . l'assemblage de ces modèles selon le flowsheet réel de l'usine constitue le modèle de simulation global.

Ce modèle a pu être utilisé pour simuler des variantes du flowsheet, des variations de débit d'alimentation, et des variations de teneur d'alimentation.

Ce modèle a été considéré comme valide après qu'il ait été constaté que les tendances globales qu'il prévoyait en cas de variations de débit et de qualité d'alimentation coïncidaient convenablement avec celles prévus par un modèle statistique "boite noire" obtenu par regression des données quotidiennes globales de production pour l'année 1983.

## ANALYSE DES RESULTATS.

Les résultats des recherches sont présentés en détail dans les volumes 2 à 5 du rapport final. Seuls les points principaux sont rappelés ici, et évalués en termes de conformité aux objectifs et de conséquences concrètes à court termes, pour le B.R.G.M. et pour l'industrie minière.

### Bilans matière cohérents (volume 2).

La comparaison détaillée des bilans cohérents produits sur un même cas par les logiciels du B.R.G.M. et de l'Université Laval (Québec) montre que ceux-ci bien que légèrement différents (ce qui est inévitable les algorithmes utilisés étant très différents) sont systématiquement très proches, y compris pour la correction des données les plus "fausses". Cette comparaison permet non seulement de renforcer la confiance dans les algorithmes utilisés, mais aussi d'illustrer la puissance de l'outil pour diagnostiquer et corriger les erreurs dans la chaîne "échantillonnage/analyse/transmission des résultats".

Les améliorations apportées au logiciel du B.R.G.M. dans le cadre du contrat portent :

- . d'une part sur l'algorithme :
  - . possibilité de tenir compte simultanément des informations sur les compositions granulométriques et sur les compositions chimiques, pour établir le bilan matière,
  - . possibilité de tenir compte des contraintes supplémentaires lorsqu'on dispose d'analyses chimiques complètes ("bouclant à 100 %"),
  - . possibilité d'utiliser les informations granulométriques, même si le circuit incorpore un ou des broyeurs,
- . d'autre part sur la présentation, rendant l'utilisation du logiciel plus efficace pour un ingénieur non informaticien.

Globalement ces améliorations ont transformé un outil certes déjà opérationnel en un outil éprouvé, plus souple, convenable pour une diffusion vers l'industrie. La réalité de cette transformation est attestée par la cession en 1985 sur une base commerciale du logiciel à un groupe minier suédois de dimension internationale.

Libération minérale (volume 3).

Plusieurs méthodes inédites d'évaluation quantitative de la proportion de particules réellement libérées sont proposées :

- . une méthode, justifiée par une théorie nouvelle permet de calculer un estimateur P de la proportion de particules réellement libérées à partir de la proportion PS de particules apparemment libérées par mesure à deux dimensions (dans le plan de la section polie) et de la proportion PL de particules apparemment libérées par mesure à une dimension (selon des traversées linéaires alléatoires) :

$$P = 2 PS - PL \quad (1)$$

Il est démontré que P est en général un estimateur par excès, meilleur que les estimateurs connus précédemment.

- . une seconde méthode exploite les mesures bidimensionnelles par une formule de correction totalement empirique valable en absence d'inclusions finement disséminées :

$$p \approx \frac{4 PS - 1}{3} \quad \text{si } PS > 0,25 \quad (2)$$

- . une autre méthode suggérée par la simulation consiste à restreindre les mesures dans le plan aux particules interceptées par le plan d'observation au voisinage de leur zone équatoriale.

Ces trois méthodes suggérées par les simulations ont été utilisées conjointement pour l'interprétation de mesures concernant 21 échantillons de teneurs et de granulométrie variables provenant d'un minerai de cuivre et d'un minerai de cuivre zinc.

Dans tous les cas les estimations de la proportion de particules libérées à partir des différentes méthodes se sont avérées concordantes, à condition de respecter quelques points pratiques influençant la représentativité statistique des mesures : nombre de particules observées, façon de compatibiliser les mesures.

A l'issue de l'étude, l'objectif initial qui consistait à lever une ambiguïté sur l'intérêt des mesures à deux et à une dimension est pleinement atteint :

- . si un seul type de mesure est possible, c'est incontestablement la mesure à deux dimensions qui est la plus riche d'information. L'information contenue peut être avantageusement corrigée par la formule (2) en l'absence de fines inclusions disséminées,
- . la mesure à une dimension est moins riche utilisée seule, mais elle apporte une information complémentaire qui peut être exploitée dans un grand nombre de cas par la formule (1),

- . si un grand nombre de sections peuvent être observées, la mesure à deux dimensions en zone équatoriale sera très performante, sans correction.

Les nouvelles méthodes sont applicables en pratique et sont plus complémentaires que concurrentes.

L'étude apporte ainsi une amélioration de la méthodologie d'interprétation des mesures expérimentales de libération minérale par analyse d'images. La mesure de libération minérale étant un service rendu en routine par le département "Minéralogie-Géochimie-Analyses" du B.R.G.M. à l'industrie minérale, l'étude entraîne une amélioration réelle immédiate de la qualité de l'information qui peut être fournie aux ingénieurs minéralurgistes sur la libération de leur minerai.

#### Modèle de connaissance de la cellule de flottation (volume 5).

Le problème traité ayant un caractère fondamental, c'est d'abord sur le plan scientifique qu'il convient d'examiner les résultats.

L'étude a permis de mettre en évidence clairement certains phénomènes et de caractériser l'influence de plusieurs paramètres, montrant l'insuffisance des modèles décrits précédemment dans la littérature :

- . la géométrie de la cuve, en particulier la hauteur du point de soutirage de la matière non flottée a une influence considérable, qui s'explique par un gradient de concentration en solide suivant la verticale. Ce point montre la faiblesse de tous les modèles faisant l'hypothèse d'un milieu parfaitement agité dans la cellule,
- . le volume de la "phase" mousse influence fortement la qualité des concentrés (matière flottée), un relavage se faisant au sein de cette phase. Ce phénomène a été clairement illustré dans l'étude. Ce résultat montre qu'un modèle de connaissance doit faire apparaître distinctement deux phases dans la cellule : la pulpe et la mousse,
- . pour chaque vitesse de rotation de l'agitateur il existe un débit d'air critique au-delà duquel la cellule s'engorge, c'est-à-dire que les solides s'y accumulent jusqu'à l'arrêt complet du fonctionnement. Ce débit d'air critique est d'autant plus élevé que la vitesse de rotation est élevée (augmentation presque linéaire).

Cependant l'étude a abouti à proposer un modèle qualitatif et spécifique, donc décevant la cellule de flottation. Elle constitue une contribution certaine à l'amélioration de la connaissance, mais de nombreux progrès restent nécessaires avant qu'un modèle de connaissance original et puissant soit disponible.

Cette partie de l'étude n'a donc pas de retombées nettes à court terme, sauf peut être une sensibilisation de certains constructeurs de matériels aux paramètres "hauteur de soutirage" et "volume de mousse". A terme, le sujet paraît relever davantage d'équipes universitaires aux préoccupations plus fondamentales, pouvant disposer de nombreux étudiants pour mener un travail expérimental de longue haleine.

Simulation d'une usine de flottation (volume 4).

Les résultats de ce module méritent une attention particulière à cause des retombées concrètes qui les ont accompagnés.

La démarche décrite ci-avant a permis de développer un modèle utilisé pour la simulation de l'ensemble de l'usine de Chaillac supposée fonctionner en régime permanent stable. Avec un tel modèle, il suffit pour simuler un fonctionnement de l'usine de fixer d'une part l'alimentation de l'usine (débit horaire, composition granulométrique et chimique du minerai), et d'autre part le flowsheet détaillé y compris les dimensions des appareils. A partir de ces variables, le modèle calcule les flux prévisionnels de matière en tous points de l'usine (débit et composition). L'information produite dépasse donc largement un simple bilan de l'usine. Elle permet l'analyse de détail de conséquences prévisibles d'une modification simulée.

Le fait qu'il a été possible de valider le modèle, en le comparant à un modèle global purement statistique (type boîte noire) de l'ensemble de l'usine, constitue une originalité de l'étude.

Le modèle validé a été utilisé pour simuler 7 flowsheets différents des circuits de flottation, correspondant soit à des situations anciennes connues à titre de vérification du modèle, soit à des idées de modifications. Deux de ces nouveaux flowsheets sont apparus plus prometteurs que le flowsheet en service, laissant espérer une amélioration de rendement de l'ordre de 3 %, à qualité de concentré inchangée.

Cette phase de recherche a été l'occasion d'une coopération très constructive entre la société "Barytine de Chaillac" et le B.R.G.M. A l'issue de cette phase, d'autres simulations ont été conduites par le B.R.G.M. pour "Barytine de Chaillac" dans un cadre contractuel commercial séparé, des essais industriels ont été réalisés par l'exploitant et ont confirmé malgré les difficultés habituelles d'interprétation, les tendances prévues par la simulation. Aujourd'hui, Barytine de Chaillac s'apprête à investir sur la base de cet ensemble.

