REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE CHIKH LARBI TEBESSI – TEBESSA

INSTITUT DES MINES
DEPARTEMENT DES MINES ET DE LA GEOTECHNOLOGIE

Polycopié de Cours

Séparation Magnétique & Electrostatique

Par : Dr. Mohammed LARABA

2023

AVANT-PROPOS

Ce polycopié pédagogique est destiné aux étudiants de première année Master, spécialisés en valorisation des ressources minérales à l'Institut des Mines de l'Université de Tébessa. Il regroupe un ensemble de connaissances pertinentes liées à la séparation magnétique et électrostatique.

Le présent document est divisé en cinq chapitres distincts. Le premier chapitre aborde les rappels des principes physiques et bases théoriques de la séparation magnétique. Le deuxième chapitre est consacré à la séparation magnétique à basse intensité, tandis que le troisième chapitre traite de la séparation magnétique à haute intensité. Le quatrième chapitre se concentre sur la séparation à haut gradient, et enfin, le cinquième chapitre aborde la séparation électrostatique.

En fin de cette polycopie, une bibliographie exhaustive est présentée, fournissant des références complémentaires pour approfondir les connaissances sur le sujet de la séparation magnétique.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I : RAPPELS DES PRINCIPES PHYSIQUES ET BASES THEORIQUES DE LA SEPARATION MAGNETIQUE……...5
I.1 Propriétés magnétiques de la matière ……..…5
1.1.1 Unités magnétiques ……..…5
1.1.2 Lois magnétiques et classification des corps ……..5
1.1.3 Classification magnétique des orps……7
I.1.3.1 Le ferrimagnétisme (corps ferrimagnétiques).....7
I.1.3.2 L'antiferromagnétisme (corps antiferromagnétiques)……..…….7
I.1.3.3 Le ferromagnétisme (corps ferromagnétiques)……...….8
I.1.3.4 La susceptibilité magnétique ……...8
1.2 Bases théoriques de la séparation magnétique……..……..10
1.3 Systèmes magnétiques et classification des séparateurs……...…..12
1.3.1 Sources de champs magnétiques……..…..…12
1.3.2 Classification des séparateurs……...…13

CHAPITRE II : SEPARATION MAGNETIQUE A BASSE INTENSITE (SMBI)……16
Introduction……...16
II.1 Séparateurs en voie sèche……..16
II.1.1 Déferrailleurs……...16
II.1.2 Séparateurs à tambour et centrifuge……19
II.2 Séparateurs en voie humide……..……..22
II.2.1 Les séparateurs à courant parallèle……..22
II.2.2 Les séparateurs à contre-rotation…….23
II.2.3 Les séparateurs à contre-courant\.....23

CHAPITRE III : SEPARATION MAGNETIQUE A HAUTE INTENSITE (SMHI)….24
Introduction ……..…….24
III.1 Séparateurs à circuits conventionnels (électroaimants)……24
III.1.1 Séparateurs en voie sèche……...……24
III.1.1.1 Séparateurs travaillant par extraction……...…..……..*25*
III.1.1.2 Séparateurs travaillant par déviation……...……27
III.1.2 Séparateurs en voie humide……...…30
III.1.2.1 Généralités……...30
III.1.2.2 Séparateur de type Jones……32
III.1.2.3 Séparateur Boxmag Rapid……..35
III.2 Séparateurs à aimants permanents en céramique…….……37
III.2.1 Généralités…….……..…37
III.2.2 Séparateurs à tambour ou rouleau.…….……39
III.2.3 Séparateurs de type *Permroll*……40

CHAPITRE IV : SEPARATION MAGNETIQUE A HAUT GRADIENT DE CHAMP (SMHG) ET/OU A HAUT CHAMP……..44
Introduction ……..44
IV. 1. Présentation générale……..44
IV. 2. Matrices et capacité d'un séparateur à haut gradient…….…….45
IV. 2.1 Les matrices……..……45
IV. 2.2 Capacité d'un séparateur SMHG…….…….49
IV. 3 Séparateurs à haut gradient……..……54
IV.3.1 Séparateurs cycliques…….……54
IV. 3.2 Séparateurs à fonctionnement continu……..55
IV.4. Séparateurs à haut gradient et à haut champ à bobine supraconductrice…….……56
IV. 4.1 Généralités…….56
IV. 4.2 Séparateurs à matrice d'extraction…….58
IV.4.3 Séparateurs à tambour…….……58
IV.4.4 Séparateurs magnétiques à gradient ouvert (SMGO)……...……..60
IV. 5. Principaux domaines d'application de la SMHG……...……61

CHAPITRE V : LA SEPARATION ELECTROSTATIQUE……..……..63
Introduction …….……..…..63
V.1 Mécanisme de bombardement ionique (charge par corona)……..64
V.2 Mécanisme d'induction conductrice…….…..68
V.3 Mécanisme de chargement triboélectrique…….……70
V.3.1 Séparateur à Double Tambour…….……..74
V.3.2 Séparateur Tribo-Électrostatique Rotatif……...75
V.3.3 Séparateur à courroie triboélectrique……76
Références……...…….79

INTRODUCTION

La séparation magnétique est une méthode de séparation utilisée pour séparer les substances magnétiques des substances non magnétiques dans un mélange. Elle exploite les propriétés magnétiques des matériaux pour les séparer en fonction de leur réponse à un champ magnétique.

Le processus de séparation magnétique implique généralement l'utilisation d'un aimant ou d'un système magnétique pour générer un champ magnétique. Ce champ magnétique attire les particules magnétiques présentes dans le mélange, les séparant ainsi des autres particules non magnétiques.

La séparation magnétique est couramment utilisée dans de nombreux domaines tels que l'industrie minière, le recyclage, la médecine et la recherche scientifique. Dans l'industrie minière, elle est utilisée pour extraire et concentrer les minéraux magnétiques des minerais bruts. Dans le recyclage, elle permet de récupérer les métaux ferreux et non ferreux présents dans les déchets solides.

Différentes techniques de séparation magnétique sont utilisées en fonction des caractéristiques des matériaux à séparer. On distingue notamment la séparation à basse intensité, à haute intensité, à haut gradient et la séparation électrostatique. Chaque technique présente des avantages et des limitations spécifiques en termes d'efficacité de séparation et d'applications pratiques.

La séparation magnétique est une méthode de séparation non destructive et relativement simple à mettre en œuvre. Elle offre des avantages tels que la sélectivité, l'efficacité et la récupération élevée des matériaux magnétiques. Cependant, elle dépend fortement des propriétés magnétiques des matériaux à séparer, ce qui peut limiter son utilisation dans certains cas.

En conclusion, la séparation magnétique est une technique polyvalente et largement utilisée pour la séparation des substances magnétiques des matériaux non magnétiques. Elle joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels et scientifiques, contribuant à l'amélioration de la production, à la préservation des ressources et à la recherche fondamentale sur les matériaux.

La suite de cette polycopie vous guidera à travers ces différents chapitres, en fournissant des connaissances détaillées, des exemples concrets et des références bibliographiques pour approfondir vos connaissances dans le domaine de la séparation magnétique et électrostatique.

CHAPITRE I : RAPPELS DES PRINCIPES PHYSIQUES ET BASES THEORIQUES DE LA SEPARATION MAGNETIQUE

1.1 Propriétés magnétiques de la matière

1.1.1 Unités magnétiques

Les unités utilisées dans ce chapitre sont les **unités du système international SI.** Si bien que beaucoup d'articles ou de fiches techniques sur l'application du magnétisme font encore appel au **système électromagnétique CGS** uém. Le tableau I.1donne les principales unités magnétiques ainsi que les facteurs de conversion pour passer du système CGS au système SI.

1.1.2 Lois magnétiques et classification des corps

Pour décrire une excitation magnétique, deux caractères différents sont utilisés : le champ magnétique $\vec{H}$ et l'induction magnétique $\vec{B}$ qui, dans le vide, ne sont pas indépendantes mais liées par l'équation :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad (1)$$

Avec : μ_0 perméabilité du vide égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$ $H.m^{-1}$

Induction magnétique, est un phénomène physique qui se manifeste par la production d'une différence de potentiel électrique aux bornes d'un conducteur électrique ou encore d'un courant électrique en son sein.

