

LA COLONNE DE FLOTTATION DU SERVICE D'EXPLOITATION DES MINES DE L'U.L.B.

Anne Wies (*)

Résumé

Les colonnes de flottation peuvent avantageusement remplacer les cellules conventionnelles, particulièrement dans les circuits comprenant de nombreux étages de relavage. De cette évolution technologique découle naturellement l'idée de l'installation d'une colonne de flottation au laboratoire de Préparation des Minerais et Charbons de l'Université Libre de Bruxelles.

Après l'installation de la colonne et le réglage des différents débits qui l'alimentent, vint l'étude de l'influence de certains paramètres sur l'efficacité de l'appareil: taille des bulles, débit d'air injecté dans la colonne, densité de la pulpe, granulométrie des solides à traiter. Les minéraux et réactifs employés sont des systèmes bien connus; il est donc possible de comparer valablement les résultats avec ceux obtenus par flottation conventionnelle. Cette étude a permis de délimiter des zones d'efficacité et de fonctionnement optimum, et de démontrer l'efficacité des colonnes pour la flottation des grains fins.

Trois cas simples d'enrichissement ont ensuite été envisagés afin d'estimer l'efficacité de la colonne. Il semble que, pour certaines applications, ses performances soient meilleures sous plusieurs points de vue que celles des cellules conventionnelles du même laboratoire.

1. Flottation en colonne

La colonne de flottation a été inventée au début des années soixante [2]. Bien qu'elle soit probablement l'invention la plus intéressante en préparation des minerais et charbons depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, son introduction dans l'industrie minière a été assez lente; ce n'est qu'à partir de 1981 que les laveries à colonnes se sont multipliées.

Il y a trois différences essentielles entre les colonnes et les cellules conventionnelles:

- l'eau de lavage, additionnée au sommet de la mousse qui s'accumule dans la colonne;
- l'absence d'agitation mécanique;
- le système de génération des bulles (barboteur); encore que, dans certaines cellules à aérage des années '20 [4], on trouvait des systèmes analogues à ceux des colonnes.

La colonne se différencie donc radicalement des cellules conventionnelles, tant par sa conception que par le processus opérationnel. On est passé d'une opération essentiellement dynamique à une séparation dans un milieu en grande partie statique.

Sur la figure 1, on distingue les deux zones principales d'une colonne :

- **la zone de collection:** elle s'étend sur 75-80 % de la hauteur totale. C'est là que les particules solides rencontrent le flux ascendant des bulles d'air générées par le barboteur qui se trouve le plus souvent dans la partie inférieure de cette zone. La fraction volumique de gaz y est de l'ordre de 10-20 % ;

(*) Ingénieur civil des Mines - Chercheur au Service d'Exploitation des Mines de l'U.L.B.

- **la zone d'enrichissement:** cette zone est occupée par la mousse, qui est une mousse humide (60-90% de gaz).

Dans la partie supérieure de cette zone, l'eau de lavage est ajoutée dans le lit de bulles et descend vers la zone de collection. Cette eau stabilise la mousse en remplaçant l'eau naturellement drainée. Le bias est le flux net d'eau traversant toute section de la mousse. Quand il est positif (vers le bas), il permet l'évacuation des grains hydrophiles emprisonnés dans la mousse et accroît la sélectivité de la séparation.

Deux grandeurs fondamentales caractérisent le fonctionnement de la colonne:

- **La fraction volumique de gaz ϵ_g** dans le mélange air-pulpe, mesurée dans des conditions normalisées et exprimée en % du volume total. Cette grandeur, facilement mesurable, est liée au débit de gaz par une relation monotone croissante.
- **La vitesse V_g du gaz**, exprimée en mètres par seconde. Si Q_g est le débit d'air (en mètres cubes par seconde) et S_c est la section de la colonne (en mètres carrés), $V_g = Q_g/S_c$.

2. Description de l'installation de l'U.L.B.

La figure 2 représente l'installation du laboratoire de Préparation des Minerais de l'ULB. Elle est constituée de la colonne proprement dite, du bac de conditionnement, de l'alimentation en moussant et de pompes, tuyauteries, ... nécessaires à l'entretien des différents flux; les dimensions détaillées des diverses parties de la colonne sont indiquées (en mm) sur le schéma.

Au cours des premiers essais, divers accessoires se sont avérés nécessaires, dont les plus utiles sont:

- une échelle métrique dont l'origine est arbitraire, disposée le long de la colonne, et utile à la normalisation des essais;
- trois fenêtres en plexiglas permettant d'observer et de photographier les bulles sans déformation importante de l'image; ces fenêtres sont en fait de petits récipients accolés à la colonne, et contenant de l'eau distillée;
- une injection tangentielle d'eau, au sommet de la colonne, servant à l'entraînement des mousses.