L'étude a donc eu indiscutablement des retombées concrètes à court terme, tant pour la société d'exploitation que pour le B.R.G.M. Mais au-delà de ces conséquences immédiates, l'étude a démontré pour la première fois la faisabilité d'une approche nouvelle pour l'optimisation des flowsheets industriels.

Ce caractère de démonstration a éveillé l'intérêt d'une partie de l'industrie minière et a engendré la naissance d'une activité de prestation de service dans ce domaine.

## CONCLUSION

- . Le résultat le plus important de l'étude nous paraît être d'identification d'un domaine où la modélisation a des retombées industrielles à court terme : la conception/optimisation d'usines assistées par simulation.

La démonstration réussie de cette approche avec la société "Barytine de Chaillac" a déclenché l'intérêt des industriels miniers et nous a permis de créer une compétence dans ce domaine. Cette approche paraît appelée à devenir le complément indispensable des études en usine pilote et des essais industriels.

- . L'étude a aussi contribué à la pénétration de l'industrie minière par la méthode des "bilans matière cohérents" en permettant la transformation d'un logiciel en un outil plus souple, plus performant et plus facile d'emploi qui a déjà pu être implanté dans un grand groupe minier suédois.
- . Les perspectives d'avenir pour ces deux outils (simulation et bilan matière) semblent aujourd'hui liées à leur transfert sur micro-ordinateur, et à leur implantation sur les sites industriels, pour utilisation hors ligne ou en ligne.
- . En matière de "libération minérale", l'étude a levé une ambiguïté méthodologique sur l'interprétation des mesures, apportant ainsi une contribution à l'efficacité du service rendu aux ingénieurs minéralurgistes par l'analyse d'images. Il ne paraît plus à court terme prioritaire de privilégier les recherches sur la théorie d'interprétation, mais plutôt celles sur les moyens expérimentaux d'identification automatique des phases.
- . Seuls les travaux pour un "modèle de connaissance" de la cellule de flottation n'engendrent pas de retombées industrielles à très court terme. Ce sujet paraît relever encore d'une approche fondamentale patiente, et il est prématuré de l'intégrer dans les préoccupations d'un centre de recherche soucieux de l'application industrielle de ses travaux à court terme.
- . Les résultats ont fait l'objet de diffusion, d'une part à l'initiative de la C.C.E. dans le cadre de réunions d'échanges scientifiques organisées à Bruxelles (1984), Orléans - France (1985), Ottawa - Canada (1985), et d'autre part à travers 4 publications, dont certaines sont reproduites intégralement en annexe.

REFERENCES

BROUSSAUD A., BLOISE R., BRACHET C.

*"Contribution de l'outil informatique à l'amélioration et à la conception d'installations de traitement des minerais"*

Table-ronde de la Société de l'Industrie Minérale "Modélisation des opérations unitaires en minéralurgie", Paris, France, 9 décembre 1983 ; In Industrie Minérale, Série Les Techniques, n° 9/84, p. 697-706, (1984).

BROUSSAUD A., BRACHET C., FOURNIGUET G., AUDOLI H., LAPLACE G.

*"Prédiction par simulation de l'influence de modifications de flowsheet sur les performances de l'usine de flottation de barytine de Chaillac (Indre, France)"*

15<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress, Cannes, France, 2-9 juin 1985, Tome III, p. 49-61 (1985).

GATEAU C., BROUSSAUD A.

*"New approaches to the interpretation of one dimensional and two dimensional measurements of mineral liberation"*

4<sup>th</sup> European Symposium for Stereology, Goteborg, Suède, 26-30 août 1985, 6 pages.

BROUSSAUD A., BARBERY G.

*"Mineral liberation analysis : simulation and assessment of reconstruction methods for 1-D and 2-D image analyzers"*

16<sup>th</sup> Annual Meeting of the Fine Particle Society, Miami Beach, Floride, Etats-Unis, 22-26 avril 1985 ; 3 pages.

ANNEXE 1

PREDICTION PAR SIMULATION DE L'INFLUENCE DE MODIFICATIONS DE  
FLOWSHEET SUR LES PERFORMANCES DE L'USINE DE FLOTTATION  
DE BARYTINE DE CHAILLAC (INDRE, FRANCE)

—  
BROUSSAUD A., BRACHET C., FOURNIGUET G., AUDOLI H., LAPLACE G.

—  
15<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress, Cannes, France,  
2-9 juin 1985, Tome III, p. 49-61 (1985).

PREDICTION PAR SIMULATION DE L'INFLUENCE DE MODIFICATIONS DE  
FLOWSHEET SUR LES PERFORMANCES DE L'USINE DE FLOTTATION  
DE BARYTINE DE CHAILLAC (INDRE, FRANCE)

A. BROUSSAUD<sup>1</sup>, C. BRACHET<sup>1</sup>, G. FOURNIGUET<sup>1</sup>, H. AUDOLI<sup>2</sup>, G. LAPLACE<sup>2</sup>

RESUME

L'exploitation de "Barytine de Chaillac" (Indre, France) est le plus important centre de production de barytine en Europe occidentale.

Un modèle permettant la simulation de l'usine de flottation est élaboré à partir des résultats d'un échantillonnage ponctuel. Le modèle est supporté par le logiciel développé par le BRGM pour la simulation d'usines en régime permanent stable.

L'influence des conditions d'alimentation de l'usine sur les résultats obtenus par simulation est comparée aux tendances mises en évidence par une étude statistique des relevés quotidiens de production. La bonne concordance constatée permet de valider le modèle et de l'utiliser pour simuler différents flowsheets et sélectionner parmi ces flowsheets celui qui doit assurer une meilleure récupération de la barytine.

INTRODUCTION

L'exploitation de la société "Barytine de Chaillac" ouverte en 1976 dans le département de l'Indre (France) et appartenant actuellement au groupe Solvay est un des plus importants centres de production de barytine en Europe occidentale (Réf. 10).

Le minerai de type ferrobarytique ou gréseux, à gangue d'oxydes de fer et de quartz, est extrait à ciel ouvert, puis traité dans l'usine qui produit environ 100 000 t/an de concentrés de barytine destinés à quatre marchés :

- . la chimie du baryum,
- . les boues de forage, en particulier pour l'industrie pétrolière,
- . les charges minérales,
- . les bétons denses.

Le procédé permet également la récupération comme sous-produits des oxydes de fer et des sables siliceux commercialisés.

La figure 1 représente le flowsheet de l'usine à l'époque où cette étude a été entreprise. A l'origine, la production d'un concentré à haute teneur n'était réalisable qu'après l'élimination des fractions fines inférieures à 60 microns, donc au détriment de la récupération. Le traitement de ces

---

1. BRGM - département Minéralurgie - BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX (France)  
 2. BARYTINE DE CHAILLAC - BP 1 - 36310 CHAILLAC (France)

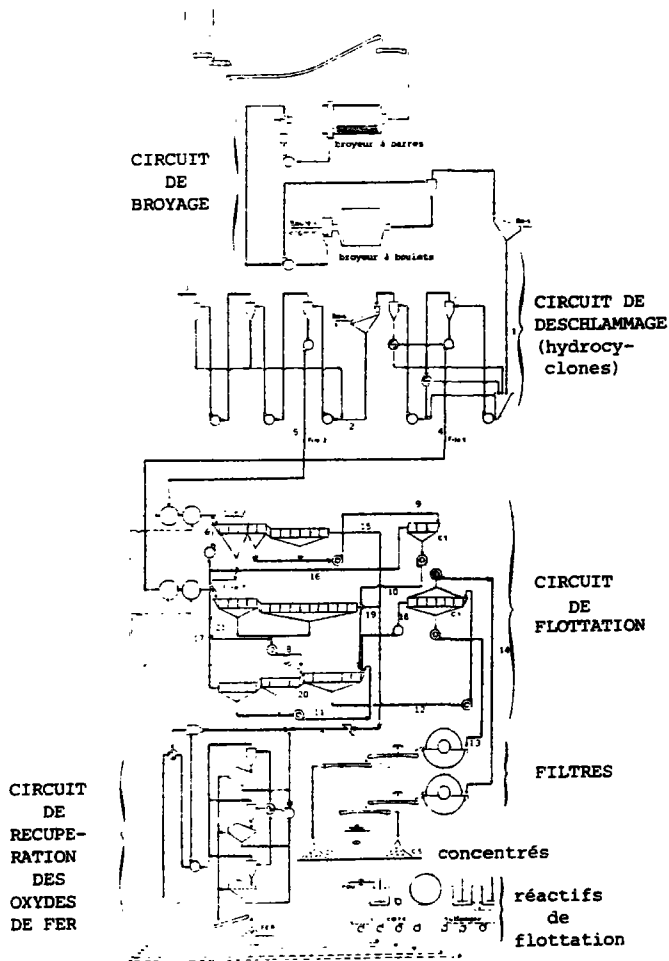


FIGURE 1 - FLOWSHEET DE L'USINE DE CHAILLAC EN 1983.

fractions fines donnait alors un concentré "fatal", ne répondant pas aux exigences de l'industrie chimique, mais de densité élevée et apte à être utilisé dans les boues de forage.

