

## QUELQUES ASPECTS DE LA CONCENTRATION DES MINERAIS ET DE SON EVOLUTION<sup>1)</sup>

V. FORMANEK<sup>2)</sup>

### PREAMBULE

La concentration des minerais est un sujet très vaste; c'est pourquoi je me limiterai à parler seulement de certains procédés de concentration en m'appesantissant un peu plus sur l'évolution du procédé de flottation.

### PLAN DE L'EXPOSE

#### 1. Introduction

- 1.1 Nécessité de la concentration des minerais
- 1.2 Chronologie des innovations majeures dans les procédés de concentration

#### 2. Les procédés de concentration des minerais et les facteurs intervenant dans la sélection et l'évolution des procédés

- 2.1 Facteurs intrinsèques au minerai
- 2.2 Facteurs socio-économiques

#### 3. De quelques procédés de concentration jouant un rôle dans la valorisation des minerais

- 3.1 Spirales Humphreys
- 3.2 Milieu dense
- 3.3 Flottation

#### 4. Evolution du procédé de flottation

- 4.1 Introduction; les contraintes; hausse des coûts et prix de revient
- 4.2 Perfectionnements en vue d'abaisser les coûts de main d'oeuvre et de force motrice:
  - 4.2.1 Capacité unitaire de la laverie
  - 4.2.2 Dimensions de la cellule de flottation
  - 4.2.3 Modifications de la cellule de flottation conventionnelle

#### 4.2.4 Simplifications

#### 4.2.5 Contrôle et automatisation des laveries

### 5 Conclusions

### I. INTRODUCTION

#### 1.1 Nécessité de la concentration des minerais

La production minière mondiale annuelle représente plus de 3 milliards de tonnes de minerai brut, lequel dans la plupart des cas doit être préparé et concentré avant d'être utilisable comme matière première pour la métallurgie ou l'industrie chimique.

Le minerai tout-venant qui sort de la mine est constitué le plus souvent par des roches de structure complexe où se trouvent associés plusieurs minéraux (parfois des dizaines) de formes et de dimensions variées. L'élaboration des métaux ou autres éléments chimiques sur les tout-venants est rarement applicable soit pour des raisons techniques, soit pour des raisons économiques.

Il s'agit alors de trier les minéraux de valeur qui intéressent l'industrie et de rejeter les gangues.

C'est ce triage qui constitue la préparation ou concentration mécanique des minerais. Cette opération constitue une valorisation du minerai, car en cas d'échec un gisement restera inexploitable.

#### 1.2 Chronologie des innovations majeures dans les procédés de concentration

La concentration des minerais est sans doute aussi vieille que la métallurgie. Après le simple triage à la main il est vraisemblable que l'on ait cherché à imiter la classification naturelle des graviers ou des sables qui s'opère dans les cours d'eau ou au bord de la mer, en lavant les minerais dans des courants d'eau.

Ce lavage qui permet un classement à la fois selon les dimensions, les formes et les densités des grains, est resté pratiquement le seul principe de base de tout le traitement

<sup>1)</sup> Lezing gehouden op 27 oktober 1972 te Delft ter gelegenheid van het XVIe lustrum van de Mijnbouwkundige Vereeniging.

<sup>2)</sup> Société *Le Nickel-Penarroya-Mokta* Ingénieur conseil à l'état major du group de recherche.

des minerais s'effectuant jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle. Actuellement encore, la plupart des traitements s'effectuent dans l'eau et le terme de lavage est resté dans le vocabulaire: les usines s'appellent laverie ou lavoir (charbon).

Les progrès des techniques et de la science ont leur répercussion sur la concentration des minerais qui a pu élargir considérablement sa gamme de moyens.

PROCEDE DE CONCENTRATION

ANNEE	DENSITE	MAGNETIQUE	ELECTRIQUE	PHYSICO-CHIMIQUE	CHIMIQUE	BIOLOGIQUE
avant JC	Triage manuel					
après JC	SLUICE Table dormante					
1300	Table à secousses hydrauliques					
1876					Hydrométallurgie	
1888		Séparateur basse intensité				
1900	Table à secousses WILFLEY					
1907			Electrostatique			
1915				Flottation		
1930	Milieu dense Cyclone milieu dense					
1948	Spirale HUMPHREYS					
1955	ORE SORTER					Biominéralurgie
1960		Séparateur haute intensité humide				
1965	MOZLEY ORBITAL GRAVITY					
1968				Flottation sélective		

Tableau 1  
Chronologie des innovations majeures dans les procédés de traitement des minerais.

Le tableau 1 donne une chronologie schématique des innovations majeures dans les procédés de traitement des minerais.