La pulpe est pompée à partir du conditionneur en acier inoxydable. Le débit d'alimentation en pulpe est de 60 l/h, valeur choisie en fonction du diamètre de la colonne.

Le débit de l'eau de lavage est un paramètre important, qui influence sensiblement la sélectivité de la flottation. L'expérience ayant montré que ce débit doit rester inférieur à 10% de celui de la pulpe, un débit moyen de 4 l/h a finalement été adopté; ce débit assure une bonne stabilité de la mousse.

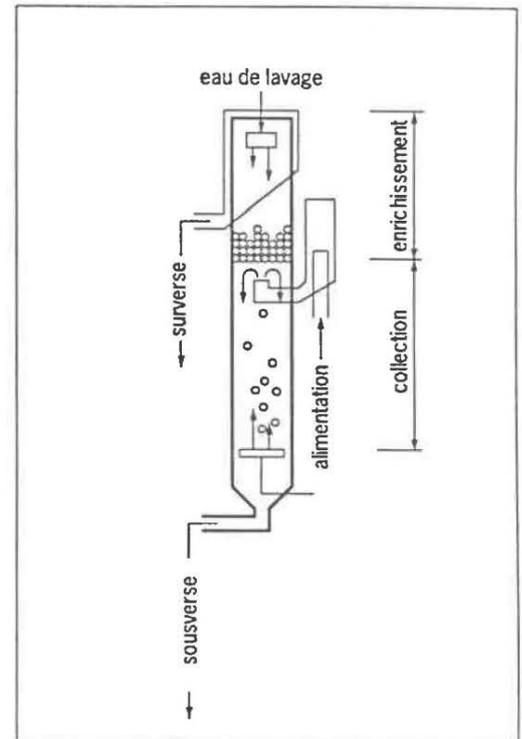


FIGURE 1: Colonne de flottation (d'après [5])

La solution de moussant se trouve dans un grand récipient en verre situé au sommet de l'installation; le débit minimum de liquide assurant un écoulement continu est de 5,5 l/h. Les concentrations des solutions sont, pour chaque cas particulier, adaptées à ce débit.

L'air sous pression est injecté au bas de la colonne à travers un barboteur en verre fritté.