Des progrès technologiques et des améliorations successives ont progressivement permis de produire un seul concentré à haute teneur, mais la complexité du circuit de flottation qui est donc le reflet de l'évolution historique de l'atelier permet de répondre aux normes spécifiques des différentes industries consommatrices par de simples jeux de "by-pass". Ce flowsheet n'est peut être pas optimum et son amélioration est sans doute encore possible

ble sans investissements lourds.

Pour cette raison, l'usine de "Barytine de Chailac" constitue un terrain d'application adéquat pour le logiciel de simulation d'usine de traitement de minerai développé par le BRGM (Réf. 1, 4). En effet, un des objectifs principaux de ce logiciel est de permettre l'amélioration des flowsheets en évitant le recours aux expériences industrielles (tests de modification de flowsheet par exemple) dont tous les exploitants savent qu'elles sont difficiles à réaliser et surtout à interpréter, et coûteuses.

Ce logiciel permet de calculer de façon prévisionnelle les débits de matière et la composition de la matière en tous points d'une usine supposée en régime permanent stable, dès lors que les débits et compositions à l'entrée de l'usine sont spécifiés. Chaque opération unitaire est représentée par un modèle supporté par un module de calcul.

Une méthode de calcul simple permet de résoudre le problème quelle que soit la complexité du flowsheet, qui peut incorporer de nombreuses boucles de recyclage imbriquées et être soumis à diverses contraintes.

Une collaboration active entre "Barytine de Chaillac" et le département Minéralurgie du Bureau de Recherches Géologiques et Minières a été entreprise en 1983. Elle a abouti à la construction d'un modèle de simulation de l'usine de Chaillac, puis à sa validation par confrontation avec certaines données sur le fonctionnement réel de l'usine, et enfin à son utilisation pour proposer de nouveaux flowsheets assurant une meilleure récupération de la barytine.

Les paragraphes suivants décrivent ces résultats, en commençant par la démarche suivie pour construire le modèle de simulation.

### ELABORATION D'UN MODELE DE SIMULATION.

L'étude s'est limitée à la modélisation puis à la simulation de la partie principale de l'usine composée du circuit fermé du broyeur à boulets, du circuit de deschlammage, du circuit de flottation et des deux filtres à tambour. Cet ensemble est désigné dans cette étude par le terme "usine" dans un souci de simplification.

### Méthodologie générale.

Avant de définir un modèle de simulation d'une usine, il est nécessaire d'acquérir une connaissance chiffrée détaillée de sa marche réelle. Cette connaissance est indispensable pour sélectionner puis calibrer des modèles

des principales opérations unitaires de l'usine : broyeur, hydrocyclones, cellules de flottation.

L'acquisition de cette connaissance puis son utilisation pour l'élaboration d'un modèle et l'exploitation de ce modèle requièrent une méthodologie rationnelle schématisée figure 2.

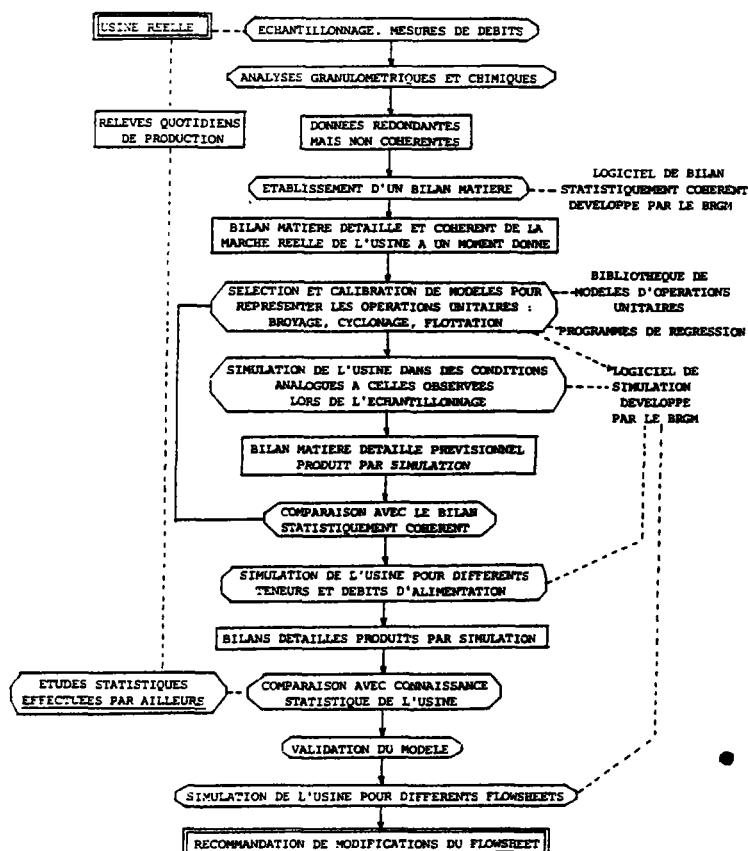


FIGURE 2 - METHODOLOGIE GENERALE DE L'ETUDE.

### Echantillonnage.

Il serait souhaitable de disposer de plusieurs jeux de données complets, comportant les caractéristiques de tous les flux de matière de l'usine (débit et nature), pour différentes conditions de marche de l'usine. Malheureusement l'obtention de telles données est très coûteuse et la méthode employée ici consiste à acquérir d'abord une information sur la marche de l'usine pendant une journée déterminée (le 12 avril 1983). Ce jour-là l'usine a traité un minerai de type ferrobarytique au débit horaire moyen de 52,3 t/h sur la journée sans incident de marche notable.

L'objectif étant la simulation de l'usine en régime permanent, il a été nécessaire de faire l'hypothèse qu'un régime d'équilibre stable est atteint.

55 échantillons ont été prélevés manuellement, avec un maximum de soin, puis décomposés en 8 tranches granulométriques et chaque tranche a fait l'objet d'analyses chimiques  $BaSO_4$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , pour permettre de suivre chacun de ces composants pour chaque tranche granulométrique, dans l'ensemble du circuit.

Des débits de pulpe ont été mesurés avec un débitmètre à ultrasons portatif, mais les mesures se sont révélées peu fiables.

### Bilan matière statistiquement cohérent.

La phase d'échantillonnage et de traitement des échantillons produit une masse d'informations chiffrées surabondantes pour établir un bilan matière détaillé de l'usine, mais inévitablement entachées d'erreurs de mesure et donc imparfaitement cohérentes. Le programme de "bilans matières statistiquement cohérents" développé par le BRGM permet d'utiliser toutes ces informations pour produire une image détaillée de la marche de l'usine le jour de l'échantillonnage, sous forme d'un ensemble complet et cohérent de flux décrivant en détail la circulation de la matière dans l'installation en marche équilibrée.

Le programme détermine pour 165 flux de matière (soit pour 32 composants par flux, 5 280 débits partiels) des estimations qui satisfont les équations de conservation de la matière (cohérence du bilan), tout en étant aussi proches que possible des mesures effectuées, compte tenu de coefficients de pondération.

Ces coefficients sont représentatifs de la "confiance" associée à une mesure. Pour une mesure  $a$  donnée "à  $\alpha$  % près", en l'absence d'une étude systématique de la variance expérimentale, l'erreur de mesure est une variable aléatoire de moyenne nulle et d'écart type :

$$\sigma = \frac{a \alpha}{100}$$

Le coefficient de pondération associé à  $\alpha$  est donné par :

$$W = \frac{1}{\sigma^2}$$

Le problème est posé de la manière suivant :

m	nombre de flux	
n	nombre de noeuds	
nc	nombre de constituants	
mij	terme de la matrice de circulation : mij	$\left. \begin{array}{l} -1 \text{ le flux } i \text{ sort du} \\ \text{noeud } j \\ 0 \\ 1 \text{ le flux } i \text{ rentre} \\ \text{dans le noeud } j \end{array} \right\}$
$\widehat{R}_i$	valeur mesurée du débit du flux i	
$R_i$	valeur estimée du débit du flux i	
$\widehat{X}_{ik}$	teneur mesurée du constituant k dans le flux i	
$X_{ik}$	teneur estimée du constituant k dans le flux i	
$W_i$	coefficient de pondération associé à la mesure du débit du flux i (égal à l'inverse de la variance)	
$\Psi_{ik}$	coefficient de pondération associé à la mesure de la teneur du constituant k dans le flux i	
$\Phi_{ik}$	coefficient de pondération associé au produit $\widehat{R}_i \widehat{X}_{ik}$	

Soit la fonction pénalité :

$$\mathcal{X} = \sum_{i=1}^m W_i (\widehat{R}_i - R_i)^2 + \sum_{k=1}^{nc} \sum_{i=1}^m \phi_{ik} (\widehat{R}_i \widehat{X}_{ik} - R_i X_{ik})^2 + \sum_{k=1}^{nc} \sum_{i=1}^m \Psi_{ik} (\widehat{X}_{ik} - X_{ik})^2$$

$$\text{Les contraintes sont : } \sum_{i=1}^m m_{ij} R_i = 0 \quad j \in [1, n] \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m m_{ij} R_i X_{ik} = 0 \quad \forall k \in [1, nc], \forall j \in [1, n] \quad (2)$$

Etablir un bilan cohérent équivaut à minimiser  $\mathcal{X}$  sous contraintes (1) et (2).