Le tableau fait apparaître l'accélération des innovations au XX<sup>e</sup> siècle.

## II. LES PROCEDES DE CONCENTRATION DES MINERAIS ET LES FACTEURS INTERVENANT DANS LA SELECTION ET L'EVOLUTION DES PROCEDES

### 2.1 Facteurs intrinsèques au minerai

Les principaux procédés de concentration sont:

- la gravimétrie, basée sur les différences de densité
- la séparation magnétique, basée sur les différences de susceptibilité magnétique
- la séparation électrique, basée sur les différences de comportement dans un champ électrique
- la flottation, basée sur les différences de propriétés superficielles

— l'hydrométallurgie et la biominéralurgie, basées sur la différence de solubilité des minéraux aux agents chimiques ou biologiques

L'utilisation de ces procédés est subordonnée au broyage des minerais, opération essentielle car la taille des particules doit être adaptée aux traitements qu'elles subiront.

Mais c'est la libération des constituants qui impose en premier lieu la dimension du broyage; elle varie très largement selon les cas entre quelques dizaines de microns et quelques centimètres.

La libération serait parfaite si l'on savait réaliser les casures à l'endroit même des surfaces de discontinuité entre les divers minéraux. En fait les ruptures s'effectuent selon les zones de moindre résistance des roches qui ne coïncident pas forcément avec les surfaces de discontinuité, au hasard des forces appliquées pendant la fragmentation.

On obtient finalement un mélange de trois catégories de grains répartis selon une certaine plage granulométrique: les minéraux de valeur libre, les gangues libres et les grains mixtes. Si d'une façon générale on cherche la meilleure libération possible, cette notion est relative et on détermine un degré de libération tel que les mixtes ne soient pas un gêne. La phase de préparation mécanique du minerai, qui consiste à libérer le mineral de valeur de sa gangue et à le classer, est un élément important du prix de revient qu'on cherche à réduire par le choix d'une dimension de libération économique. Dans chaque cas un calcul du prix de revient est

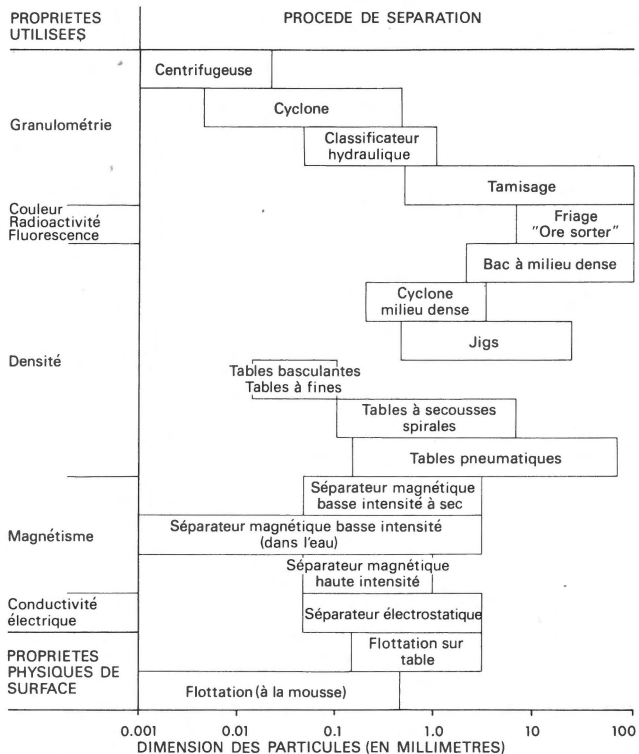


Tableau 2  
Domaines granulométriques des principaux procédés de préparation des minerais.

à faire pour savoir jusqu'à quel point il y a lieu de pousser le broyage pour obtenir le profit maximum.

Pour situer l'importance de ce poste, on peut indiquer que pour une roche dure la consommation en kwh/tonne varie entre 0 15 et 40 lorsqu'on part d'un concassage grossier pour aboutir à un broyage fin.

Le choix d'un procédé de concentration est conditionné par la dimension et la nature des divers minéraux associés dans le minerai.

Le tableau 2 résume sommairement les caractéristiques physiques qui peuvent intervenir dans le choix d'un procédé de séparation et le tableau montre également dans quel domaine de granulométrie ces divers procédés sont applicables.