Dans un milieu aimanté, il n'y a plus de proportionnalité entre $\vec{H}$ et $\vec{B}$ et l'induction du champ magnétique résultant est la somme de l'induction du champ magnétique extérieur et de l'induction du champ magnétique intérieur liée aux propriétés essentielles de la matière, c'est-à-dire son aimantation $\vec{M}$ ou sa polarisation magnétique : $\vec{J} = \mu_0 \vec{M}$.

Tableau I.1 Unités magnétiques et facteurs de conversion

Variable	Unité uém	Unité SI	Facteur de Conversion
Intensité du champ magnétique, *H*	Oersted	Ampere/meter	$103/4\pi$
Induction magnétique, *B*	Gauss	Weber/m^2 (Tesla)	10^{-4}
polarisation magnétique, *J*	uém	Weber/m^2 (Tesla)	$4 .10^{-4}$
Moment magnétique, *m*	uém	Weber	$4 .10^{-8}$
Aimantation, *M*	uém · cm^3	(A · m^2)	10^3
Flux magnétique	Maxwell	Weber	10^{-8}
Perméabilité magnétique, μ	nombre	Henry/mètre(H/m)	10^3
Perméabilité du vide, μ_0	nombre	Henry/mètre(H/m)	$4\pi \times 10^{-7}$
Perméabilité relative ; $\mu_r = \mu / \mu_0$	nombre	nombre	$4\pi \times 10^{-7}$
Susceptibilité mag. spécifique	cm^3/g	(m^3/kg)	$4\pi \times 10^{-3}$
Susceptibilité magnétique, κ	nombre	nombre	4π

L'induction magnétique s'écrit alors :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} \text{ ou } \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

Quand une matière est soumise à l'influence d'une induction magnétique $\vec{B}$, chaque élément de volume dV acquiert un moment magnétique $\vec{m} = \vec{M}\, dV$. On dit alors que la matière s'aimante et que, d'une manière générale, cette aimantation $\vec{M}$ est proportionnelle à la valeur du champ magnétique $\vec{H}$:

$$\vec{M} = \kappa \vec{H}$$

Avec :

κ : Susceptibilité magnétique de la matière considérée (notée aussi χ dans la littérature).

La susceptibilité magnétique peut être exprimée par rapport à l'unité de masse ; on parle alors de susceptibilité magnétique massique ou spécifique $\chi = \kappa/\rho$; avec ρ masse volumique du corps considéré).

En fait, la polarisation magnétique $\vec{J}$ (ou l'aimantation $\vec{M}$) dépend également de la forme de la particule placée dans le champ magnétique extérieur et peut s'écrire :

$$\vec{J} = \frac{\kappa}{1 - D\kappa} \mu_0 \vec{H} \qquad \textbf{(1)}$$

Avec :

D : facteur de démagnétisation ($0 < D < 1$; $D = 1/3$ pour une particule sphérique).

La relation de l'induction magnétique peut également se mettre sous la forme générale :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (1 + \kappa)$$

Ce qui permet de définir la perméabilité relative :

$$\mu_r = 1 + \kappa = \mu/\mu_0 \qquad \textbf{(I.2)}$$

Avec :

μ: perméabilité du milieu. $\mu = \vec{B}/\vec{H}$

La perméabilité relative dans l'espace de séparation (air ou eau) d'un séparateur magnétique étant très voisine de 1, la source de champ magnétique peut être caractérisée indifféremment par les valeurs de H (en A/m) ou de B (en T).

I.1.3 Classification magnétique des corps

Tous les matériaux sont affectés d'une certaine manière lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique, bien que dans de nombreuses substances, l'effet soit trop faible pour être facilement détecté. Dans le cadre du traitement des minéraux, les matériaux peuvent être classés en deux groupes principaux, en fonction de s'ils sont attirés ou repoussés par un aimant. Les corps Paramagnétiques cependant, ne formez pas de groupe homogenèses et peut être divisé en: paramagnétiques authentique, ferromagnétiques, ferrimagnétiques et antiferromagnétiques (Fig. 01).

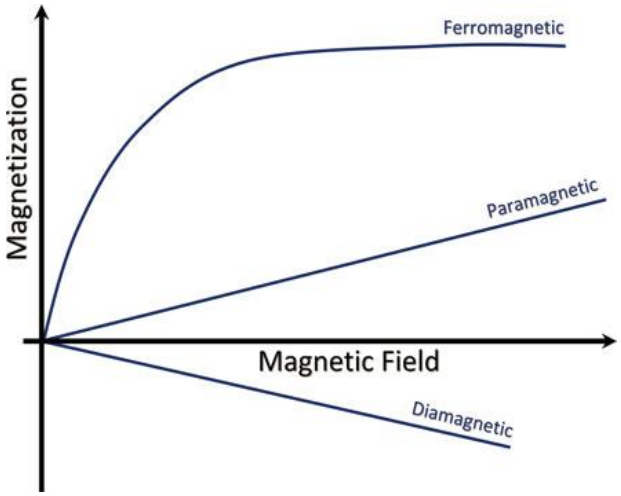


Figure 1 : Courbes d'aimantation de différents matériaux

I.1.3.1 Le ferrimagnétisme (corps ferrimagnétiques) est une propriété magnétique de certains corps solides. Dans un matériau ferrimagnétique, les moments magnétiques sont antiparallèles mais d'amplitude différente (Figure 2-c). Il en résulte une aimantation spontanée du matériau.

Il se distingue donc à la fois de l'antiferromagnétisme, pour lequel le moment magnétique résultant est nul, et du ferromagnétisme pour lequel l'aimantation spontanée résulte au niveau microscopique d'un arrangement parallèle des moments magnétiques. Le nom de cette propriété est tiré de celle des ferrites. Son explication théorique nécessite la prise en compte de l'interaction d'échange entre moments magnétiques voisins

I.1.3.2 L'antiferromagnétisme (corps antiferromagnétiques) est une propriété de certains milieux magnétiques, les électrons responsables du magnétisme ne participant pas à la conduction électronique. Il est également possible d'observer un état analogue à l'antiferromagnétisme avec des électrons itinérants, on parle alors d'onde de densité de spin (Figure 2-b). Dans un milieu antiferromagnétique, les interactions d'échange entre les spins électroniques localisés tendent à aligner les spins plus proches voisins dans la même direction mais avec des orientations opposées. De nombreux oxydes et halogénures de métaux de transition sont antiferromagnétiques. Il existe également des solides organiques qui sont antiferromagnétiques. Contrairement au cas du ferromagnétisme, l'état fondamental d'un

système antiferromagnétique dépend de sa dimensionnalité, du spin total des moments magnétiques électroniques, et de l'existence de frustration géométrique.

I.1.3.3 Le ferromagnétisme (corps ferromagnétiques) est la propriété qu'ont certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et pour certains (les aimants, matériaux magnétiques durs) de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur. Cette propriété résulte du couplage collectif des spins entre centres métalliques d'un matériau ou d'un complexe de métaux de transition, les moments de tous les spins étant orientés de la même façon (Figure 2-a).

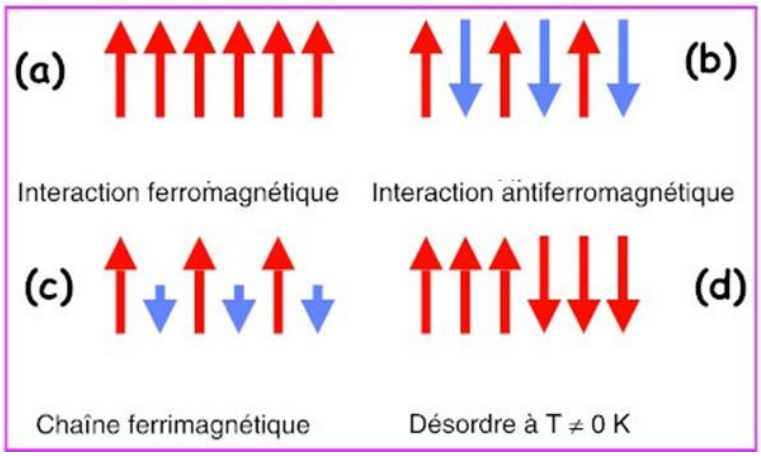


Figure 2 : Structure schématique de spins des chaînes magnétiques

I.1.3.4 La susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique est une mesure de la réponse d'un matériau à un champ magnétique externe. Elle indique dans quelle mesure un matériau peut être magnétisé en présence d'un champ magnétique.