On introduit la fonctionnelle de Lagrange :

$$\mathcal{L} = \mathcal{X} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \left( \sum_{i=1}^m m_{ij} R_i \right) + \sum_{k=1}^{nc} \sum_{j=1}^n \lambda_{kj} \left( \sum_{i=1}^m m_{ij} R_i X_{ik} \right)$$

L'extremum de  $\mathcal{L}$  coïncide avec la nullité des dérivées partielles de  $\mathcal{L}$  par rapport à  $R_i$ ,  $X_{ik}$  et  $\lambda_j$ .

Le système d'équations obtenu est résolu en deux étapes :

- . linéarisation des équations par découplage des variables qui permet une première estimation des variables et des multiplicateurs de Lagrange ;
- . résolution par un algorithme du type Newton Raphson à partir de l'estimation précédente.

#### Modélisation des opérations unitaires.

Disposant d'une image de la marche de l'usine pour un flowsheet, un minéral et un débit particuliers, il faut construire un modèle de simulation rendant compte de cette marche, et susceptible a priori de s'appliquer également dans des conditions différentes de flowsheet, minéral et débit.

Pour chaque type d'opération unitaire, plusieurs types de modèles ont été testés, en utilisant des logiciels de régression pour déterminer "au

mieux" les paramètres permettant au modèle de reproduire les performances du bilan cohérent.

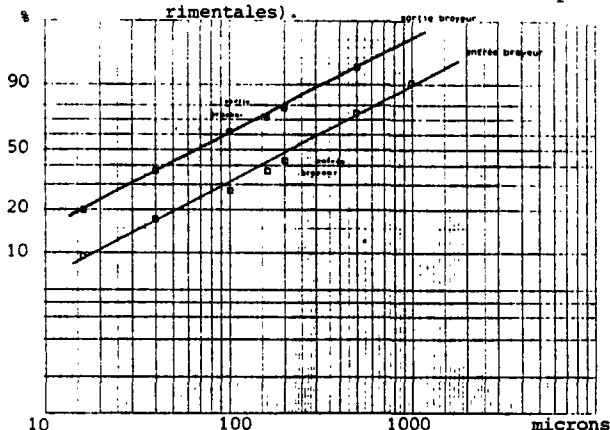
#### Modèle du broyeur à boulets.

En présence d'un seul jeu de données expérimentales la calibration d'un modèle reposant sur les concepts de matrice de broyage et de matrice de sélection nécessite des hypothèses importantes sur la forme de ces matrices. Aussi, ce type de modèle n'a-t-il finalement pas été retenu, et un modèle inspiré de la méthode de dimensionnement des broyeurs issue des travaux de Bond et publiée (Réf. 9) a été développé :

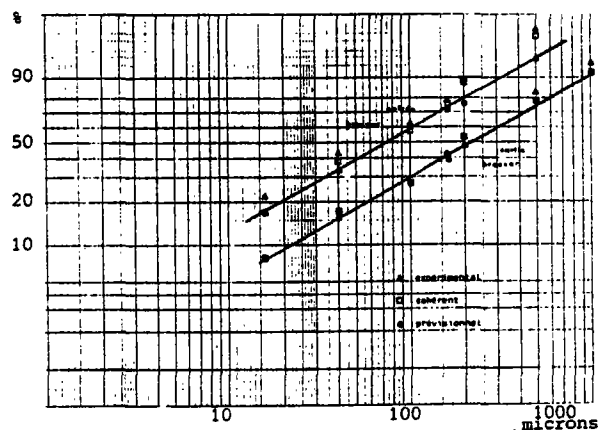
- . Le "d<sub>80</sub>" à la sortie du broyeur est calculé en fonction du "D<sub>80</sub>" à l'entrée.
- . Le module fait une régression sur la distribution granulométrique à l'entrée du broyeur de façon à déterminer la "pente" m de la distribution cumulée de Rosin-Rammler la plus proche :  $W = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{X_0}\right)^m\right)$
- . La distribution granulométrique calculée à la sortie du broyeur est une distribution de Rosin-Rammler, de même "pente" m et dont le d<sub>80</sub> est égal à la valeur déterminée.
- . Pour un broyeur et un minerai donnés :  $d_{80} = \left(\frac{E}{T} + \frac{1}{\sqrt{D_{80}}}\right)^{-2}$  ; E est déterminé par régression et incorpore le "Work Index" Wi ; T est le débit entrée broyeur. Pour rendre compte de la sélectivité du broyage, chaque constituant chimique est supposé se comporter comme un minerai indépendant caractérisé par une valeur E.

La figure 3 représente en coordonnées Rosin-Rammler les distributions granulométriques expérimentales à l'entrée et à la sortie du broyeur : l'hypothèse d'égalité des pentes de ces distributions est bien vérifiée.

**FIGURE 3 - ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE L'ENTREE ET DE LA SORTIE DU BROYEUR (données expérimentales).**



**FIGURE 4 - DISTRIBUTION BaSO<sub>4</sub> A L'ENTREE ET A LA SORTIE DU BROYEUR.**



### Modèle de l'hydrocyclone.

De nombreux auteurs ont publié des formules pour prédire les performances des hydrocyclones en fonction de leur géométrie et des conditions de leur alimentation. La plupart de ces formules ont été obtenues par régression à partir d'un certain nombre de points de fonctionnement (Réf. 2, 3, 8).

Plusieurs de ces formules ont été testées au B.R.G.M. sur des dizaines de cas de cyclone de diamètres variés, opérant en milieu industriel.

Aucune formule ne permet une prévision convenable des performances effectives d'un cyclone dans le cas où aucune donnée expérimentale relative à ce cyclone n'est disponible. Lorsque des points de fonctionnement réels sont connus, la méthode retenue consiste à utiliser la formulation du modèle de Plitt (Réf. 8) mais en ajustant des constantes numériques.

Le modèle de Plitt (Réf.8) fait une hypothèse sur l'expression analytique de la courbe de partage (probabilité pour une particule d'aller à la sousverse de l'hydrocyclone en fonction du diamètre de la particule) et permet pour chaque minéral le calcul du  $D_{50}$ , du soutirage  $S$  et d'un paramètre caractérisant la précision de la coupure.

Le  $D_{50}$  (Réf. 8) est calculé selon :

$$D_{50} = \frac{\alpha_1 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} \exp(0.063\phi)}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho)^{0.5}}$$

$D_c$  : diamètre du cyclone (cm)

$D_i$  : diamètre de l'alimentation (cm)

$D_o$  : diamètre de la surverse (cm)

$D_u$  : diamètre de la sousverse (cm)

$h$  : hauteur du cyclone (cm)

$Q$  : débit volumique (l/mn)

$\rho_s$  : masse volumique du solide ( $g/cm^3$ ) une valeur pour chaque minéral

$\rho$  : masse volumique du liquide ( $g/cm^3$ )

$\phi$  : pourcentage volumique de solide dans l'alimentation

La courbe de partage a pour expression :

$$Y' = 1 - \exp\left(-0.0693 \left(\frac{d}{D_{50}(c)}\right)^m\right) \text{ où } m = \alpha_2 \exp\left(-1.58 R_V\right) \left(\frac{D_c^2 h}{Q}\right)^{0.15}$$

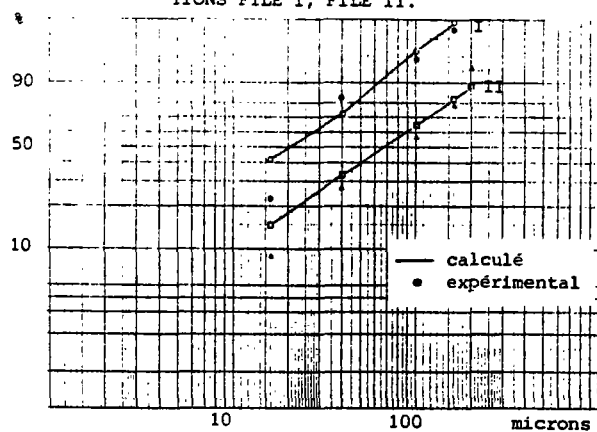
Le soutirage  $S$  est calculé par la formule :

$$S = \frac{\alpha_3 (D_u/D_o)^{3.31} h^{0.54} (D_u^2 + D_o^2)^{0.36} \exp(0.0054 \phi)}{H^{0.24} D_c^{1.11}}$$

Les paramètres  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  sont calculés automatiquement pour s'accorder aux résultats du bilan cohérent. Le programme peut alors calculer pour chaque tranche granulométrique une loi de répartition entre surverse et sousverse.