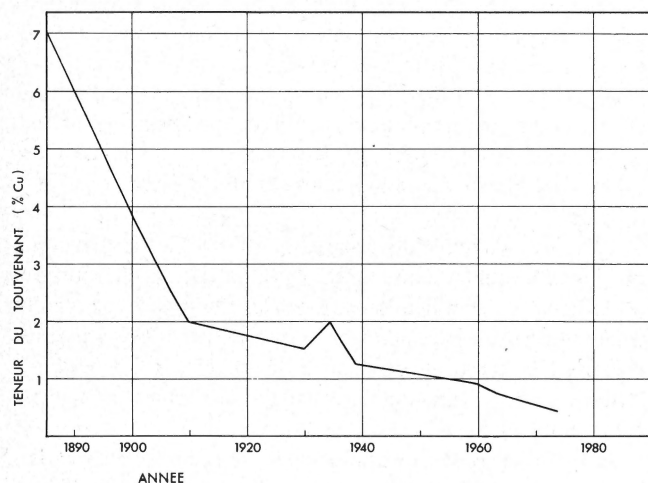
## 2.2 Facteurs socio-économiques

Les opérations d'extraction du minerai, de sa concentration et d'élaboration finale de la matière (métal ou composé chimique) constituent un tout et ces techniques s'influencent mutuellement.

L'évolution dans la technologie de l'enrichissement des minerais a été provoquée par un ensemble de contraintes. Ces contraintes, qui ont obligé le minéralurgiste à s'adapter, sont les suivantes:

TABLEAU 3  
Evolution de la productions de fer aux Etats Unis.

Année	Tonnage annuel de minerai
1856	7.000
1860	100.000
1873	1.000.000
1958	118.000.000
1970	91.000.000

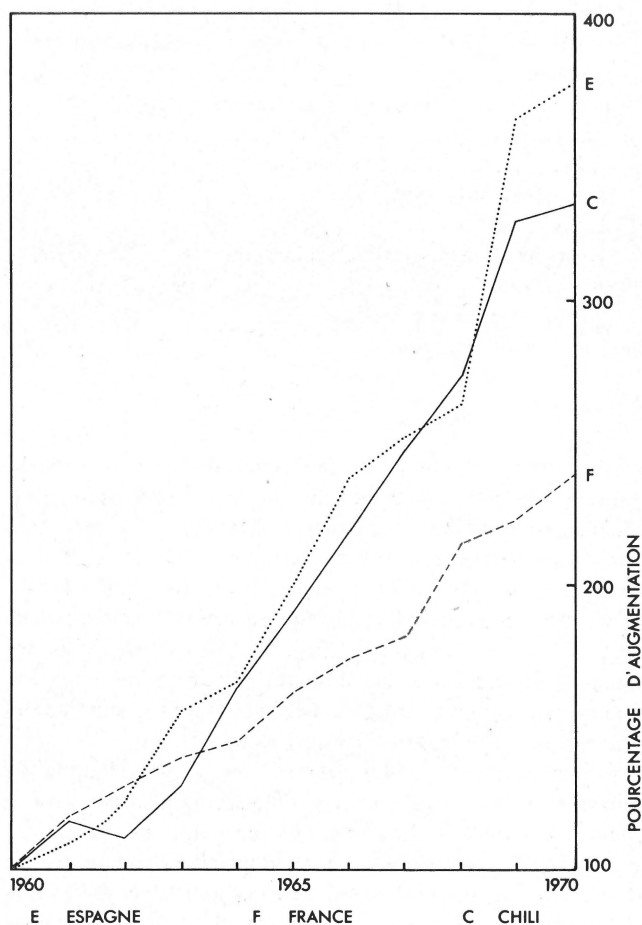


Graphique 4  
Evolution de la teneur des minerais de cuivre traités aux Etats Unis.

- progression de la demande de produits minéraux (tableau 3)
- diminution constante des teneurs des minerais tout-venant (graphique 4)
- accroissement de la complexité des minerais traités par suite de l'application de méthodes d'abattage et d'extraction moins sélectives, et de la raréfaction de certains minéraux
- intérêt des utilisateurs pour des métaux ou composés chimiques de plus en plus variés (tableau 5)

TABLEAU 5  
Progression dans les variétés de minerais traités

Année	Nombre de minerais métalliques	Nombre de minerais non métalliques
1864	3	-
1895	9	1
1945	24	19
1965	30	25



Graphique 6  
Evolution des salaires (Exprimes en dollars U.S.) Dans différents pays.

- exigences de plus en plus grandes de l'industrie, utilisatrice des matières premières. Les teneurs en certaines impuretés doivent être extrêmement faibles sinon le produit est lourdement pénalisé à l'achat ou même refusé.
- augmentation constante du coût de la main d'oeuvre (graphique 6) Le coût de la main d'oeuvre a progressé toujours plus rapidement que le coût de l'énergie ou celui des fournitures.
- concurrence sans cesse plus vive par suite entre autres de l'abaissement des coûts du transport et des produits de remplacement; en conséquence les cours de certains métaux ne progressent pas au même rythme que les coûts des différents postes de traitement.
- pression de plus en plus forte du public et des gouvernements pour diminuer le taux de pollution des installations industrielles.