La valeur de la Susceptibilités peut varier en fonction des impuretés ou des modifications du réseau cristallin. Les substances antiferromagnétiques comme la sidérose $FeCO_3$, ou comme divers oxydes, MnO, NiO, Cr_2O_3 par exemple, se comportent macroscopiquement, à température ambiante, comme des corps paramagnétiques.

Pour les corps ferromagnétiques et les corps ferrimagnétiques, l'aimantation est une fonction très complexe de la température (figure 3), du champ magnétique appliqué et de l'aimantation antérieure. Ces éléments, comme le fer, le nickel et le cobalt, sont caractérisés par une courbe d'aimantation et de désaimantation hystérésis (**cycle d'hystérésis)** : Propriété des substances ferromagnétiques, pour lesquelles l'induction dépend à la fois du champ magnétisant actuel et des états magnétiques antérieurs dont les points principaux sont l'aimantation à saturation *M*s et l'aimantation rémanente ***Mr*** , qui subsistent en l'absence de champ magnétique, et le champ magnétique coercitif ***Hc*** , qui annule l'aimantation (figure 4).

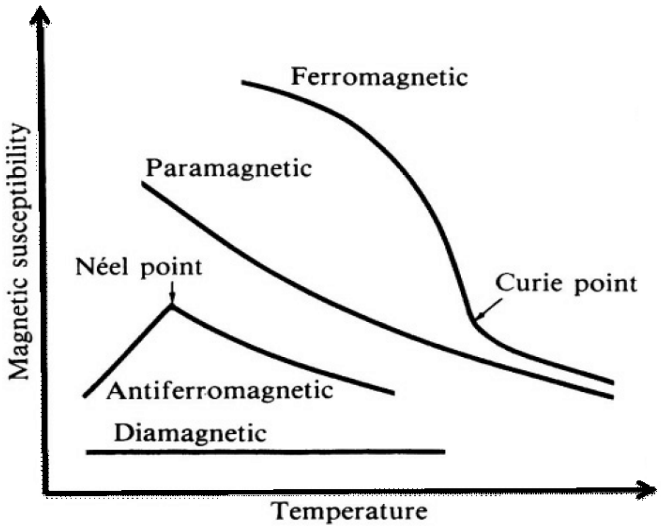


Figure I. 3: Comportement en température de différentes classes de matériaux magnétiques

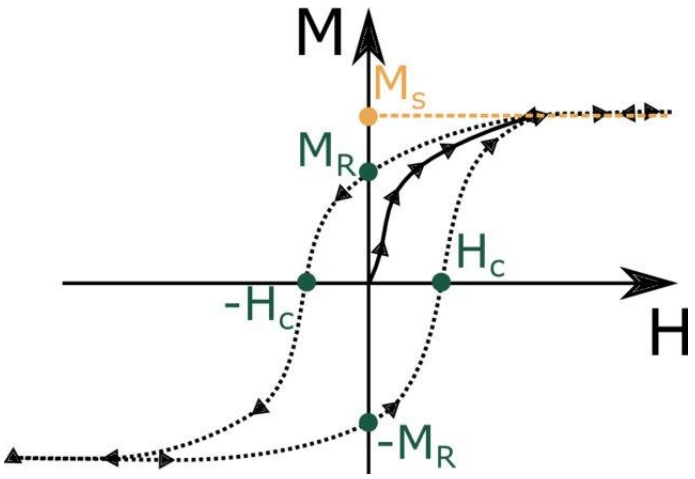


Figure I. 4 : Courbe d'aimantation (cycle d'hystérésis) d'un matériau ferromagnétique (en pointillés). Allure de la courbe M(H) pour un matériau initialement désaimanté (ou courbe de première aimantation) en ligne continue. Différentes grandeurs caractérisent un système magnétique : l'aimantation à saturation Ms , le champ coercitif Hc et l'aimantation rémanente Mr.

Pour des éléments paramagnétiques, une bonne précision de la susceptibilité magnétique peut être obtenue par le calcul à partir de l'expression de la susceptibilité magnétique molaire (en $m^3 \cdot kmol^{-1}$).

$$\chi_M = \mu_0 N_A \eta^2_B \mu^2_B / 3kT = 1{,}5714.\ 10^{-3}\ \eta^2_B / T$$

Avec ;

K : constante de Boltzmann (= $1{,}380.10^{-23}\ J \cdot K^{-1}$),

T : température absolue,

N_A : constante d'Avogadro (= 6,022.10^{26} k mol^{-1}),
μ_B : magnéton de Bohr (= 9,274.10^{-24} A · m^2),
η_B : nombre effectif de magnétons de Bohr (donné par les tables de constantes).

Il est parfois plus aisé de calculer la susceptibilité magnétique spécifique du minéral par l'**analyse chimique.**

$$\chi = 15.714 \,.\, 10^{-6}\ T^{-1}\ \left(\sum_i (\eta^2_{Bi}\, X_i\, A_i^{-1}\right)$$

Avec;

η_{Bi} : nombre effectif de magnétons de Bohr ;
X_i : pourcentage massique ;
A_i : masse atomique de l'ion paramagnétique *i.*

1.2 Bases théoriques de la séparation magnétique

Un Séparateur magnétique est un appareil qui modifie les caractéristiques du champ magnétique dans l'espace de traitement. Il engendre en particulier un champ magnétique agissant de façon sélective sur les corps qui présentent la plus grande aptitude à l'aimantation. Dans les opérations de tri magnétique (concentration ou épuration), la séparation est obtenue en appliquant à toutes les particules contenues dans un mélange une force magnétique d'expression générale (**N**) :

$$\overrightarrow{Fm} = \frac{1}{2}\,\mu_0 Vp\,\left(\kappa \frac{\kappa}{1 + D\kappa p} - \kappa_F\right) grad\,(H^2)$$

Avec :

D : coefficient de démagnétisation des particules ;
*V*p ,kρ : volume et susceptibilité magnétique du corps considéré ;
Kf : susceptibilité magnétique du fluide (air ou eau).

En plus de cette force d'attraction qui agit sur les particules magnétiques s'applique, à toutes les particules magnétiques ou non, une combinaison de forces agissant dans différentes directions et dont les plus fréquemment rencontrées sont :

- la force de gravité (N):

$$\overrightarrow{Fg} = \frac{4}{3}\,\pi\,(\,\rho_p - \rho_f\,) R_p^3\,\vec{g}$$

- la force centrifuge (N):

$$\overrightarrow{Fc} = \rho_p\, V_p\, \omega^2\, R$$

- la force d'entraînement par le fluide (N):

$$\overrightarrow{F_f} = 6\pi\,\eta\,R_p\,(\overrightarrow{Vf} - \overrightarrow{Vp})$$

Avec :

R rayon du tambour (ou cylindre) de séparation
Rp rayon de la particule
$\overrightarrow{g}$ Accélération due à la pesanteur,
$\overrightarrow{Vp}$ **et** $\overrightarrow{Vf}$ vitesses de la particule et du fluide,
ω vitesse angulaire de la particule,
ρ_p **et** ρ_f : masses volumiques de la particule et du fluide,
η viscosité dynamique du fluide.

Pour que la séparation ait lieu, il est nécessaire que la valeur de la force magnétique soit supérieure à la somme des forces antagonistes développées par le système et des forces interparticules (figure I.5).