La figure 5 permet d'évaluer la validité du modèle ; elle fait apparaître les écarts des distributions granulométriques des deux alimentations du circuit de flottation pour le modèle et les valeurs expérimentales. L'écart

FIGURE 5 - ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES ALIMENTATIONS FILE I, FILE II.



plus important pour les fines particules provient d'une estimation médiocre du soutirage par le modèle.

#### Modèle de la cellule de flottation.

Il existe de nombreux modèles semi-empiriques relativement simples de la cellule de flottation. Cependant, aucun modèle opérationnel ne prend en compte sérieusement tous les paramètres qui interviennent en réalité

comme dosage des moussants et collecteurs, diamètre et nombre de bulles d'air, géométrie de la cuve et du mobile d'agitation-dispersion.

Dans ces conditions, les modèles faisant intervenir de multiples paramètres paraissent artificiellement sophistiqués et il a été décidé de rechercher pour la simulation un modèle simple faisant intervenir le plus petit nombre possible de paramètres.

Seuls ont été considérés des modèles monophasiques qui assimilent la cellule à un milieu parfaitement agité, et la flottation à un phénomène de cinétique d'ordre n.

$$\left( \begin{array}{l} \text{masse de constituant } i \text{ évacuée} \\ \text{par la mousse entre } t \text{ et } t + dt \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{masse de constituant } i \text{ dans} \\ \text{la cellule à l'instant } t \end{array} \right)^n k_i dt$$
 $k_i$  est la constante cinétique relative au constituant  $i$ .

Il semble bien qu'à Chaillac, un ordre 1,2 aurait bien rendu compte des observations. Cependant, vu le caractère "régressé" de cette valeur, il a été décidé, toujours dans un souci de simplicité de supposer un ordre 1 dont la signification physique semble plus claire.

Pour une cellule en régime permanent on montre que la loi cinétique d'ordre un implique :

$$\left( \begin{array}{l} \text{débit constituant } i \text{ dans} \\ \text{les mousses} \end{array} \right) = \left( \frac{\text{débit constituant } i \text{ à l'entrée de la cellule}}{1 + k_i t_s} \right)$$

$k_i$  : constante cinétique constituant  $i$

$t_s$  :  $\frac{\text{volume de la cellule}}{\text{débit volumique}} = \text{temps de séjour moyen}$

Finalement le modèle retenu se résume à :

. Pour la barytine  $BaSO_4$  :

- une cinétique de flottation d'ordre un,
- une constante cinétique par tranche granulométrique, identique pour toutes les cellules de l'usine.

. Pour les autres constituants solides :

- une cinétique de flottation d'ordre un,

- une constante cinétique par tranche granulométrique et par constituant, identique pour toutes les cellules de l'usine. Cependant ces constantes sont beaucoup plus faibles que pour la barytine,
- un entraînement, proportionnel à la masse de solide flottée, avec un taux d'entraînement par tranche granulométrique et par constituant identique pour toutes les cellules de l'usine.

. Pour l'eau :

- concentration en solide des mousses : 50 %,
- pour les cellules produisant peu de solide dans les mousses, le débit minimum d'eau accompagnant ces solides est de 2 m<sup>3</sup>/h.

CONSTANTE CINÉTIQUE K EN h<sup>-1</sup>

	BaSO <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"gangue"
160-200	6,3	0,88	1,056	0,66	0,732
100-160	8,4	1,056	1,056	0,66	2,44
40-100	10,5	1,232	1,056	0,726	2,074
16- 40	12,6	0,616	1,056	0,66	2,074
<16	7,14	0,616	1,056	0,528	1,464

TAUX D'ENTRAÎNEMENT PAR LES SOLIDES "FLOTTES" (sans unité, multipliés par 10 000)

	BaSO <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"gangue"
160-200	0	0,7	0,2	0,04	0,35
100-160	0	15	1,2	0,8	7,5
40-100	0	45	5,0	7,0	22,5
16- 40	0	45	12	7,0	22,5
<16	0	45	15	5,2	22,5

TABLEAU 1

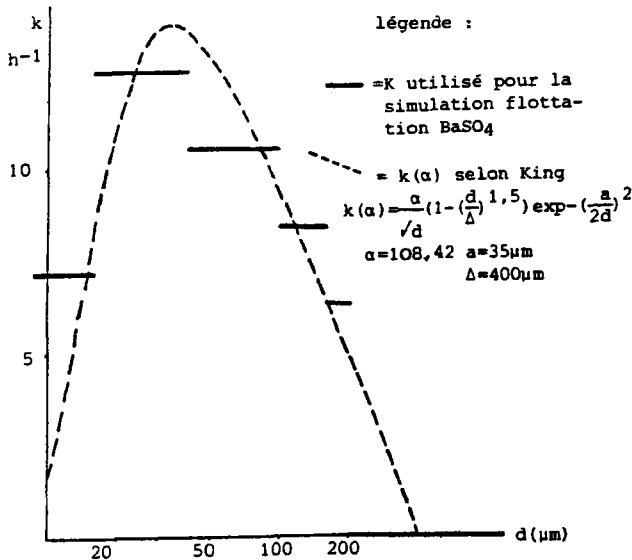


FIGURE 6

#### UTILISATION DU MODELE DE SIMULATION.

Les modèles d'opérations unitaires retenus ont été traduits en termes de programmes d'ordinateur et incorporés dans le logiciel de simulation d'usine en régime permanent stable (Réf. 4).

Pour faire fonctionner le logiciel de simulation il est nécessaire de fixer :

C'est donc un modèle extrêmement simple, en particulier parce qu'il s'applique sans aucune adaptation à toutes les cellules de l'usine quelles que soient leurs fonctions.

Le tableau 1 indique les valeurs numériques des constantes cinétiques employées, et des taux d'entraînement.

La figure 6 montre que la constante cinétique de la barytine varie en fonction du diamètre des

particules selon une loi très proche de celle proposée par King (Réf. 7) ou Colborn, Woodburn, King (Réf. 6) pour le phosphate.

$$k(d) = \frac{\alpha}{\sqrt{d}} \left(1 - \left(\frac{d}{\Delta}\right)^{1,5}\right) \exp - \left(\frac{a}{2d}\right)^2$$

Δ : diamètre de la plus grosse particule flottable.

a : diamètre des particules flottant le plus facilement

α : constante à regresser.

Les valeurs de α, Δ et a qui permettent le meilleur ajustement de la formule aux conditions de la flottation à Chaillac sont respectivement 108, 400 µm et 35 µm.

- . l'alimentation de l'usine : débit horaire solide, distribution granulométrique (8 tranches), teneurs  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de chaque tranche granulométrique,
- . le flowsheet détaillé : par exemple le flowsheet de base de l'usine est représenté par 165 flux de matière - les dimensions des appareils doivent être indiquées (broyeurs, cyclones, volumes des cellules)

A partir de ces seules variables, le modèle calcule des flux prévisionnels de matière en tous points de l'usine : débits horaires d'eau et de solide, distributions granulométriques (8 tranches), teneurs  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de chaque tranche granulométrique et de l'ensemble des solides.

L'information produite dépasse donc largement un simple bilan de l'usine (qualité de concentré - rendement). Le modèle est un outil puissant susceptible en particulier de prévoir dans le détail les conséquences d'une modification de flowsheet, ou de volume de certaines cellules, ou de la qualité de l'alimentation de l'usine. Mais ces prédictions ne sont utiles que s'il est légitime de leur accorder une confiance suffisante.

#### Validation du modèle.

Lors de l'examen par les dirigeants de l'usine de Chaillac des premiers résultats de la simulation, il est apparu très difficile de les évaluer faute d'une connaissance de l'influence réelle sur les performances de l'usine de paramètres tels que débit horaire, teneurs  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de l'alimentation.

Comme dans la plupart des exploitations, existent à Chaillac des relevés quotidiens des conditions de marche, qui font apparaître de très nombreux paramètres, dont des débits, des teneurs, des rendements, mais aussi des indications sur les faciès de minerai extraits de la mine et traités par l'usine avec parfois un décalage de temps.

L'examen sans outil statistique de ces chiffres ne révèle malheureusement qu'une grande dispersion et aucune tendance nette n'apparaît. Devant la difficulté d'évaluer les résultats de la simulation, "Barytine de Chaillac" a confié au BRGM l'étude statistique de ses relevés de production 1983, pour rechercher une connaissance des réactions de l'usine aux variations des paramètres d'alimentation.