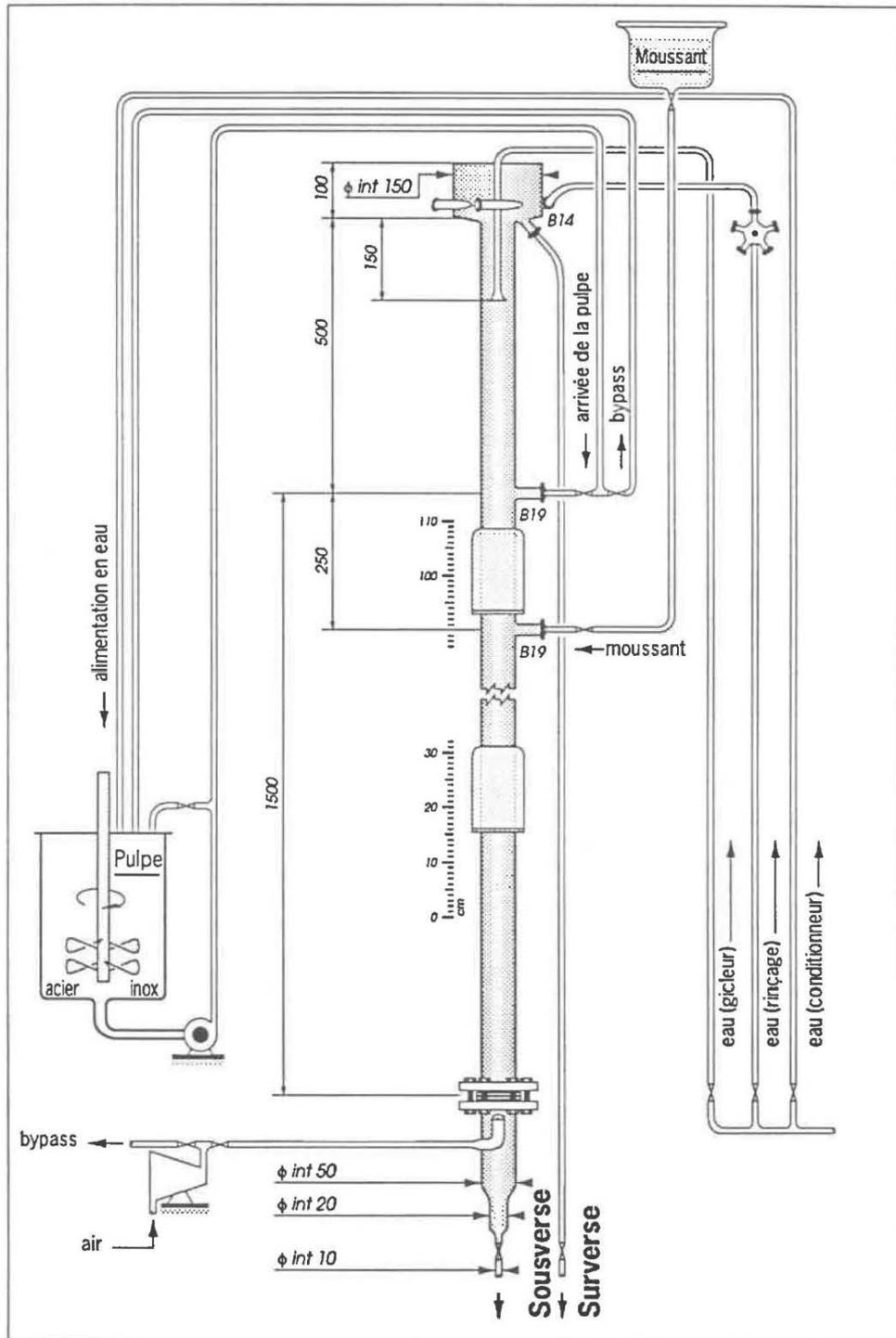


FIGURE 2: La colonne de flottation de L'ULB

3. Détermination de l'influence des différents paramètres

Pour étudier l'efficacité de la colonne, un certain nombre d'expériences ont été réalisées en flottant du quartz pur aux amines grasses, excepté pour l'étude de la taille des bulles pour laquelle l'eau distillée seule a été employée.

3.1 Taille des bulles

Comme en cellule conventionnelle, la taille des bulles est un des paramètres influençant sensiblement l'efficacité de la colonne de flottation. Il doit exister une taille optimale: pour un débit d'air donné, si la taille des bulles diminue, leur surface totale croît, augmentant la probabilité d'une rencontre entre bulles et grains. Cependant, les bulles doivent être suffisamment grandes pour entraîner les grains dans la zone de mousse, au sommet de la colonne. Selon la littérature, la taille optimale se situerait entre 1 et 3 mm [3].

Il est donc nécessaire, pour une colonne donnée avec son barboteur, de déterminer la distribution de la dimension des bulles qui dépend du débit de gaz injecté, mais aussi de nombreux autres paramètres: pH, densité, viscosité, température et turbulence de la pulpe; nature, forme, densité et dimension des grains; nature, temps de conditionnement et concentration en réactifs divers... Il est dès lors clair qu'il est impossible de définir théoriquement, ni même d'estimer expérimentalement, la distribution granulométrique optimale des bulles. Il n'est pas possible non plus de dresser des tables de valeurs en fonction des différents paramètres. Ceux-ci sont tellement nombreux que l'étude serait démesurément longue (et injustifiable) et les tables forcément incomplètes. Tout au plus peut-on chercher expérimentalement, et au cas par cas, un réglage de la colonne (type de barboteur, V_g , température de travail, ...) adapté à la flottation étudiée (caractérisée par un minéral, un collecteur et d'autres réactifs).

L'objectif de l'étude décrite ci-après est de donner des repères pour les futures recherches en étudiant la distribution granulométrique des bulles produites par le barboteur de la colonne du laboratoire, sous différents V_g (ou ϵ_g), dans de l'eau distillée et en absence de réactifs.

Pour réaliser cette étude, des photographies ont été prises face aux fenêtres mentionnées au §.2, c'est-à-dire à trois hauteurs différentes, et ce pour quatre ϵ_g différents. Chaque photo a été prise deux fois pour tenir compte des fluctuations éventuelles. Les clichés ont ensuite été agrandis (format A3) en vue de faciliter les mesures. Les dimensions de deux cents bulles ont été mesurées manuellement pour chaque débit et chaque hauteur. D'une manière générale, la reproductibilité est très bonne (comparaison des résultats obtenus à partir de chacun des deux clichés).

Pour chaque cas, la moyenne, le mode, la médiane et l'écart-type ont été évalués. Les valeurs des trois premiers paramètres caractéristiques sont assez proches pour qu'il soit inutile de les distinguer et seules les moyennes arithmétiques sont utilisées.