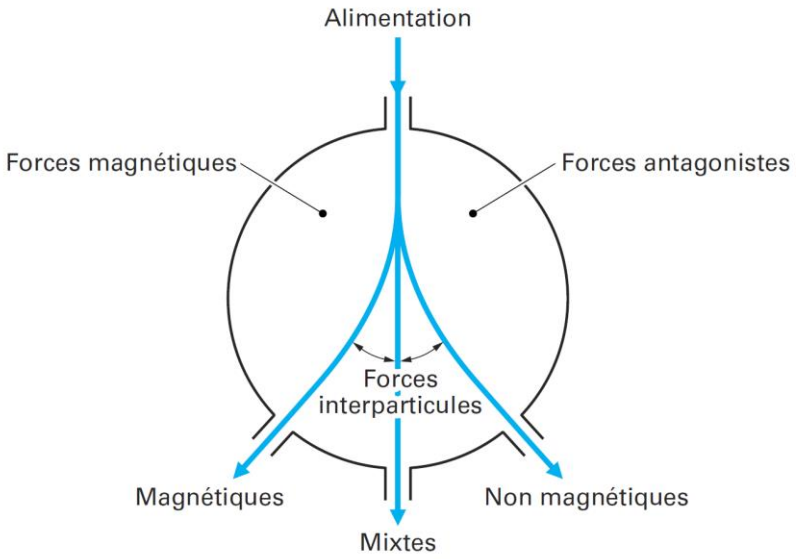


Figure I.5 : Schéma de principe de séparation

La valeur du facteur de démagnétisation *D* dépend de la forme du corps et varie entre 0 et 1 (de 0 à 4π en unités CGS uém). Les valeurs de κ_f sont très faibles ($0{,}4\times10^{-6}$ pour l'air et $-\,9{,}0\times10^{-6}$ pour l'eau) et peuvent être négligées. Cela permet de simplifier l'expression de $\overrightarrow{Fm}$ en considérant trois cas particuliers :

- **corps faiblement magnétiques** pour lesquels $\kappa_p < 1$; on a :

$$\overrightarrow{Fm} = \frac{1}{2}\,\mu_0 \kappa p\, Vp\, grad\,(H^2)$$

- **corps fortement magnétiques** pour lesquels $\kappa_p \approx \mu r$ (>1) ;

$$\overrightarrow{Fm} = \frac{1}{2}\,\mu_0 \kappa p\, Vp\, grad\,(H^2)$$

d'après la relation (1) et $\vec{J} = \mu_0\,\overrightarrow{M}, \overrightarrow{M} \approx D - 1\ \overrightarrow{H}$ et on peut écrire :

$$\overrightarrow{Fm} = \mu_0\, Vp\, D - 1\, grad\,(H^2) \text{ pour } H \leq \text{DMsat}$$

$$\overrightarrow{Fm} = \mu_0 V_p \overrightarrow{M}_{sat} \,.\, \overrightarrow{\nabla}(H) pour\ H > DM_{sat}$$

- **particules mixtes**: la description du comportement de telles particules est complexe et, dans la plupart des cas pratiques rencontrés, les expressions précédentes peuvent être utilisées en fonction du degré de mixité des éléments. Dans les cas de mixité ferromagnétique importante, il est préférable d'exprimer la force magnétique en fonction de l'aimantation spécifique M′ (M′=M/ρ_p) à saturation et de la masse ***m*** de la particule :

$$\overrightarrow{Fm} = \mu_0 m\, \overrightarrow{M'}_{sat}\, \overrightarrow{\nabla}(H)$$

Avec:

M_{sat} animation à la saturation ;

1.3 Systèmes magnétiques et classification des séparateurs

1.3.1 Sources de champs magnétiques

L'organe essentiel d'un séparateur magnétique est la source de champ magnétique à l'origine de la force utilisée pour la séparation; trois dispositifs peuvent être employés : des aimants permanents, des électroaimants (circuits magnétiques conventionnels) ou des solénoïdes (bobines en cuivre ou supraconductrices).

- Les **aimants permanents** sont des matériaux caractérisés par une induction magnétique rémanente *B*r les rendant aptes à créer un champ magnétique sans dépense d'énergie. Les matériaux à aimants permanents sont nombreux (*Remalloy, Vicalloy, Alnico,* ferrites), mais les aimants les plus couramment utilisés actuellement sont constitués d'alliages céramiques de type Co_5RE (où RE est un élément de terres rares : Sm, Sr, Ce, Nd, etc.) ou fer-néodyme (Fe-Nd) dont les intensités de champ magnétique peuvent atteindre 1 200 kA/m et la valeur de rad (H^2) $1{,}3\times10^{17} A^2/m^3$. Dans les séparateurs magnétiques, les aimants permanents peuvent être montés avec pièces polaires (*H*> 800 kA/m). Sans pièces polaires, les lignes de champ magnétique se propagent loin dans l'espace (champ magnétique profond) et les valeurs maximales du champ magnétique ne dépassent pas 200 kA/m.

- L'**électroaimant** ou **circuit magnétique conventionnel**, quant à lui, est composé d'une ou de deux bobines en cuivre résistif entourant un noyau de fer doux (μr=*B*/μ0*H*

très élevé). Ces systèmes magnétiques conventionnels sont capables de créer un champ magnétique d'environ 1 600 kA/m.

- Le **solénoïde** est une bobine d'induction constituée d'enroulements de fils conducteurs en cuivre résistif ou en alliage supraconducteur (Nb-Ti). Le solénoïde présente l'avantage d'effectuer la séparation à l'intérieur même de la bobine d'induction et peut générer sans difficulté un champ magnétique de plus de 4 000 kA/m.

Les aimants permanents (céramiques) sont employés dans le domaine de la séparation à basse intensité, mais aussi de plus en plus dans le domaine de la haute intensité, car la consommation d'énergie est quasi nulle. Les électroaimants et les solénoïdes offrent une grande souplesse de réglage mais consomment de l'énergie et demandent parfois à avoir une forte puissance installée avec un redresseur et un stabilisateur de courant ainsi que des systèmes de refroidissement en eau désionisée (pour les bobines en cuivre). Les bobines supraconductrices présentent l'avantage de développer un champ magnétique élevé avec une consommation d'énergie électrique quasi nulle. Ces systèmes offrent donc l'avantage d'une puissance électrique nécessaire réduite et d'une réduction de poids et de volume (suppression du circuit de fermeture du champ magnétique en fer doux). Les problèmes d'utilisation ne sont pas techniques mais surtout économiques, en fonction de la politique choisie pour le maintien de la bobine à une température de 4 K (consommation d'hélium liquide, coût de réfrigération.

1.3.2 Classification des séparateurs

En séparation magnétique, de nombreux appareils sont disponibles chez les constructeurs et leur description ne peut se faire sans une classification. Plusieurs critères de classement peuvent être utilisés : l'intensité du champ magnétique, le milieu de séparation (eau ou air), le mode de fonctionnement (extraction ou déviation), le générateur de champ magnétique, etc.
Les relations de la force magnétique montrent que cette dernière dépend de deux facteurs principaux :

- la matière (ou la particule) par sa susceptibilité magnétique et son volume ;
- le séparateur magnétique, par le produit μ_0 **grad** (H^2)**,** c'est-à-dire par la forme de son champ magnétique.

Les séparateurs magnétiques peuvent donc se classer en trois grandes familles (tableau I.2) :

- les séparateurs à **basse intensité** (aimant permanent) avec :

$$\mu_0 \ \mathbf{grad}\ (H^2) \approx 2 \cdot 10^4 \text{ à } 10^6 \ N/m^3$$

- les séparateurs à **haute intensité** (électroaimant ou aimant permanent en céramique) avec :

$$\mu_0 \ \mathbf{grad}\ (H^2) \approx 2 \,.\, 10^7 \text{ à } 10^9 \ \mathrm{N/m^3}$$

- les séparateurs à **haut gradient et/ou haut champ** (solénoïde) avec :

$$\mu_0 \ \mathbf{grad}\ (H^2) \approx 2 \,.\, 10^{10} \text{ à } 10^{12} \ \mathrm{N/m^3}$$

Cette classification peut présenter certains défauts, mais à notre sens, elle est la mieux adaptée pour répondre aux questions de l'ingénieur à la recherche d'un appareil destiné au traitement d'un produit donné caractérisé par ses propriétés magnétiques et sa granulométrie (dimension maximale du grain).