### III. DE QUELQUES PROCÉDES DE CONCENTRATION JOUANT UN RÔLE DANS LA VALORISATION DES MINÉRAIS

Les usines devant être plus grandes, plus efficaces, plus faciles à contrôler, à réguler, à entretenir, seuls les procédés susceptibles de répondre à ces exigences et susceptibles d'évolution se sont développés ces dernières décades, à savoir: parmi les procédés gravimétriques

- la concentration par milieu dense
- la spirale Humphreys
- le jig
  - parmi les procédés physico-chimiques
- la flottation
  - parmi les procédés chimiques
- l'hydrométallurgie

#### 3.1 Spirales Humphreys

La spirale est une goulotte de section arrondie enroulée suivant une hélice, dans laquelle on laisse écouler une pulpe de minerai broyé. La spirale permet de traiter des grains entre 2 et 0.06 mm. Les grains décrivent une trajectoire dont la projection, sur un plan perpendiculaire à l'axe, est une droite. Tout solide tend donc à se déplacer vers le centre d l'appareil. Sous l'effet des forces centrifuges, de pesanteur, de frottement et du courant d'eau, il se produit une classification; les grains les plus denses cheminent à l'intérieur de la spire tandis que les plus légers sont centrifugés vers l'extérieur.

Il existe deux types de spirales: les spirales Humphreys construites en fonte et les spirales Mineral Deposit en matière plastique moulée renforcée par des fibres de verre.

La réussite industrielle de cet appareil s'explique par le fait que la spirale n'utilise pas de force motrice et qu'il s'agit d'un appareil très simple, peu encombrant nécessitant peu d'entretien et de surveillance. La capacité d'un appareil est de 0,5 à 2,5 tonnes/heure.

Ces caractéristiques avantageuses expliquent que le traite-

ment par spirale soit en développement; les spirales équipent des usines de 60.000 t/jour. Fin 1966, il y avait déjà plus de 25.000 appareils en activité dans l'industrie minière occidentale traitant les minerais les plus divers comme l'indique le tableau 7.

TABLEAU 7

Catégories de produits traités par spirales Humphreys (Répartition en fonction du nombre de spirales en utilisation)

Nature du produit	%
Minerais de fer	67,0
Minerais de titane et zircon	20,4
Minerais de tungstène	3,3
Minerais de chrome	1,6
Minerais de charbon	1,2
Minerais de phosphates	1,2
Monazite et minerais radioactifs	0,4
Mica	0,8
Minerais de plomb et de zinc	0,3
Minerais d'or	0,2
Baryte, manganèse, pyrite, cuivre, talc	0,3
Divers	3,3

#### 3.2 Milieu dense

Le procédé gravimétrique à la fois le plus simple et le plus parfait consiste à introduire un minerai broyé dans un liquide de densité intermédiaire entre les densités de la gangue et du minéral de valeur.

À l'origine les matériaux utilisés pour confectionner les médiums étaient la barite et la galène; rapidement la préférence a été donnée aux matériaux magnétiques qui permettent une meilleure récupération et une meilleure épuration du milieu dense par simple séparation magnétique. L'emploi de la magnétite et surtout du ferrosilicium sphérique a fait progresser l'utilisation du procédé par milieu dense en élargissant la plage de granulométrie et de densité, en améliorant la perfection de la coupure.

Pour des minerais à cristallisation grossière ce procédé est susceptible de donner des concentrés définitifs et de traiter des grains compris entre 3 et 300 mm.

Si au lieu d'utiliser la force de pesanteur on utilise un champ centrifuge de plusieurs centaines de fois la pesanteur, il est possible de traiter les grains plus fins. L'emploi de cyclones à milieu dense permet de traiter des grains jusqu'à 0,2 mm.

L'un des facteurs de progrès le plus important dans le procédé par milieu dense a été l'automatisation du contrôle de la densité du milieu dense avec des densimètres. Le contrôle automatique des additions de solides et d'eau a permis d'abaisser la variation de densité de + 0,15 à + 0,05 points. D'autre part, la main d'oeuvre dans les usines a pu être considérablement réduite.

Enfin les progrès technologiques dans les cribles et les séparateurs magnétiques ont eu pour conséquences de réduire les volumes d'eau, et la dimension des appareils.