A travers la grande dispersion des chiffres, l'étude statistique avec des moyens informatiques solides fait apparaître des tendances certaines (Réf.5). La réalité de ces tendances est affirmée car elles se retrouvent quasi-identiques pour tous les faciès de minerai soumis individuellement à l'analyse statistique :

- la teneur  $\text{BaSO}_4$  du concentré est surtout sensible à la teneur  $\text{SiO}_2$  de l'alimentation (influence positive), à la teneur  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de l'alimentation (influence négative) et au débit horaire (influence négative),
- le rendement  $\text{BaSO}_4$  est influencé par la teneur  $\text{BaSO}_4$  de l'alimentation (influence positive) et le débit horaire (influence négative).

Ces tendances sont quantifiées par regression multivariable.

Il devient ainsi possible de confronter les prédictions du modèle de simulation aux tendances statistiques en simulant successivement des variations de teneurs de l'alimentation (plus ou moins riche en  $\text{BaSO}_4$ , plus ou moins siliceuse) et une augmentation de débit.

Les tableaux 2 et 3 illustrent cette confrontation : la simulation rend compte qualitativement de toutes les tendances découvertes par l'analyse statistique. Quantitativement les teneurs et rendements prévus par simulation sont remarquablement proches de ceux obtenus par regression statistique. Un seul écart est notable : le rendement  $\text{BaSO}_4$  paraît plus sensible à une augmentation importante de débit dans le modèle que dans l'usine réelle.

marche du 12.04.83  
utilisée pour la  
calibration du modèle

Débit solide entrée t/h	teneur $\text{BaSO}_4$ alim.	teneur $\text{SiO}_2$ alim.	teneur $\text{Fe}_2\text{O}_3$ alim.	Analyse statistique		Simulation	
				teneur $\text{BaSO}_4$ conc.	rend. $\text{BaSO}_4$	teneur $\text{BaSO}_4$ conc.	rend. $\text{BaSO}_4$
54,10	45,77	20,47	22,71	96,25	78,85	96,70	78,10
63,27	45,77	20,47	22,71	96,14	78,06	96,63	69,73

TABLEAU 2 - INFLUENCE DU DEBIT D'ALIMENTATION, A QUALITE DE MINERAL ET FLOWSHEET CONSTANTS.

marche du 12.04.83  
utilisée pour la  
calibration du modèle

teneur $\text{BaSO}_4$ alim.	teneur $\text{SiO}_2$ alim.	teneur $\text{Fe}_2\text{O}_3$ alim.	Analyse statistique		simulation	
			teneur $\text{BaSO}_4$ conc.	rend. $\text{BaSO}_4$	teneur $\text{BaSO}_4$ conc.	rend. $\text{BaSO}_4$
45,77	20,47	22,71	96,25	78,85	96,70	78,10
36,61	22,76	25,00	96,31	77,42	96,56	77,81
45,77	30,70	14,52	96,54	78,79	96,78	78,01
45,77	40,94	6,33	96,83	78,73	96,92	77,97

TABLEAU 3 - INFLUENCE DE LA TENEUR EN  $\text{BaSO}_4$  ET DE LA TENEUR EN  $\text{SiO}_2$ , A DEBIT D'ALIMENTATION (54, 10 t/h) ET FLOWSHEET CONSTANTS.

A l'issue de cette confrontation il paraît légitime de valider le modèle. Celui-ci est évidemment imparfait, ne serait-ce que par le nombre de paramètres dont il ne tient aucun compte (physicochimie, aération des cellules...). Mais il est possible de considérer que pour des conditions assez proches de celles dans lesquelles le modèle a été calibré, il rend bien compte qualitativement et au moins semi-quantitativement des conséquences de modifications de l'usine ou de son alimentation.

#### Enseignements concrets pour l'exploitant.

Tous les exploitants savent qu'il est difficile de réaliser des expériences industrielles (tests de modifications de flowsheet par exemple) et surtout d'en interpréter les résultats souvent peu spectaculaires. En effet, aux modifications testées se superposent toujours des variations incontrôlables de teneur d'alimentation, des incidents de marche...etc. De plus, les mesures des performances de l'usine, en particulier du rendement, sont souvent imprécises et les conséquences de modifications mineures entrent souvent justement dans la zone d'imprécision.

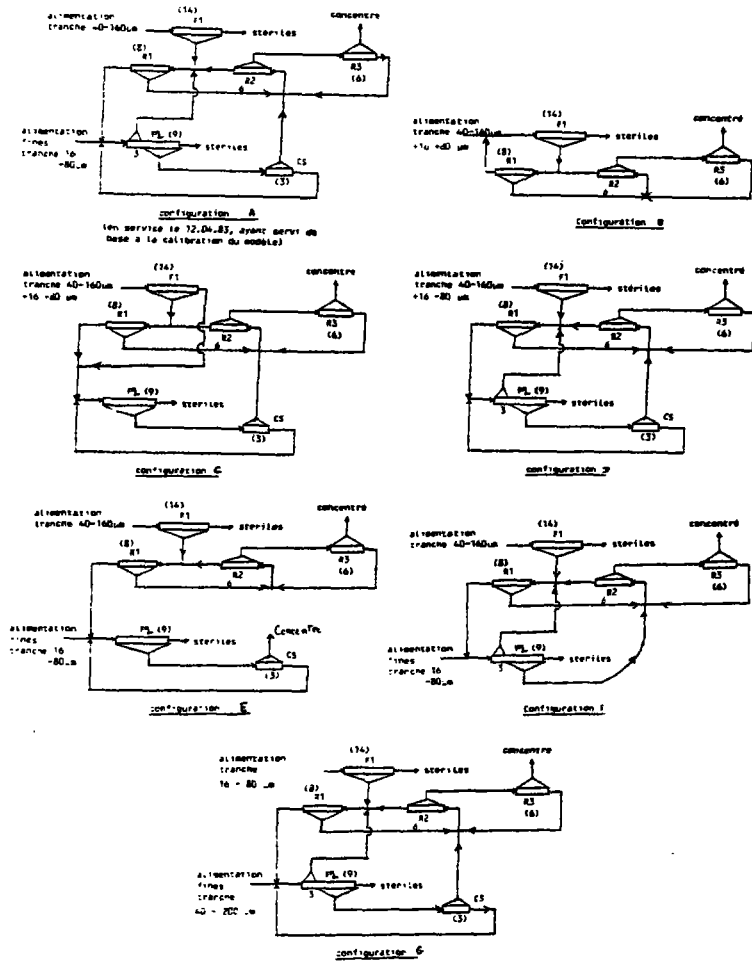


FIGURE 7 - FLOWSHEETS SIMULES.

Configuration (voir flowsheets simplifiés figure 7)	Teneur BaSO <sub>4</sub> concentré X	Rendement BaSO <sub>4</sub> Z
A Alimentation de la file 1 par les grossiers Alimentation de la file 2 par Les fins	96,70	78,10
B Alimentation de la file 1 par grossiers et fins Suppression de la file 2	96,71	74,63
C Alimentation de la file 1 par grossiers et fins Recyclage des non-flottants de la file 1 vers La file 2	96,59	81,37
D Alimentation de la file 1 par grossiers et fins Même configuration que A	96,67	81,63
E Alimentation de la file 1 par les grossiers Alimentation de la file 2 par Les fins 2 concentrés : relavage file 2 et relavage 3 file 1	93,43 96,47	24,34 57,47, 81,81
F Alimentation de la file 1 par les grossiers Alimentation de la file 2 par Les fins Suppression des 3 cellules de relavage de la file 2	96,51	81,07
G Alimentation de la file 1 par les fins Alimentation de la file 2 par Les grossiers Même configuration que A	96,81	67,44

TABLEAU 4 - INFLUENCE DU FLOWSHEET A ALIMENTATION CONSTANTE.

C'est pourquoi une simulation convenablement conduite peut remplacer avantageusement des essais industriels de modification de flowsheet, beaucoup plus dangereux, plus coûteux et parfois impossibles à réaliser.

Tout accroissement du rendement BaSO<sub>4</sub>, à matériel constant se traduit par un gain financier immédiat. C'est pourquoi le modèle validé a été utilisé pour simuler plusieurs agencements des bancs de cellules de flottation (voir fig. 7), alimentés avec mêmes débits, granulométries et teneurs. Le tableau 4 montre sous la forme la plus condensée les

résultats de ces simulations :

- elles confirment la validité du modèle : la configuration E reproduit l'ancien flowsheet de Chaillac qui permettait de produire deux concentrés titrant environ 94 % et 97 % BaSO<sub>4</sub>. La simulation retrouve ces teneurs et montre que la récupération était probablement meilleure à cette époque,
- surtout, les simulations de flowsheet ont abouti à proposer deux flowsheets C et D qui devraient mieux utiliser les cellules actuelles de l'usine et assurer une augmentation

du rendement (de l'ordre de 3 % ?) sans détérioration de la qualité du concentré. C'est le résultat essentiel de l'étude. Ces deux flowsheets prévoient le mélange des tranches granulométriques et leur dégrossissage

commun dans la file I, la file II étant utilisée pour le recyclage de mixtes de relavage. Dans la configuration C, la file II joue aussi le rôle d'épuisage de la file I. Un examen plus détaillé des flux prévisionnels indique cependant que pour la configuration C les flux mélangés en tête de la file II ont des teneurs en  $\text{BaSO}_4$  très différentes et que l'épuisage du rejet file I ne se justifie guère. C'est donc le flowsheet D qui paraît le plus recommandable.