Pratiquement, les séparateurs magnétiques à basse intensité ne peuvent convenir que pour les traitements (concentration ou épuration) de produits fortement magnétiques (ferromagnétiques ou ferrimagnétiques) alors que les particules faiblement magnétiques (paramagnétiques) ne peuvent être traitées (en fonction de leur taille) que par des séparateurs à haute intensité ou à haut gradient. Les séparateurs à haut gradient (bobines en cuivre ou supraconductrices) sont mieux adaptés aux traitements d'épuration de particules ultrafines contenues dans une dispersion solide ou un fluide. Chacune de ces familles est subdivisée en séparateurs travaillant en **voie sèche** ou en **voie humide** (en pulpe minérale), les premiers étant réservés en général aux traitements de produits grossiers (granulométrie de l'ordre du centimètre à quelques millimètres), les seconds de produits plus fins (granulométrie inférieure à 1mm).

Nota :

- Les **débits** sont donnés en tonnes de produit traité par heure (t/h) ou en tonnes par heure et par mètre de largeur utile ($t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$). La **largeur utile** est la largeur de la zone de séparation (longueur du tambour ou du rotor, largeur de la bande, etc.).
- La **capacité** d'un séparateur représente le débit maximal de produit traité. Par exemple, un séparateur peut avoir une capacité de 120 t /h mais ne fonctionner qu'à un débit de 100 t/h.

Tableau I.2 : Différents types de séparateurs magnétiques

Appareils	**Générateurs**	**Dimension de traitement** (mm)	**Capacité** (t/h)	**Grad(H^2)** ($N \cdot m^{-3}$)
Basse intensité	aimant permanent	0,5 à 20	20 à 300	2 . 10 4 à 106
Séparateur à bande		10	60	$5 . 10^4$
Séparateur à tambour				
-voie sèche		20	300	$2. 10^6$
- voie humide		5	150	$2 . 10^5$
Haute intensité	aimant permanent ou électroaimant	1 à 5	6 à 180	$2 . 10^7$ à 10^9
Séparateur à tambour	aimant permanent en céramique	5	10	$2 . 10^7$
Séparateur à rotor induit	électroaimant	3	8	$2 . 10^9$
Séparateur *Jones*	électroaimant	1	180	$4 . 10^9$
Haut gradient et Haut champ	solénoïde	0.05 à 0.1	10 à 800	$6 . 10^{10}$ à 10^{12}
	--	--	--	--
Séparateur conventionnel	bobine en cuivre	0.1	100	$6 . 10^{11}$
- discontinu	bobine en cuivre	0.1	200 à 800	$6 . 10^{11}$
- continu	bobine supraconductrice	0.05	60 à 100	$4 . 10^{12}$
Séparateur en supraconducteur				

CHAPITRE II : SEPARATION MAGNETIQUE A BASSE INTENSITE (SMBI)

Introduction

En général, les minéraux ferromagnétiques et paramagnétiques de grande taille, ayant une grande susceptibilité magnétique, sont principalement séparés par des séparateurs de faible intensité. Ces séparateurs peuvent être utilisés à la fois en mode humide et en mode sec. D'autre part, les séparateurs magnétiques à haute intensité peuvent être utilisés pour traiter des matériaux faiblement magnétiques, qu'ils soient fins ou grossiers, en mode sec ou humide. Dans le cas des minéraux fins et faiblement magnétiques, la meilleure option pour la séparation magnétique est l'utilisation de séparateurs magnétiques à gradient élevé.

II.1 Séparateurs en voie sèche

II.1.1 Déferrailleurs

Ces machines travaillent en régime automatique et continu pour éliminer ou séparer soit des éléments ferreux contenus dans des déchets métalliques, des ordures ménagères ou des scories ou sables de fonderie, soit pour enrichir des minerais ferrimagnétiques en gros morceaux. Le système magnétique peut être constitué d'aimants permanents ou d'électroaimants. Ils sont principalement de trois classes :

- **les séparateurs suspendus** (Figure II.1), à évacuation discontinue ou continue (*overband*). Ce sont des appareils très efficaces pour enlever des éléments ferreux indésirables se trouvant pris dans des charges transportées par des convoyeurs à courroie. Ils peuvent se placer en position longitudinale à la jetée du convoyeur (figure II. 2-*a*) ou en position transversale au-dessous (figure II. 2-*b*). Ces trieurs sont principalement utilisés en protection d'autres appareils (concasseurs, broyeurs, cribles, etc.) et pour les scories de la sidérurgie.



Figure II.1: Installation d'un séparateur magnétique suspendu à courroie transversale (Courtesy of Boxmag- Rapid Ltd.).

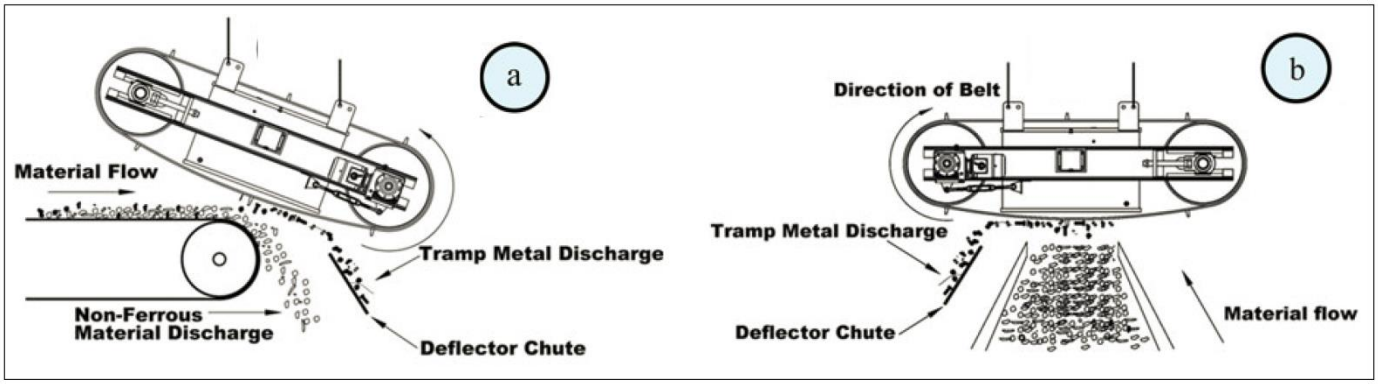


Figure II. 2 : Exemples des séparateurs suspendus

- **Les poulies magnétiques** sont des appareils qui ont la place et la fonction d'une poulie de tête d'un convoyeur à bande, mais renfermant un dispositif magnétique afin de retenir et d'évacuer les produits magnétiques. Celles-ci existent en une grande variété de puissances et de dimensions pour faire face à tous les besoins spécifiques (produits magnétiques de quelques grammes à 10 kg environ). Ces séparateurs relativement peu coûteux sont faciles à installer et peuvent éliminer en continu les débris de fer. La poulie du tapis roulant peut être remplacée par une poulie magnétique tournante, conduisant à transformer le tapis roulant en séparateur magnétique (Figure II.3).

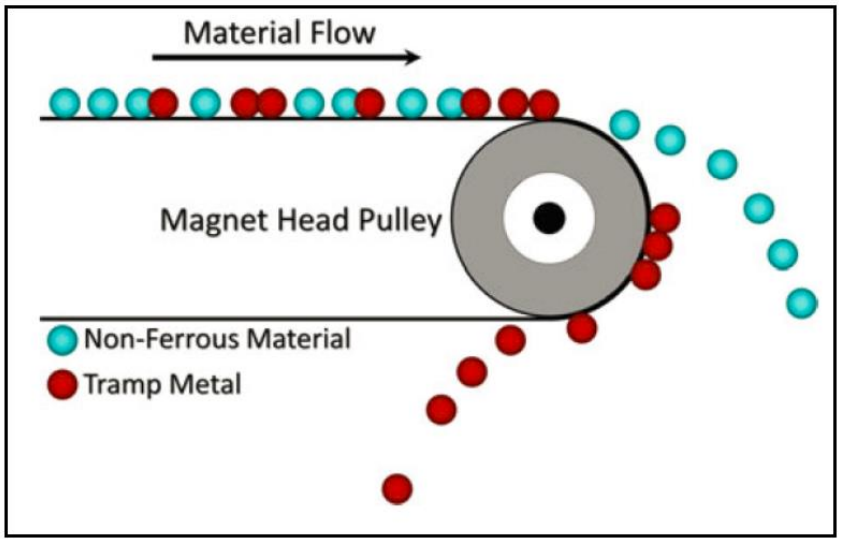


Figure II.3: Poulie magnétique (Élimination des débris de fer).