Les procédés par milieu dense s'appliquent de préférence à

TABLEAU 8

Catégories de produits traités par milieu dense (Répartition en fonction des tonnages produits)

Nature du produit brut	% (poids)
Minerais de fer et de manganèse	50
Minerais métalliques (Pb, Zn, Cu, Sn, FeS <sub>2</sub> )	10
Minerais non métalliques (fluorine, magnésite, sels, diamants, bauxite)	30
Matériaux de construction (gravier, pierre ponce)	10
	100

des minerais simples et une répartition des types de produits traités est donnée au tableau 8.

Les procédés par milieu dense et notamment les cyclones à milieu dense continuent à se développer particulièrement pour le traitement de graviers diamantifères très fins et pour le traitement de minerais de spath fluor.

Bien que la tendance dans le traitement des minerais soit à la simplification, le procédé de séparation par milieu dense est encore appliqué dans certaines grandes mines de minerais sulfurés, comme par exemple à la mine plomb-zinc de Sullivan en Colombie Britannique qui traite 10.000 tonnes par jour.

#### IV. EVOLUTION DU PROCEDE DE FLOTTATION

##### 4.1 Introduction. Les contraintes. Hausses des coûts et prix de revient

Les progrès dans les procédés d'extraction minière, l'augmentation des capacités des appareils, les hausses des prix ont profondément modifié ces dernières années le rapport du coût de la flottation par rapport au coût global (mine comprise). Le coût relatif de la flottation ne fait qu'augmenter et c'est normal du fait de l'effort d'enrichissement croissant demandé.

Ainsi la laverie représentait en moyenne:

- 20% du prix de revient total en 1950
- 35% du prix de revient total en 1965
- 55% de prix de revient total en 1972

Le coût de l'enrichissement prend donc une importance de plus en plus grande dans le coût total et cette tendance va s'accroître.

Or dans une laverie de flottation moderne les éléments du prix de revient se répartissent en moyenne ainsi:

	%
- main d'oeuvre	25
- force motrice	25
- pièces d'usine	15
- divers	14
- atelier	13
- rechanges	8
	<hr/> 100

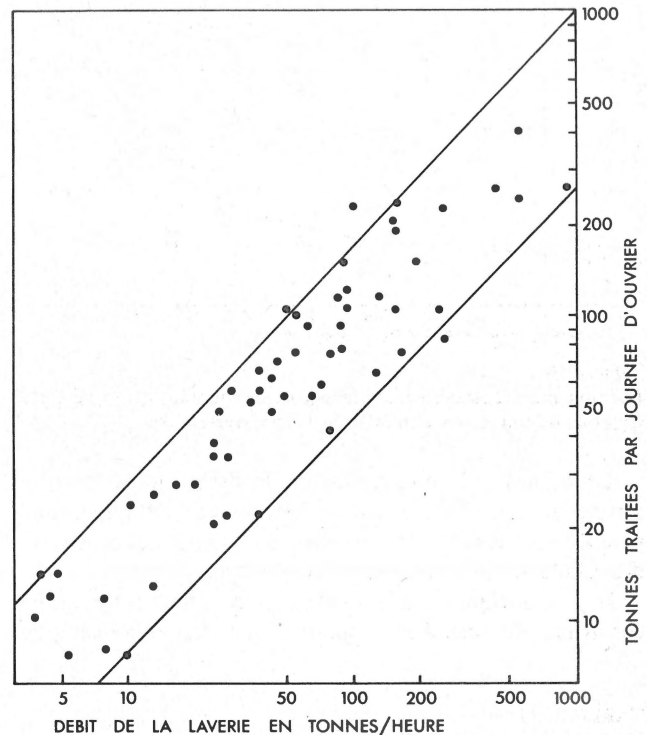
Les réactifs ne figurent pas dans ce total; ils ont été comptabilisés à part car leur coût peut être très variable selon

le type de minerai à traiter. Les réactifs peuvent représenter de 5 à 65% des dépenses précédentes.

On constate que les deux postes importants de dépenses sont la main d'oeuvre et la force motrice qui toutes deux connaissent de fortes hausses de prix.

##### 4.2 Perfectionnement en vue d'abaisser les coûts de la main d'oeuvre et de force motrice

4.2.1 Capacité unitaire de la laverie — Le coût de la main d'oeuvre est naturellement fonction de la taille de la laverie, notamment lorsqu'on le calcule en tonnes par homme-poste. La productivité en flottation est de 30 tonnes par homme-poste dans une petite laverie pour atteindre 200 tonnes par homme-poste dans une laverie moderne et plus de 1000 tonnes par homme-poste dans les plus grandes laveries construites en 1972 (graphique 9).



Graphique 9  
Exemples de productivités simples.