Le modèle pourrait aussi bien sûr être utilisé pour simuler l'implantation de nouveaux appareils et les possibilités de simulation seraient alors illimitées. Cependant, en l'absence de projets d'extension ou de reconversion de l'usine, ces orientations qui supposent des investissements, n'ont pas été envisagées jusqu'à présent.

La méthodologie mise en oeuvre dans cette étude est applicable aux problèmes d'optimisation de flowsheet d'autres usines. Mais elle ouvre aussi la voie à une approche plus efficace, plus sûre et moins coûteuse pour réaliser des projets d'extension d'usines, ou des projets d'usines nouvelles exploitant les résultats de pilotages.

#### REFERENCES

- [1] R. BLOISE, C. REINHART, A. MABILLE, *Simulation d'unités complexes. Revue de l'Industrie Minérale - Janvier 1983.*
- [2] D. BRADLEY, *The hydrocyclone. Pergamon Press - 1965.*
- [3] A.C. APLING, D. MONTALDO, P.A. YOUNG, *Hydrocyclone models in an ore grinding circuit. International Conference on Hydrocyclone. Oct. 80.*
- [4] A. BROUSSAUD, R. BLOISE, C. BRACHET, *Contribution de l'outil informatique à l'amélioration et à la conception d'installations de traitement. Revue de l'Industrie Minérale - à paraître.*
- [5] A. BROUSSAUD, G. FOURNIGUET, *Analyse statistique des résultats techniques de production de l'usine de barytine de Chaillac. Rapport BRGM Confidentiel - septembre 1984.*
- [6] R.P. COLBORN, E.T. WOODBURN, R.P. KING, *The effect of particle size distribution on the performance of phosphate flotation. Metall. Trans. 2, p. 3163, 1971.*
- [7] R.P. KING, *A pilot plant investigation of a kinetic model for flotation. National Institute for Metallurgy, Johannesburg South Africa Report n° 1847, 1976.*
- [8] L.R. PLITT, *A mathematical model of the hydrocyclone classifier. C.I.M. Bulletin n° 69, décembre 1976.*
- [9] C.A. ROWLAND, D.M. KJOS, *Rod and ball mills. Chapter 12, Mineral Processing Plant Design. Society of Mining Engineers AIME - New York 1980.*
- [10] A. ZISERMAN, *Les gisements de Chaillac (Indre). 26ème congrès Géologique International, Paris 7-17 juillet 1980.*

ANNEXE 2

NEW APPROACHES TO THE INTERPRETATION OF ONE DIMENSIONAL AND  
TWO DIMENSIONAL MEASUREMENTS OF MINERAL LIBERATION

—  
GATEAU C., BROUSSAUD A.

—  
4<sup>th</sup> European Symposium for Stereology, Goteborg, Suède,  
26-30 août 1985, 6 pages.

**NEW APPROACHES TO THE INTERPRETATION OF ONE DIMENSIONAL AND  
TWO DIMENSIONAL MEASUREMENTS OF MINERAL LIBERATION**

C. GATEAU - A. BROUSSAUD

Bureau de Recherches Géologiques et Minières  
B.P. 6009 - 45060 ORLEANS cedex (France)

**ABSTRACT**

Image analysis of polished sections gives biased information about the mixity of ore particles. No general solution has as yet been derived to calculate the true liberation.

Two new methods are proposed for the interpretation of raw data. Both are based on results provided by a large number of simulations of the observations of thousands of particles of varied textures, and on more than ten years experience in routine controls of mineral particle liberation.

**Keywords** : Liberation, mixity, ore dressing, simulation, image analysis.

**INTRODUCTION**

Evaluation of the mixity of solid particles at various points is important for optimizing a mineral beneficiation process. This kind of information can be obtained by image analysis. A polished section of solid particles mounted in a resin matrix is observed giving one-dimensional and twodimensional results which must be converted into three-dimensional information. Many papers have been published on this difficult subject, but no general solution is available as yet.

As a contribution to the solution of this critical problem, two new approaches to the interpretation of measurements are proposed.

**I. A NEW THEORY BASED ON ONE-D AND TWO-D MEASUREMENTS**

The first method has been developed in our mineral processing department and can be applied if one-dimensional and two-dimensional measurements are available simultaneously. Let us call PB the true proportion of liberated particles for a mineral B. In practical cases, PB is unknown and image analysis is one way of attempting to evaluate it.

Let us call PBS the measured proportion of particles which appear like free mineral B on a polished section and PBL the measured proportion of apparently liberated chords for this mineral.

If no method of reconstruction is used, 1-D and 2-D analysis give biased estimates of PB.

In practise :  $PBL > PBS > PB$

A major difficulty exists in the evaluation of the bias, since there is no standard material that can easily be characterized by independent means.

Therefore, a large number of simulations of 1-D and 2-D observations have been made by Monte Carlo methods to assess the magnitude of the necessary corrections to PBS and PBL. In these simulations the texture of spherical particles was defined by simple geometrical rules : ball in a ball, ball cut by a plane, ball cut by a spherical surface.

Six types of particle were used and are shown in figure 1.

The populations generated consisted of monodispersed particles either with identical characteristics or corresponding to given distributions of texture and mixity.

Eight distributions of mixity were simulated and are shown in figure 2. Distributions of particle texture were functions of the mixity index.

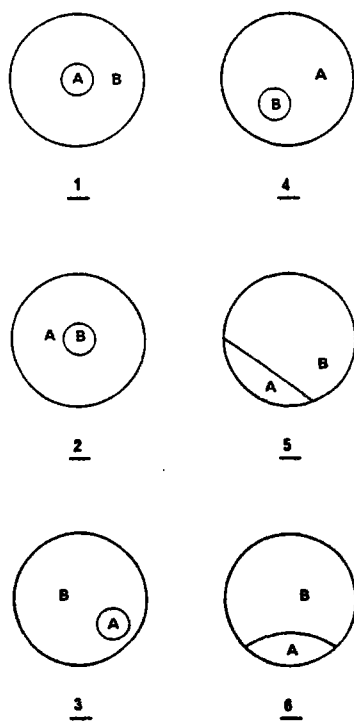


figure 1: six types of particle

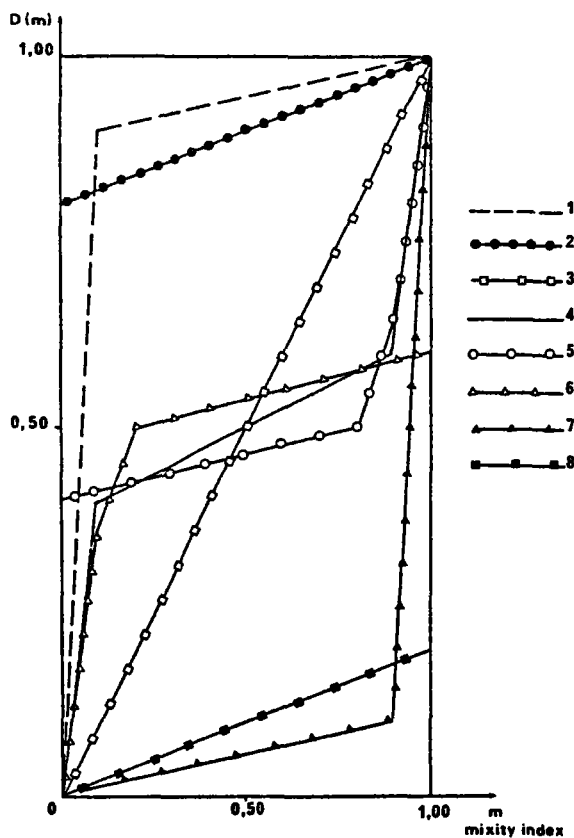


figure 2: Eight cumulated distributions of mixity

Let us consider a population of particles that can be classified according to both particle size ( $x$ ) and mixity ( $m$ ) and for which a distribution probability  $F(x, m)$  can be defined.