La figure 3 permet de conclure que, pour les quatre V_g envisagées, la distribution de la taille des bulles n'évolue pas avec la hauteur. La figure 4 montre clairement que la dimension moyenne des bulles augmente avec ϵ_g (et donc V_g). Cette constatation confirme les expériences décrites et commentées dans la littérature [1], [2], [3]. On voit aussi que la taille moyenne reste bien comprise entre 1 et 3 mm. Le calcul de l'écart-type a montré que la dispersion augmente avec le débit d'air. Quand ϵ_g augmente, les bulles grandissent et leur nombre augmente, rendant les clichés plus confus; les mesures plus délicates sont sans doute entachées d'erreurs plus importantes, mais il est évident (figure 5) que la dispersion réelle croît avec ϵ_g .

Il faut insister sur le fait que les courbes obtenues n'ont qu'une valeur indicative et que différents paramètres, la présence de moussant par exemple, peuvent affecter la taille des bulles.

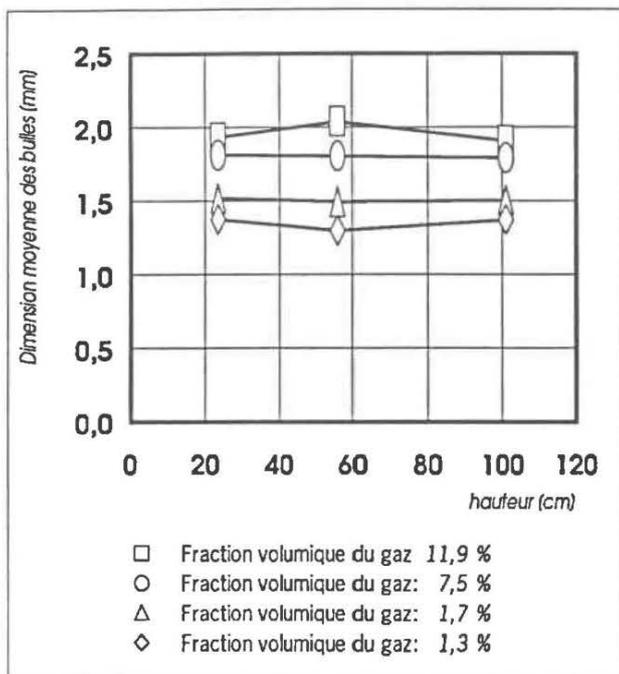


FIGURE 3: Influence de la hauteur sur le diamètre des bulles

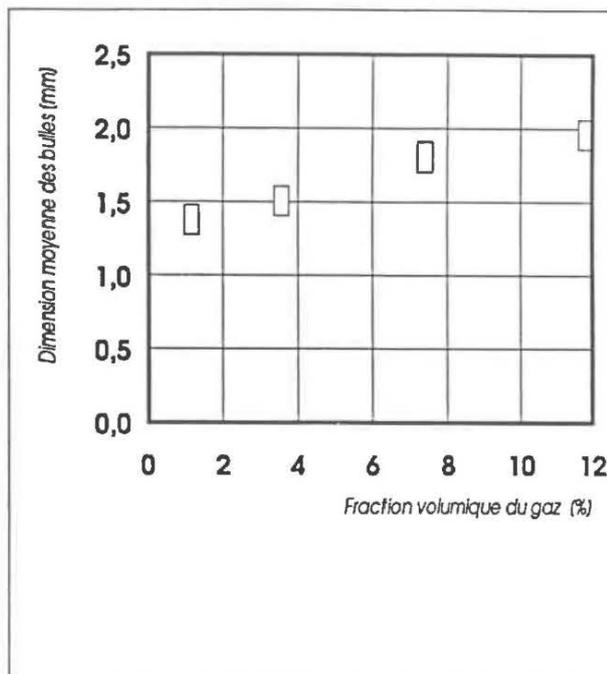