La productivité de la main d'oeuvre a pu être augmentée considérablement ces dernières années grâce aux progrès réalisés:

- dans la construction des machines de flottation
- dans les capteurs, c'est à dire dans les appareils de mesures des teneurs, des granulométries, des densités, des débits, etc...
- dans une meilleure connaissance des phénomènes de la flottation, ce qui a eu pour effet de modifier les formules de réactifs, les schémas de flottation, les appareils
- dans l'emploi d'un personnel de qualification plus élevée.

Nous allons parler plus en détail de quelques uns de ces progrès qui ont bouleversé la productivité de la main d'oeuvre et les consommations d'énergie.

**4.2.2 Dimensions de la cellule de flottation.** — Ces dernières années des recherches fondamentales intensives ont été faites sur les caractéristiques hydrodynamiques des turbines de flottation. Parallèlement les constructeurs de machines ont été conduits, sous la pression économique due à la diminution des teneurs et l'accroissement hyperbolique des investissements et des prix de revient, à entreprendre la mise au point d'appareils à très gros débits sans baisse des performances (graphique 10). Une concurrence très vive a favorisé la percée technologique vers des cellules de flottation de très grande capacité.

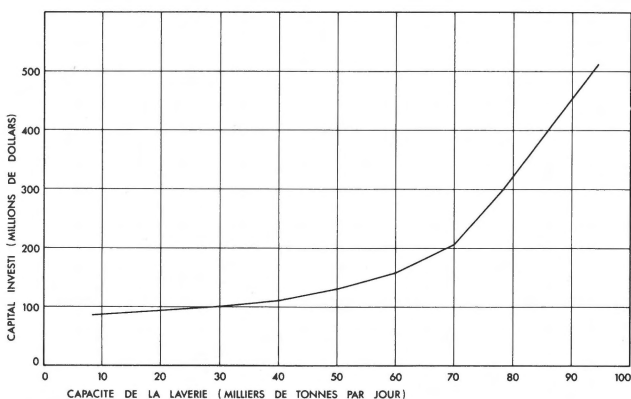


Tableau 10

Relation entre la capacité d'une laverie et le capital investi. (Exemples de mines de cuivre avec exploitation à ciel ouvert)

Le tableau 11 montre, depuis le début de la mise en service des cellules à agitation mécanique, cette évolution parallèle des capacités des laveries, du volume des plus grandes cellules et de la consommation d'énergie.

Il y a quelques années seulement on était incapable de construire des cellules à agitation mécanique de plus de

1,7 m<sup>3</sup> (60 cu.ft), car on n'avait pas maîtrisé les problèmes de dispersion d'air et de maintien en suspension des particules minérales. Des études systématiques sur les turbines de flottation ont permis de franchir cette limite et aujourd'hui des cellules de flottation classiques existent avec des capacités de 8,5, 14 et 17 m<sup>3</sup>. D'autre part des cellules de conception un peu différente de 20 et 56 m<sup>3</sup> (2000 cu.ft) sont actuellement à l'essai.

Nombreuses sont les publications pour démontrer que les cellules de grande capacité, lorsqu'elles sont soigneusement réglées pour le minerai à traiter, donnent des rendements métallurgiques équivalents aux cellules plus petites.

Les cellules de grande capacité se répandent rapidement pour les raisons suivantes:

- surface occupée au sol par les cellules considérablement réduite (voir tableau 11).
- par rapport aux cellules conventionnelles, coût d'entretien réduit de 15 à 25%. Ainsi dans une usine de 3000 t/jour, lorsqu'on remplace 96 cellules conventionnelles de 24 cu.ft par 12 cellules de 200 cu.ft il n'y a plus que 12 turbines à entretenir au lieu de 96.

En outre les tuyauteries nécessaires pour les arrivées d'eau, de réactifs etc... sont 4 fois plus courtes. Les installations électriques sont également simplifiées.

- les coûts d'investissement sont réduits de près de 40% par rapport aux cellules conventionnelles.
- La surveillance est facilitée puisque l'usine est plus compacte. La productivité de la main d'oeuvre est accrue.
- La consommation électrique par cellule et par tonne traitée est sensiblement plus faible.