-**Les tambours déferrailleurs** sont de conception similaire à ceux utilisés pour le traitement des minerais. Ces séparateurs peuvent couvrir une large gamme de particules allant de plusieurs centimètres à plusieurs micromètres et fonctionnent à la fois en mode humide et sec. Les appareils sont généralement alimentés par-dessous du tambour pour des opérations de concentration haute teneur (fonctionnement par extraction) (figure II.4-a), ou par le haut dans les opérations de préconcentration (récupération élevée) (figure II. 4- b).

Suivant la conception du système magnétique, le champ magnétique peut être plus ou moins profond et d'intensité plus ou moins élevée (par exemple de 80 kA/m à 100 mm de la surface à 40 kA/m à 175 mm). Ces séparateurs peuvent être constitués de tambours en aciers spéciaux pour résister à l'usure et sont capables de traiter des produits grossiers (200 mm de dimension) à un débit de l'ordre de 200 à 300 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$.

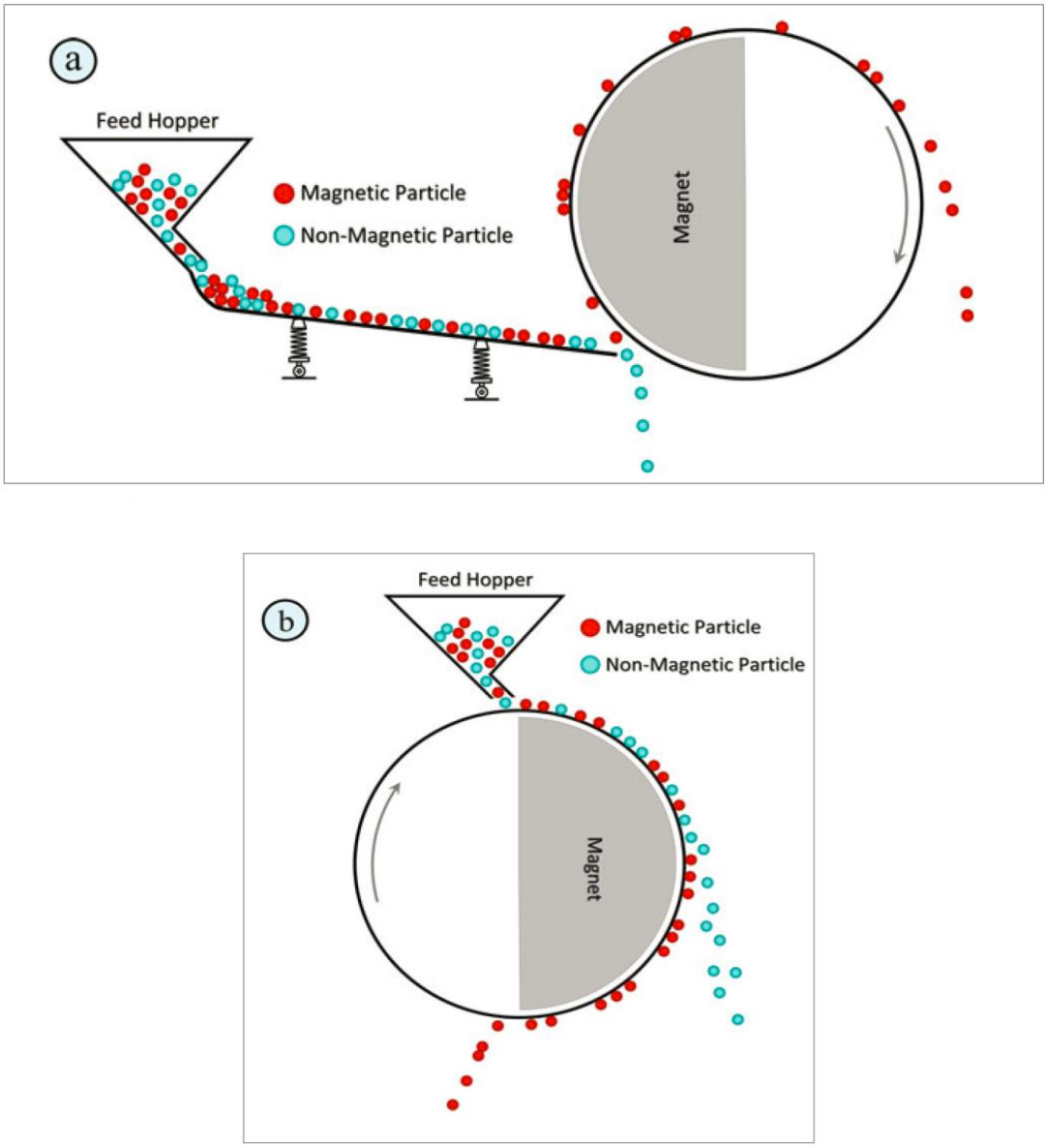


Figure II.4: Séparateurs à tambour magnétique à alimentation par-dessous du tambour (a) et à alimentation par-dessus du tambour (b)

Les tambours magnétiques sont principalement fabriqués à base d'aimants permanents. Cependant, les tambours électromagnétiques sont parfois utilisés dans des applications industrielles. Un ensemble d'aimants permanents est intégré à l'intérieur du tambour rotatif non magnétique. Sur la base de la disposition des aimants à l'intérieur du tambour, le séparateur peut être divisé en deux sous-groupes, à savoir les types à pôles radiaux et à pôles axiaux (Figure II. 5).

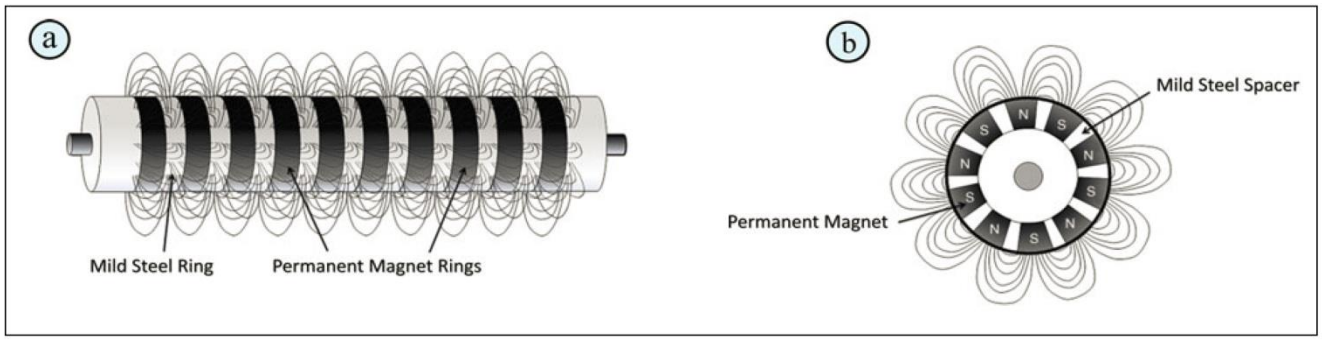
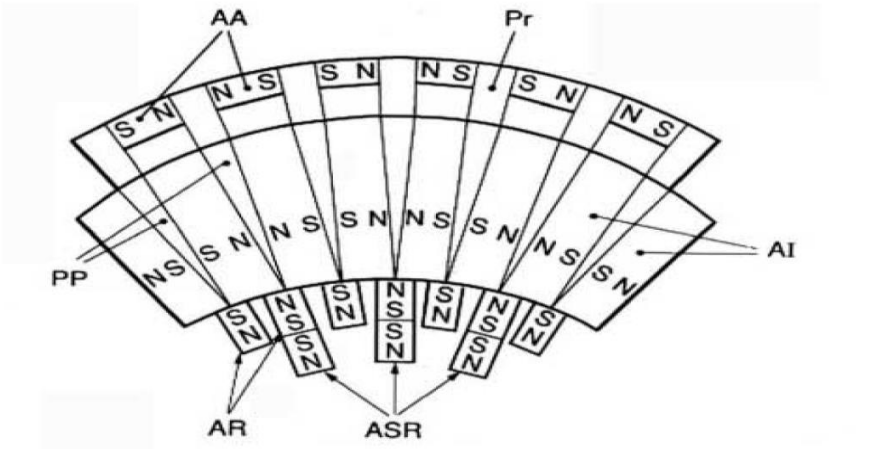


Figure II.5: Tambours magnétiques à pôle radial (a) et à pôle axial (b).