FIGURE 4: Influence de la fraction volumique du gaz sur le diamètre des bulles

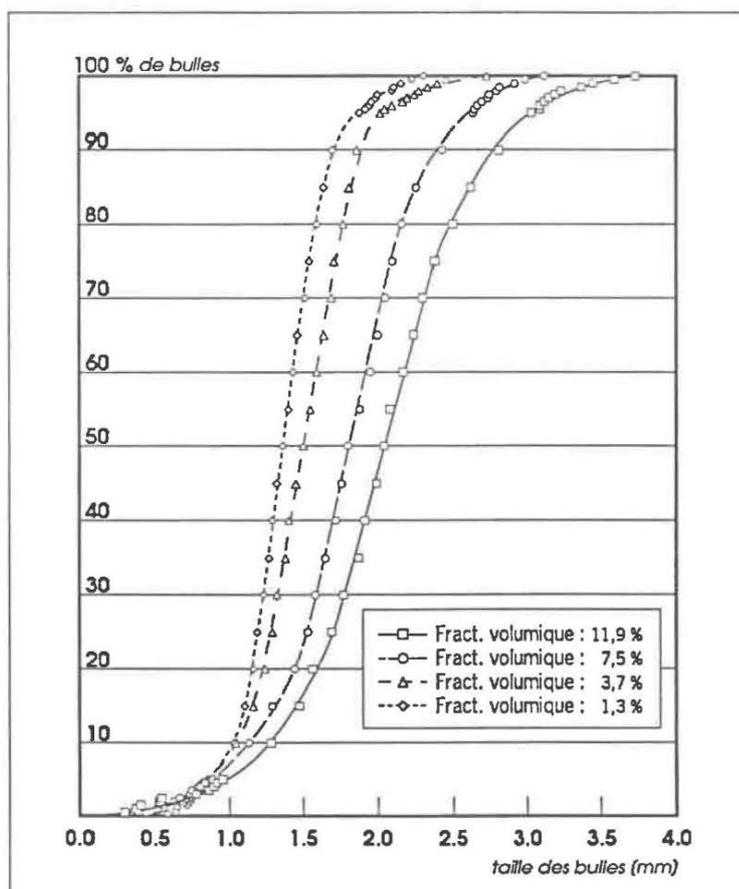


FIGURE 5: Distribution de la dimension des bulles pour différentes fractions volumiques

3.2 Influence de la fraction volumique de gaz sur l'efficacité de la colonne

Pour estimer cette influence, une série de flottations a été réalisée en faisant varier le débit d'air comprimé. Pour ces expériences, le quartz pur a été flotté en présence de 15,6 mg/l d'acétate de dodécylamine et 0,025 g/l de moussant. Les résultats expérimentaux sont repris sur le tableau I.

Le graphe de la figure 6 permet de mettre en évidence une zone très nette de valeurs optimums de ϵ_g entre 5 et 10 %. Ces limites correspondent, d'un côté, à un déficit marqué d'air, et de l'autre, au passage rapide en régime turbulent. Elles ne sont cependant pas immuables; la limite inférieure, par exemple, augmente avec la teneur en solides de la pulpe. D'autre part, des facteurs comme le pH, la nature du collecteur, etc ... influencent probablement l'étendue de la zone d'efficacité.