**4.2.3 Modifications de la cellule de flottation conventionnelle.** — Les cellules conventionnelles ont elles-mêmes considérablement évolué, vers une simplification et une diminution des frais d'investissement et d'entretien par:

- le remplacement de cellules individuelles par des cellules en auge
- la suppression des écumeurs

TABLEAU 11

Evolution du procédé de flottation

Année	Tonnage traité par la plus grande laverie	Volume de la plus grande cellule a agitation mécanique	Surface au sol des cellules (plancher de con- pour assurer le tonnage (sg ft)	consommation électrique moyenne (sur minerais de cuivre) kwh/tonne/cellule)
1865	,500	—	—	—
1915	1000	—	—	—
1920	30000	46	22000	2,0
1945	40000	100	23000	—
1965	50000	200	22900	1,2
1969	60000	300	21300	0,8
1972	90000	500	12500	0,6

- la suppression de l'autoaspiration des turbines, ce qui a eu pour conséquence l'introduction d'air surpressé pour l'aération mais aussi l'installation de cellules en cascade et la limitation des retours.
- la suppression de tout mécanisme fragile ou coûteux pour la régulation de niveau
- la simplification des turbines, allant jusqu'à la suppression du stator
- l'allègement du poids des appareils par l'utilisation des nouvelles techniques de fabrication, l'usage de tôles soudées et non boulonnées, l'emploi de matériaux nouveaux.
- la diminution relative du nombre de turbines par rapport au volume des bacs.
- l'emploi de matériaux caoutchotés et des matières plastiques pour les protections, pièces antiusures, turbines, goulottes, etc. a réduit considérablement les frais d'entretien pour cause d'usure ou de corrosion.
- Amélioration notable des performances de la flottation grâce aux quelques progrès qui ont été faits dans la connaissance des phénomènes physico-chimiques et dans les facteurs mécaniques. Nous disposons maintenant d'une gamme importante de cellules conventionnelles dans laquelle nous pouvons choisir celle qui est plus adaptée à la flottation des gros grains ou inversement des ultra-fins, ou bien plus efficace pour une flottation différentielle délicate.

Nous avons donc maintenant une bien plus grande souplesse qu'autrefois dans le procédé de flottation grâce à des machines de flottation mieux diversifiées et mieux étudiées.

4.2.4 *Simplifications.* — Pour abaisser le prix de revient on note une tendance continue à la concentration des moyens de production et à la simplification:

- Remplacement des petites unités de productions dispersées par des unités plus grosses ou centralisées. Ainsi une société internationale qui possédait 34 laveries en fonctionnement en 1960 les a réduites au nombre de 14 en 1972, tout en assurant un tonnage de minerais traité supérieur de 40%.
- Simplification des schémas de traitement: Ainsi les schémas de traitements mixtes gravimétrie-flottation sont abandonnés peu à peu au profit de la flottation intégrale malgré la productivité élevée acquise dans certains procédés physiques. Les complications introduites par le traitement de fractions granulométriques différentes, par la nécessité de stockages intermédiaires etc... entraînent une augmentation des frais de surveillance et une plus grande difficulté d'automatisation. De même on note une tendance croissante à l'utilisation de circuits de flottation simples sans retours voire avec des relavages en circuit ouvert. La mise au point de l'automatisation en flottation sera plus facile à réaliser sur des circuits simples sans charges circulantes.
- Simplification des formules des réactifs: Une trop grande variété de réactifs conduit le plus souvent

à des consommations excessives, voire inutiles de certains d'entre eux car les laveries ne possèdent pas encore les capteurs qui permettraient d'optimiser les doses.

C'est pourquoi ces dernières années, des recherches ont été faites pour la mise au point d'électrodes de mesure du sulfure de soude et du xanthate dans la pulpe, afin d'essayer de réduire les consommations de ces deux réactifs qui interviennent de façon sensible dans le prix de revient du traitement des minerais oxydés.

La simplification du nombre de réactifs dans les formules de flottation résulte d'une meilleure connaissance de l'action de ceux-ci, et de la mise sur le marché de réactifs plus sélectifs. Cette simplification conduit à une économie importante de personnel à l'atelier de préparation.

4.2.5 *Contrôle et automatisation des laveries.* — Un des objectifs importants dans les recherches de nouveaux appareils a été la *compacité* sans perte de *flexibilité*. La nécessité de réaliser des économies sur les coûts opératoires impose des contraintes considérables sur le coût des investissements des nouvelles laveries. C'est le cas des appareils de contrôle, sans parler des appareils d'automatisation qui sont à l'étude.

Parallèlement aux améliorations dans la conception des machines la mise au point de techniques de régulation et des instruments de mesure contribue également à l'augmentation des rendements métal.

Maintenant dans toute laverie moderne il y a des appareils de contrôle, voire de véritables tours de contrôle installées au centre de la laverie, et qui sont les postes de pilotage de ces usines géantes.

Le problème principal auquel la régulation se heurte est la variation des teneurs et de la dimension de broyage du minerai entrant dans le circuit.