II.1.2 Séparateurs à tambour et centrifuge

Ces séparateurs sont équipés d'un tambour à l'intérieur duquel se trouve une couronne d'aimants permanents fixe (figure II. 6-*a*). Les aimants sont généralement disposés selon une structure axiale et sont espacés régulièrement avec une polarité alternée. Le minerai tout venant extrait de la mine est alimenté sur le tambour au niveau de la couronne aimantée. Les particules ferromagnétiques attirées dans le champ magnétique se collent au tambour et y adhèrent sous l'action de la force magnétique. La rotation du tambour les amène à l'arrière de celui-ci dans une zone de champ magnétique plus faible où elles sont décollées. Les particules non magnétiques sont éjectées du tambour sous l'action de la vitesse de rotation de ce dernier.

La Figure II.7 représente un Séparateurs à tambour dans une usine de recyclage (courtesy of Steinert GmbH)..



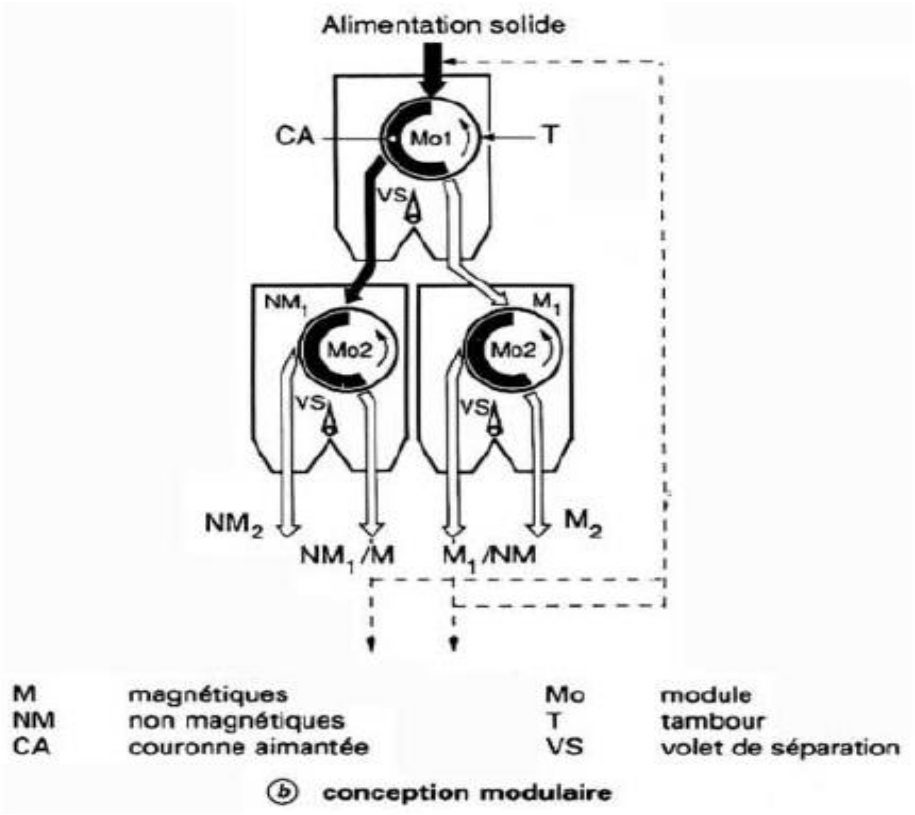


Figure II. 6 : Séparateurs à basse intensité en voie sèche à tambour centrifuge (doc. Fives-Cail-Babcock, (FCB))



Figure II.7: séparateur magnétique à tambour sec (courtesy of Steinert GmbH).

Les forces principales mises en jeu sont donc la force d'attraction magnétique et les forces de gravité et centrifuge qui tendent à détacher et à éjecter les particules. Les appareils à aimants permanents présentent l'avantage de pouvoir fonctionner en atmosphère poussiéreuse,

humide, sans risque de détérioration. Leur conception simple et robuste rend leur entretien et leur maintenance faciles.

Les performances de ces séparateurs varient avec les types d'appareils, mais également avec la vitesse de rotation du tambour, les dispositions de montage, la conception du circuit magnétique, les débits, la granulométrie et la composition minéralogique du produit à traiter. Ils sont constitués, pour la plupart, d'un tambour à axe horizontal renfermant un système magnétique immobile formant un arc de 150 à 180^{o}. Les débits sont de l'ordre de 200 à 300 t $\cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$ et les vitesses varient de 0,6 à 2,2m/s.

Les séparateurs magnétiques à basse intensité, de type classique, n'agissent de façon efficace que sur les corps ferrimagnétiques qui sont le siège de forces importantes, même dans des champs magnétiques faibles (H≈300 kA/m et grad($\boldsymbol{H}^2$) ≈ 2×10^{11} A^2/m^3).

Des progrès ont été réalisés avec l'apparition de séparateurs à aimants permanents en céramique et à grande vitesse périphérique permettant de traiter des produits de granulométrie plus fine. Ces séparateurs centrifuges sont des appareils à tambour ayant une vitesse périphérique de l'ordre de 1 à 10 m/s. La partie active du séparateur comprend une série d'aimants en céramique à polarité alternée et à pas polaire (distance entre les pôles) relativement faible formant un arc magnétique. Certains constructeurs proposent plusieurs modèles d'appareils présentant entre eux des différences de pas polaires :

- **les séparateurs à pas élevés** (> 50 mm) qui ont une intensité et une profondeur de champ magnétique plus élevées ; ce type d'appareil est bien adapté pour des opérations de préconcentration (stérile définitif) ou lorsque le produit à traiter est grossier.

- **les séparateurs à pas polaires faibles** qui sont plus recommandés pour l'obtention de concentrés à forte teneur ou pour le traitement de produits fins. Ces séparateurs sont disponibles sur le marché avec un diamètre de virole variant de 300 à 1200 mm pour une largeur utile comprise entre 250 et 2500mm. Ces appareils sont principalement utilisés pour la concentration de minerais de fer (magnétite) ou de minéraux ferrimagnétiques, mais également pour l'épuration de substances utiles (céramiques, sables, etc.).

D'une conception légèrement différente des précédentes, le séparateur conçu par la Société Fives-Cail-Babcock (FCB), de type multipôles à haut gradient de champ magnétique et à grande vitesse périphérique, est particulièrement bien adapté au traitement d'oxydes de fer tels que l'oxyde mixte magnétite-hématite.

Les performances intéressantes de ce séparateur sont obtenues grâce à des aimants permanents en céramique assemblés de manière à ce que le flux magnétique soit utilisé au maximum pour la séparation. Par ailleurs, le secteur actif composé de nombreux pôles longitudinaux, de polarité alternée, parallèles aux génératrices du tambour.

Le secteur actif fixe et réglable en position couvre un angle de 200° et le pas polaire, ou le nombre de pôles, est variable en fonction des résultats métallurgiques recherchés. Les forces magnétiques importantes, obtenues grâce à la valeur du champ magnétique et de gradient de champ, autorisent des vitesses très élevées du tambour, sans risque de projeter, hors de la zone d'attraction des particules magnétiques. Pour certaines applications, ces vitesses périphériques peuvent dépasser 10 à 12 m/s. Les débits sont importants de 20 à 300 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$. Industriellement, les unités de traitement magnétique peuvent être constituées d'une superposition de plusieurs modules. La conception modulaire des séparateurs à basse intensité et à haut gradient FCB permet de réaliser de nombreux assemblages qui répondent à la plupart des schémas de traitements industriels.