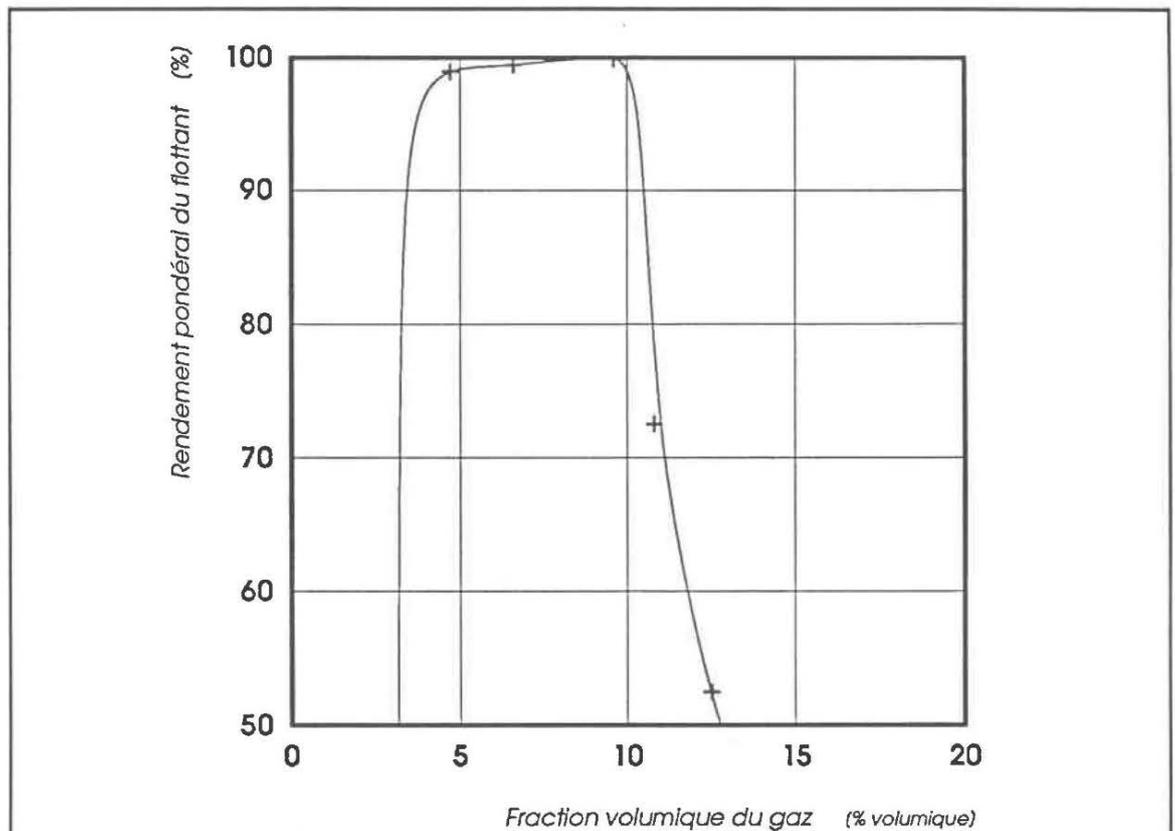


FIGURE 6, TABLEAU I: Influence du débit d'air sur l'efficacité de la colonne

Teneur en solides de la pulpe % massique	Granulométrie de l'alimentation μm	Fraction volumique du gaz %	Rend. pondéral du flottant %	Mousse appréciation
10,0	200 - 300	3,1	14,65	bien épaisse
10,0	200 - 300	4,7	99,00	bien épaisse
10,0	200 - 300	6,6	99,49	bien épaisse
10,0	200 - 300	9,6	99,94	bien épaisse
10,0	200 - 300	10,8	72,55	moins épaisse
10,0	200 - 300	12,5	52,49	bien épaisse

3.3 Influence de la densité de la pulpe

Les résultats expérimentaux obtenus lors de cette deuxième série d'essais sont résumés sur le tableau II. Ces résultats conduisent à une conclusion analogue à la précédente; il existe une zone de concentration optimum, entre 8 et 12 % en solides, au-delà de laquelle l'efficacité diminue, peut-être à cause d'un déséquilibre entre les débits des grains et des bulles. La colonne serait alors utilisée en surcapacité.

Une optimisation complète des conditions de fonctionnement nécessiterait un nombre élevé d'expériences au cours desquelles on examinerait l'influence des différentes combinaisons fraction volumique - teneur en solides de la pulpe.

Teneur en solides de la pulpe % <i>massique</i>	Granulométrie de l'alimentation μm	Fraction volumique du gaz %	Rend. pondéral du flottant %	Mousse <i>appréciation</i>
5,0	200 - 300	9,6	99,28	bien épaisse
10,0	200 - 300	9,6	99,94	bien épaisse
15,0	200 - 300	9,6	84,21	bien épaisse
20,0	200 - 300	9,6	69,30	bien épaisse

TABLEAU II: Influence de la teneur en solides sur l'efficacité de la colonne

3.4 Influence de la granulométrie des solides

Pour définir l'influence de la granulométrie des solides, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus en flottant séparément différentes tranches granulométriques et ceux de la flottation de ces mêmes fractions mélangées selon une loi logarithmico-Normale.

Les résultats expérimentaux (figure 7) confirment les données bibliographiques qui insistent sur l'efficacité des colonnes pour flotter des grains fins. Les différences entre les deux séries d'expériences confirment aussi les conclusions d'études cinétiques faites au laboratoire de Préparation des Minerais et Charbons de l'ULB qui avaient montré, dans une cellule classique, l'influence marquée de l' "environnement" granulométrique sur les résultats de flottation.