On cherche la solution à ce problème:

- par une coordination plus étroite entre la mine et l'usine, les mélanges se faisant à l'avance à la laverie des données précises sur les teneurs et la dureté du minerai.
- par un stockage d'homogénéisation entre la mine et l'usine, mais cette solution est souvent trop onéreuse.
- par une automatisation des circuits (notamment des circuits de broyage) ou l'introduction de boucles de contrôle à l'intérieur même de l'atelier de flottation.

Ces dernières années sont apparus notamment des appareils de mesures en continu, directement sur de la pulpe, pour contrôler les teneurs, la granularité, la densité de pulpe. Ces appareils vont faciliter beaucoup le perfectionnement et l'extension du procédé de flottation en le rendant encore plus fiable, plus souple, plus économique, plus performant.

Enfin d'après les études statistiques qui ont été faites sur des usines similaires installées dans différentes parties du monde, on a constaté que l'utilisation d'un personnel moins nombreux mais plus qualifié aboutissait à un abaissement sensible du prix de revient.

Les minéralurgistes ont une responsabilité accrue, d'abord

losqu'ils doivent faire l'extrapolation industrielle à des usines de plus de 10.000 t/jour, de schémas de traitements basés sur les résultats d'essais de laboratoire, ensuite dans la conduite de ces usines géantes où le moindre écart par rapport aux normes fixées et où la moindre erreur sont catastrophiques sur le prix de revient.

## V. CONCLUSIONS

En conclusion il apparaît qu'en 1972, pour traiter les matières minérales à basse teneur, à minéralisation complexe et dont la dimension de libération est de quelques centaines ou quelques dizaines de microns, le procédé de flottation, lorsqu'il est applicable, est le plus économique.

La flottation offre tous les avantages du procédé continu intégral, et présente une flexibilité remarquable qui favorise son emploi dans une industrie où les contraintes extérieures sont nombreuses et où on est sans cesse à la merci de variations imprévues dans la qualité des minerais, dans les exigences des marchés. Ainsi le procédé de flottation se plie facilement aux réglementations anti-pollution parce que les minéralurgistes se sont sans cesse préoccupés de perfectionner les séparations solides-liquides et qu'ils ont incité les fabricants à inventer des réactifs floculants synthétiques capables de réagir pratiquement dans tout les milieux.

Le procédé de flottation est parvenu à un palier de maturité pour le traitement de nombreux minéraux, en particulier pour le traitement de minerais sulfurés simples. Certes des perfectionnements sont encore possibles pour augmenter davantage la souplesse du procédé de flottation par l'acceptation, sans perte de rendement, de plus larges variations de teneurs, de granulométrie, de densité, ou au contraire par une spécialisation plus poussée de certains appareils ou de certains réactifs pour réaliser des séparations encore plus sélectives et des rendements plus élevés dans certaines fractions.

La révolution en flottation de la décennie a été la percée (breakthrough) des cellules de flottation de grande dimension et cette évolution n'est pas terminée.

Dans la prochaine décennie la révolution viendra des capteurs qui doivent encore se perfectionner pour être totalement fiables dans les mesures en continu des teneurs, des débits, des densités, de la granularité, etc... Lorsque les modèles mathématiques des différentes opérations de traitement seront parfaitement établis, les capteurs accouplés aux miniordinateurs, seront des outils indispensables pour la conduite des futures laveries de flottation géantes.

Dans l'avenir le seul concurrent sérieux du procédé de flottation sera le procédé hydrométallurgique. Certes le procédé hydrométallurgique n'intervient que pour 15% dans les tonnages de minerais traités, mais des recherches actives sont menées pour trouver des solvants sélectifs et économiques du minéral à récupérer; des études importantes sont entreprises pour accélérer les vitesses d'attaque et de dissolution des minerais sulfurés, enfin la technique de lixiviation en place fait l'objet d'études systématiques pour l'amélioration de la pénétration des réactifs dans la roche. Enfin, les procédés d'extraction par solvant et les procédés d'obtention de métal pur à partir de solution se perfectionnent sans cesse, pour être des concurrents sérieux de la pyrométallurgie qui, pour survivre actuellement, doit consacrer beaucoup d'imagination et d'argent à résoudre les problèmes de pollution de l'environnement.

Dans un avenir plus lointain, c'est à dire dans les prochaines décennies, le procédé de flottation pourrait faire un nouveau bond en avant et concurrencer davantage les procédés hydrométallurgiques si une révolution intervenait dans les techniques de broyage et dans le traitement des ultra-fins.

En conclusion les chercheurs ont un rôle important à jouer, car l'évolution du procédé de flottation n'est pas terminée, et entre tous les procédés de concentration, il reste le plus séduisant pour ses possibilités.