The probability that a particle will be observed as liberated is

PBL ( $x, m$ ) in 1-D space

PBS ( $x, m$ ) in 2-D space

For the whole population, the overall apparent 1-D and 2-D liberations are respectively :

$$1\text{-D} : \text{PBL} = \int_x \int_m F(x, m) \text{PBL}(x, m) dx dm$$

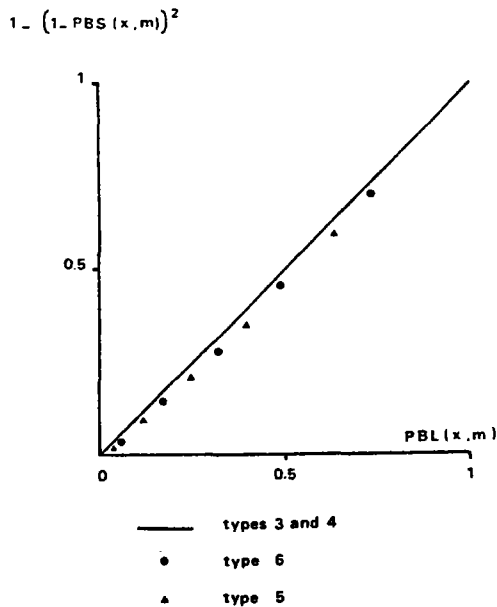
$$2\text{-D} : \text{PBS} = \int_x \int_m F(x, m) \text{PBS}(x, m) dx dm.$$

It can be shown that for all simulated particles :

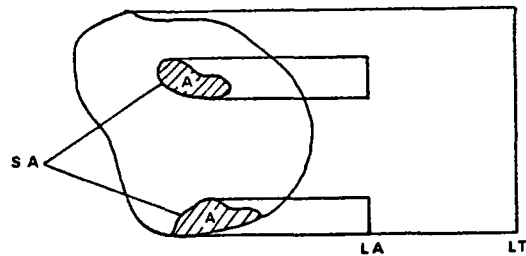
$$\forall (x, m) \quad \text{PBL}(x, m) \text{ is very close to } 1 - [1 - \text{PBS}(x, m)]^2$$

The equality is perfectly satisfied for particles of types 1 to 4. It is shown in figure 3 that it is almost satisfied for types 5 and 6.

More generally it is believed that the equality is almost satisfied for many real particles.



**FIGURE 3 :** VALIDITY OF THE APPROXIMATION  
 $\text{PBL} \approx 1 - (1 - \text{PBS})^2$



**FIGURE 4 :** projections of a particle on a plan,  
and projection of the plan on a straight line.

Let us consider a particle of random complicated texture. If the particle is projected on a random plane, we can define surface areas SA and ST (see figure 4). If this projection is, in its turn, projected on a random straight line of the plane one can define LA and LT.

If the particle is observed in a plane perpendicular to the straight line on which the particle was projected, then :

$$\text{PBS} = \left( \frac{\text{LT} - \text{LA}}{\text{LT}} \right)$$

If the particle is observed in a straight line perpendicular to the plane on to which the particle was projected, then :

$$PBL = \frac{ST - SA}{ST}$$

The assumption  $PBL(x, m) = 1 - [1 - PBS(x, m)]^2$  is equivalent, on the average, to  $\left(\frac{LA}{LT}\right)^2 = \frac{SA}{ST}$

which is believed to be often true.

The assumption of complete equality :

$$PBL(x, m) = 1 - [1 - PBS(x, m)]^2$$

leads to :

$$PBL = \int_x \int_m F(x, m) (1 - [1 - PBS(x, m)]^2) dx dm$$

$$PBL = - \int_x \int_m F(x, m) [PBS(x, m)]^2 dx dm$$

$$+ 2 \int_x \int_m F(x, m) [PBS(x, m)] dx dm$$

$$2 PBS - PBL = \int_x \int_m F(x, m) [PBS(x, m)]^2 dx dm$$

If  $m = 0$  (really free particles), it is obvious that  $PBS(x, 0) = 1$ , and :

$$2 PBS - PBL = PB + \int_x \int_{m \neq 0} F(x, m) [PBS(x, m)]^2 dx dm$$

$$2 PBS - PBL \geq PB$$

The quantity  $(2 PBS - PBL)$  may be considered as a new estimator of PB. It is still an overestimate, but it is better than previously known estimators :

$$PBL > PBS > (2 PBS - PBL) > PB$$

Simulations have shown that  $(2 PBS - PBL)$  is very close to the real liberation PB for the eight simulated distributions of mixity and texture (see table 1).

The results of application to real particles is given in § 3.

## II. PRACTICAL INTERPRETATION OF 2-D MEASUREMENTS

Alongside theoretical studies, our image analysis laboratory has for 10 years been obtaining practical results for immediate ore dressing applications, as a result of which the best conditions have been found to be the following :

- Narrow particle size range.
- 2-D analysis.
- Mixity distribution giving the areal proportion of the valuable mineral in each class.

Under these conditions, and for a given ore, experience shows that raw data are generally good enough to classify several samples by their mixity index. However it is always important to evaluate the magnitude of the overestimation of the liberated fraction. We have tried to obtain this information from numerical simulations performed according to experimental image-analysis procedure. This time, in addition to spherical particle populations, our investigations included cubic grains with random texture.

The main result is that if we assume a uniform distribution of mixity without free particles, whatever the texture distribution, provided it is not unlikely, about 25% of the area of the mineral is observed to be free. Consequently, if we measure a proportion  $L_2$  of apparently free mineral (% area) by 2-D analysis, an approximation of the true liberated fraction  $L_3$  (% volume) is given by the empirical law :

$$L_3 = \frac{4}{3} L_2 - 33 \quad (L_2 \geq 25 \%)$$

$$L_3 = 0 \quad (L_2 \leq 25 \%)$$

It is known that in experimental work the 1-D or 2-D liberated fractions may be considered as asymptotic values which are more or less approached according to the resolution of the imaging system and the scale of investigation. In practical studies, this is a very sensitive problem which can be avoided if we consider every particle with a grade higher than 95% as liberated. The empirical relation given above is derived according to this hypothesis, and can be used when the valuable mineral does not appear as small inclusions disseminated in grains. This means that overestimation of the liberated fraction by 2-D analysis is generally less than one third of the locked fraction.

For ore dressing applications, accurate measurements of a liberation index are only useful when this liberation is not too far from a practical optimum. In this case, it can be verified that raw data are close to the exact value. For example, for a true liberation (volume) of 75%, the overestimation induced by 2-D measurements is no more than 6%.

### III. VERIFICATION WITH REAL PARTICLES

Verification of the validity of the two approaches proposed here is difficult because of the lack of reference material. Therefore, we decided to compare the results given by the two methods in a real case of beneficiation of a sulfide ore.

The samples come from concentrates and tailings collected on a pilot plant, all of which have a narrow size distribution : 10-20  $\mu\text{m}$  or 20-40  $\mu\text{m}$ . On this kind of product, the liberation index is derived for one mineral at a time, all the other minerals being gathered in a unique complementary phase.

Measurements were performed on pyrite, chalcopyrite and sphalerite. For this test, we have written a special routine on a QTM 900 System which allows acquisition of 1-D and 2-D data on the same pictures. Figure 5 compares 3-D liberation values estimated by each method. A very good agreement can be observed, even for low grade samples.

Population	PB real	PBS	PBL	2PBS_PBL
1	0	.55	.78	.32
2	0.8	.85	.88	.82
3	0	.17	.31	.03
4	0	.24	.36	.12
5	0.4	.422	.45	.394
6	0	.24	.36	.12
7	0	.014	.34	0
8	0	.019	.37	0

TABLE 1

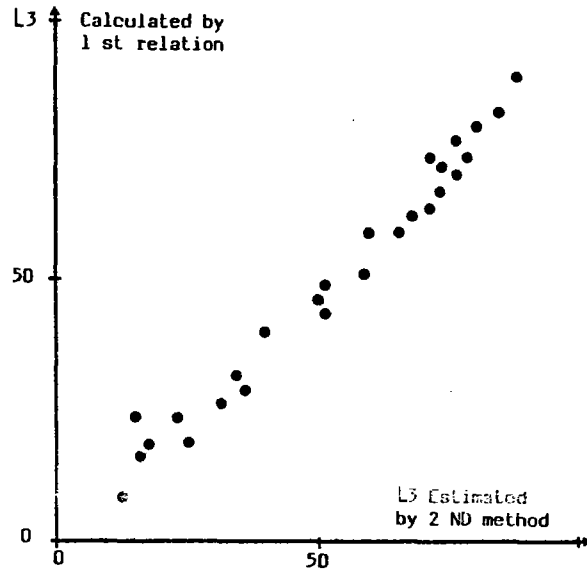


Figure 5 - Calculated liberation :  $L_3$  (% volume).  
Comparison between the 2 methods proposed in the present paper.

## CONCLUSION

As the two methods of investigation are completely independent, the convergence of their results may indicate that they give efficient estimators of 3-D liberation, a value which will, for a long time, remain unavailable except in very special cases.

## REFERENCE

Broussaud A, Barbery G. "Mineral liberation analysis : simulation and assessment of reconstruction methods for 1-D and 2-D image analysis". 16th annual meeting of the fine particle society Miami, USA, 1985 : 22-26.