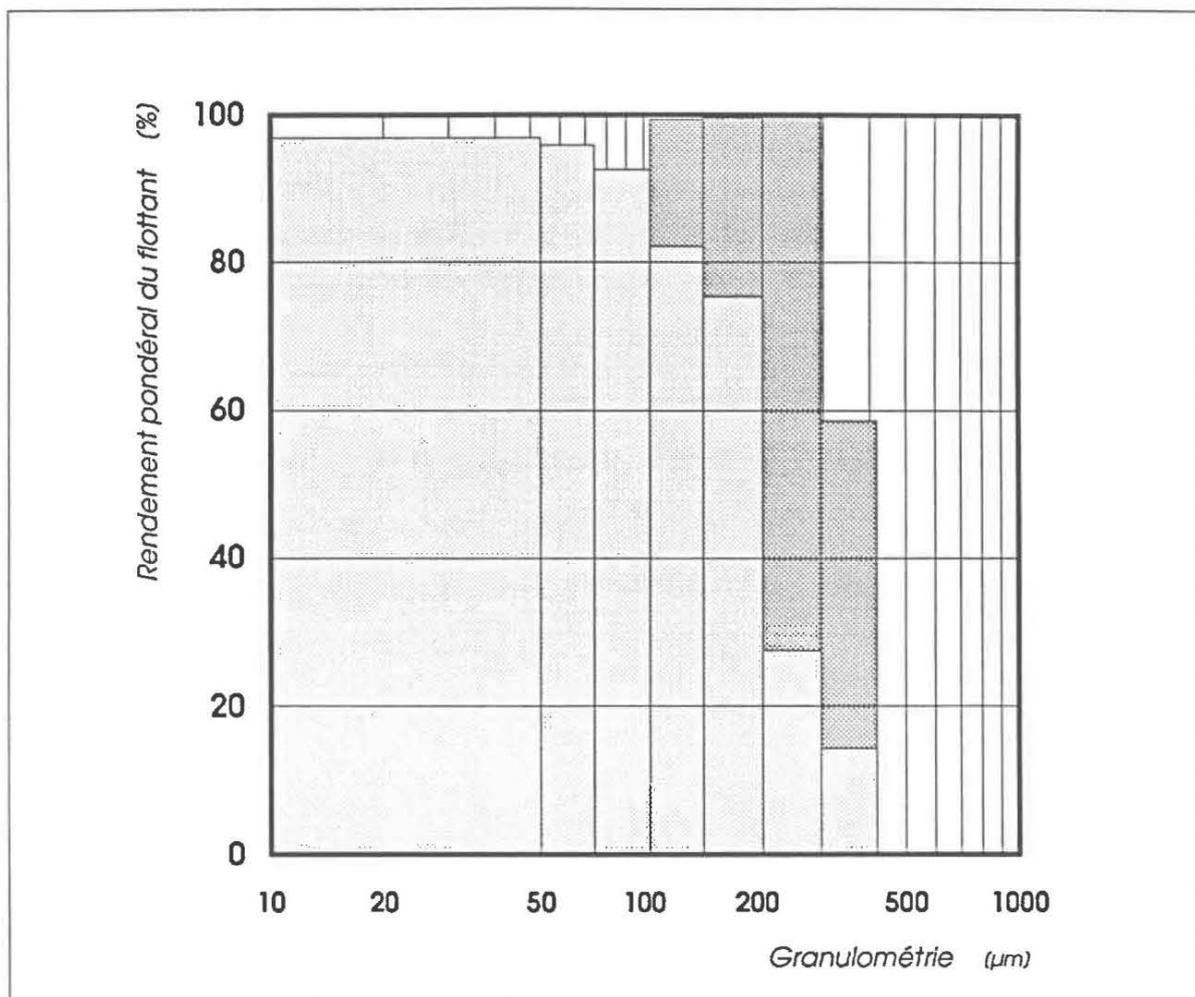


FIGURE 7: Comparaison des flottations de tranches granulométriques isolées et mélangées
 □ Log-Normale reconstituée; ▨ Tranches isolées

4. Trois essais d'enrichissement

Les expériences décrites aux paragraphes précédents permettent un réglage convenable des paramètres de fonctionnement de la colonne, et des essais d'enrichissement ont dès lors pu être tentés.

4.1 Séparation d'un mélange quartz - barytine

Il s'agit d'un mélange artificiel à 20 % en poids de barytine et 80 % en quartz. Les granulométries des deux constituants ont été choisies en vue d'un contrôle rapide des résultats: les dimensions des grains de quartz varient entre 0,2 et 0,3 mm et ceux de barytine entre 0,1 et 0,15 mm (la granulométrie la plus fine a été attribuée à la barytine parce qu'elle est friable); les spectres granulométriques des deux produits ne se chevauchent pas de sorte que le tamisage des deux produits finals à 0,15 mm donne une estimation des teneurs.

Les conditions de fonctionnement choisies sont telles que la nature et la concentration en collecteur soient celles indiquées comme optimales en cellule conventionnelle. Le collecteur est le sulfate dodécyle de sodium (50 mg/l). Ce collecteur étant auto-moussant, aucune addition supplémentaire n'est nécessaire. La fraction volumique des bulles d'air est de 9,6 %.

Les résultats expérimentaux sont repris sur le tableau III. La récupération de barytine lors d'une telle flottation en cellule est de l'ordre de 95 %, alors qu'en colonne elle n'est que de 63,3 %. Par contre, la teneur de 98,24 % obtenue en colonne correspond à une nette amélioration des résultats en cellule, où la teneur du flottant reste inférieure à 90 %. Il apparaît donc que la colonne permet l'obtention de concentrés de haute pureté, le coulant pouvant être reflotté dans un étage d'épuisement.

Produit	Rend. Pondéral %	Bilan barytine		Bilan quartz	
		Teneur %	Récupération %	Teneur %	Récupération %
Flottant Coulant	12,73 87,27	98,24 8,32	63,27	1,76 91,68	99,72
Alim.reconstituée Alimentation	100,00	19,77 20,00		80,23 80,00	

TABLEAU III: Séparation d'un mélange quartz - barytine

4.2 Séparation d'un mélange quartz - sulfures

L'alimentation est un mélange semi-artificiel de sulfures (2 % environ) et de quartz; l'échantillon, initialement riche en sulfures (de la pyrite et un peu de chalcopryrite dans une gangue quartzitique), a été dilué par addition de quartz de façon à diminuer sa teneur en sulfures. La gamme granulométrique choisie est relativement large : 74-200 μm .

Le collecteur est du xanthate isopropyle, dont la concentration est identique à celle utilisée en cellule (15,6 mg/l). Le moussant est l'Aerofroth 65 de Cyanamid.

Les résultats sont repris sur le tableau IV. Les récupérations obtenues sont excellentes. La chalcopryrite a intégralement flotté et 94 % du fer se retrouvent également dans le flottant. Mais la teneur en fer dans le flottant (31 %, alors que la pyrite titre plus de 46 %) trahit un manque de sélectivité qui a permis à une partie du quartz de flotter. Il s'agit probablement, outre les problèmes de libération incomplète, de quartz activé par le cuivre présent. Quoiqu'il en soit, les résultats (en une seule opération) sont meilleurs que ceux obtenus généralement dans un banc classique de dégrossissage. Toutefois, comme dans un atelier classique, un finissage du concentré obtenu serait nécessaire.

Produit	Rend. Pondéral %	Bilan fer		Bilan cuivre	
		Teneur %	Récupération %	Teneur %	Récupération %
Flottant Coulant	2,96 97,04	31,00 0,06	93,94	0,05 0,00	100,00
Alim. reconstituée	100,00	0,98		0,00	

TABLEAU IV: Séparation d'un mélange quartz - sulfures

4.3 Flottation d'un charbon

Cet essai a mis à profit l'expérience acquise au laboratoire de l'ULB dans la production de charbons ultra-purs (à moins de 1% en cendres) à partir de charbons préalablement et soigneusement lavés.

Il était a priori facile à traiter, puisque l'alimentation de départ ne contenait que 1,15 % de cendres et que des essais en cellule conventionnelle avaient montré que la tranche granulométrique adoptée (50 à 500 μm) constituait une "fenêtre" granulométrique d'efficacité.

Le produit de départ était un charbon maigre (7 % de matières volatiles), provenant des charbonnages du Roton à Farciennes. La concentration du collecteur, une amine tertiaire, était de 3,125 mg/l. Les résultats expérimentaux de la flottation en colonne sont repris sur le tableau V. Avec la même alimentation, et dans les mêmes conditions, le concentré obtenu en cellule conventionnelle titrait 0,6 % en cendres et la récupération était de 90 % environ de matières combustibles (*).

En une seule étape de flottation, les résultats sont meilleurs que ceux obtenus en trois ou quatre opérations en cellule.

Produit	Rendement Pondéral %	Teneur en cendres %	Récupération (*) des matières combustibles %
Flottant Coulant	98,95 1,05	0,29 82,16	99,81
Alim. reconstituée Alimentation	100,00	1,15 1,23	

TABLEAU V: Essai de flottation d'un charbon ultra - pur

Conclusions générales

Les connaissances théoriques acquises sur les colonnes de flottation ont été transposées et adaptées à la colonne du laboratoire de Préparation des Minerais et Charbons de l'ULB. L'étude de l'influence de certains paramètres de réglage de la colonne a permis de déterminer les zones de fonctionnement optimum de cet appareil.

Un corpus de données est à présent accessible pour le réglage lors des utilisations futures de la colonne: par exemple, avec le barboteur installé, le domaine dans lequel il faut choisir le débit d'air pour avoir une taille correcte de bulles est connu. Il en va de même des domaines des granulométries des solides et de la densité de la pulpe. Les valeurs les plus efficaces des différents débits qui alimentent la colonne ont également été déterminées.

Les essais d'enrichissement ont, quant à eux, conduit à des résultats globalement meilleurs qu'en cellule conventionnelle, et démontré la possibilité d'obtenir en colonne des concentrés de haute pureté.

(*) Définie comme le complément à 100 de la teneur en cendres

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DOBBY, G.S. & FINCH, J.A., *Particle collection in columns - Gas rate and bubble size effects*, Can. Metall. Quarterly, Vol. 25, 1986, n°: 1, pp: 9-13.
- [2] FINCH, J.A. & DOBBY, G.S., *Column Flotation*, Pergamon Press. Oxford, 1ère édition, 1990, 180 p.
- [3] O'CONNOR, C.T., RANDALL, E.W. & GOODALL, C.M., *Measurement of the effects of physical and chemical variables on bubble size*, Intern. J. Min. Processing, Vol. 28, 1990, n°: 1/2, pp: 139-149.
- [4] PANOU, G., *Minerais et Préparation des Minerais*, Notes prises au cours, 1990.
- [5] YIANATOS, J.B., *Flottation en colonne - Etat actuel de la technologie*, Industrie Minérale, Supplément: Les Techniques, Vol. 72, 2-3/1990, pp: 31-40.