II.2 Séparateurs en voie humide

La séparation en voie humide est généralement employée chaque fois que la granulométrie du produit à traiter devient fine et que la séparation en voie sèche devient inopérante du fait de la gêne créée par l'attraction électrostatique entre les particules ou que le produit à traiter est déjà sous forme de pulpe minérale. Les principaux domaines d'utilisation en minéralurgie sont :

-l'enrichissement de minerais de fer à base de magnétite ou pyrrhotite (Fer sulfuré) dont la granulométrie est inférieure à 1 mm ;

-la purification de produit et la récupération de la magnétite ou du ferrosilicium utilisés dans les ateliers de traitement en milieu dense comme pour les séparateurs travaillant en voie sèche, les progrès récents consistent en l'utilisation d'aimants permanents en céramique générant des champs magnétiques élevés.

Le tambour en acier inoxydable tourne autour d'un assemblage magnétique est recouvert d'un revêtement anti-usure en caoutchouc. Chargé d'évacuer les produits magnétiques attirés par le système magnétique, il tourne à faible vitesse (0,6 à 1,3m/s). Les débits spécifiques de produit à traiter en pulpe se situent entre 100 et 200 $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$, ce qui donne, en fonction de la concentration solide (25 à 50 %).

Ces appareils permettent d'obtenir soit des concentrés à haute teneur, soit des stériles parfaitement épurés. À cet effet, plusieurs agencements sont proposés. Les diverses dispositions de l'alimentation et d'évacuation des produits définissent trois types essentiels de séparateurs, chacun étant adapté à une application bien spécifique.

II.2.1 Les séparateurs à courant parallèle (figure II.8-***a)*** sont surtout adaptés au traitement de produits grenus et pour obtenir une épuration maximale des produits magnétiques. Dans ce système, la pulpe circule dans le même sens que la rotation du tambour, le temps de séjour dans le champ magnétique est relativement long, ce qui crée de nombreux retournements des produits magnétiques sur le tambour et permet d'obtenir un concentré épuré au maximum.

II.2.2 Les séparateurs à contre-rotation (figure II.**8-*b)*** sont plus spécialement adaptés au traitement des produits de granulométrie inférieure à 0,6mm. Ils conviennent tout particulièrement à l'épuration de produits non magnétiques et cela à des débits élevés ($\approx$ 100 t · h $^{-1}$ · m^{-1}) puisque les particules non magnétiques parcourent la plus grande partie de la zone active, circulant dans le sens contraire de la rotation du tambour.

II.2.3 Les séparateurs à contre-courant (figure II.**8-*c)*** sont bien adaptés au traitement des produits de granulométrie inférieure à 1 mm ou très fins (0,15 à 0,4 mm). Ce système est un mixage des deux précédents. Les produits sont alimentés sous le tambour et l'éclatement du jet de pulpe permet de disperser le produit à traiter et d'obtenir un concentré pur; suivant la qualité du produit concentré ou épuré demandée, un agencement de ces différents types est souvent réalisé.

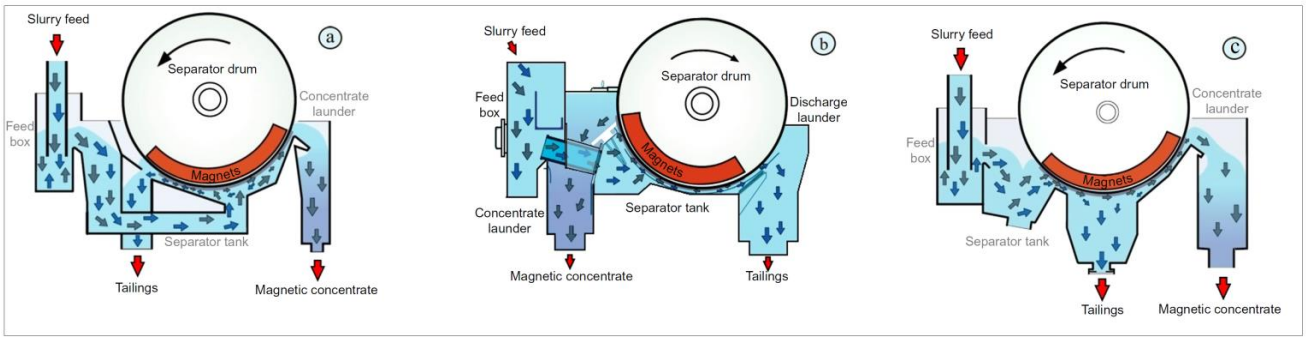


Figure II.8 : Séparateurs à basse intensité en voie humide (doc. Fives-Cail-Babcock, (FCB)) (Courtesy Metso).

La figure II.9 représente un séparateur à tambour par voie humide dans une usine d'enrichissement du minerai de fer.



Figure II.9 : Séparateurs magnétiques à tambour humide dans une usine d'enrichissement du minerai de fer.

CHAPITRE III : SEPARATION MAGNETIQUE A HAUTE INTENSITE (SMHI)

Introduction

La technologie de la séparation magnétique à haute intensité en voie sèche existe depuis le début de ce siècle et les perfectionnements ont essentiellement porté sur la forme des pièces polaires, la conception du rotor, afin de diminuer la flèche du rotor due aux forces magnétiques importantes mises en jeu. Ce n'est que dans les années 60 à 70 que la séparation en voie humide s'est véritablement développée pour aboutir à la technologie efficace que les minérallurgistes attendaient pour le traitement des produits fins. Ces séparateurs développent des champs magnétiques allant de 400kA/m à 1600kA/m. Les débits solides varient quant à eux suivant le mode de séparation et l'opération de traitement (concentration, épuration…etc.).

L'alimentation des séparateurs ne doit pas comporter un trop fort pourcentage de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques (< 0,5 %). En effet, la rémanence de ces circuits ne permet pas de les éliminer complètement et leur présence risque de colmater les appareils. Il est souvent conseillé de faire passer auparavant l'alimentation dans un séparateur magnétique à basse intensité.

L'apparition sur le marché d'aimants permanents à base de terres rares (Samarium-cobalt : Sm-Co ou Fe-Nd-B : alliage de néodyme, de fer et de bore) a permis la réalisation de nouveaux séparateurs à haute intensité. Ces derniers se substituent dans beaucoup de cas aux appareils traditionnels du fait de leurs coûts d'investissement et de fonctionnement nettement inférieurs.

III.1 Séparateurs à circuits conventionnels (électroaimants)

III.1.1 Séparateurs en voie sèche

Ces séparateurs présentent quelques inconvénients par rapport à ceux travaillant en voie humide.

La plupart des sociétés minières sont amenées à traiter des minerais dont la teneur et la maille de libération deviennent de plus en plus faibles, ce qui nécessite de les broyer de plus en plus finement pour obtenir la concentration des différents constituants. Or, si la séparation en voie sèche peut donner de bons résultats pour des granulométries fines (et même être la seule solution, compte tenu des conditions d'exploitation locales), il n'en demeure pas moins qu'elle reste limitée à 40µm et que le choix de cette méthode conduit à des installations plus complexes et plus onéreuses (infection des installations, séchage indispensable des produits avant traitement, faible capacité des séparateurs)

III.1.1.1 Séparateurs travaillant par extraction

Ce sont principalement les séparateurs à bandes transversales (figure III. 1-a, III. 2 et III.3) et à disques (figure III.1-b). Ces séparateurs sont équipés d'une bande convoyeuse passant entre les deux pôles d'un électroaimant (entrefer) et, soit d'une bande se déplaçant sur la pièce polaire supérieure et transversalement à la bande principale, soit d'un disque (denté) tournant au-dessus. L'alimentation du minerai se fait en couche mince (1 à 1,5 mm) sur la bande convoyeuse. Les éléments magnétiques passant dans le système sont attirés par la pièce polaire supérieure et évacués sur le côté par la bande transversale ou le disque. Ces séparateurs développent des champs magnétiques variant de 800 à 1 600 kA /m et ont des débits compris entre 0,3 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$ à 4 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$ (la largeur utile variant entre 100 et 800 mm).

Plusieurs systèmes magnétiques avec un champ magnétique et un entrefer variables peuvent être montés sur la même bande convoyeuse afin de recueillir des espèces minérales différentes.

La granulométrie idéale de l'alimentation est comprise entre 150µm et 10mm, mais une bonne efficacité est possible jusqu'à 75µm (paramagnétique fort).

Ces appareils sont utilisés pour traiter des substances telles que l'ilménite, la chromite, la monazite, le wolframite, les produits pharmaceutiques ou chimiques, les céramiques, etc.

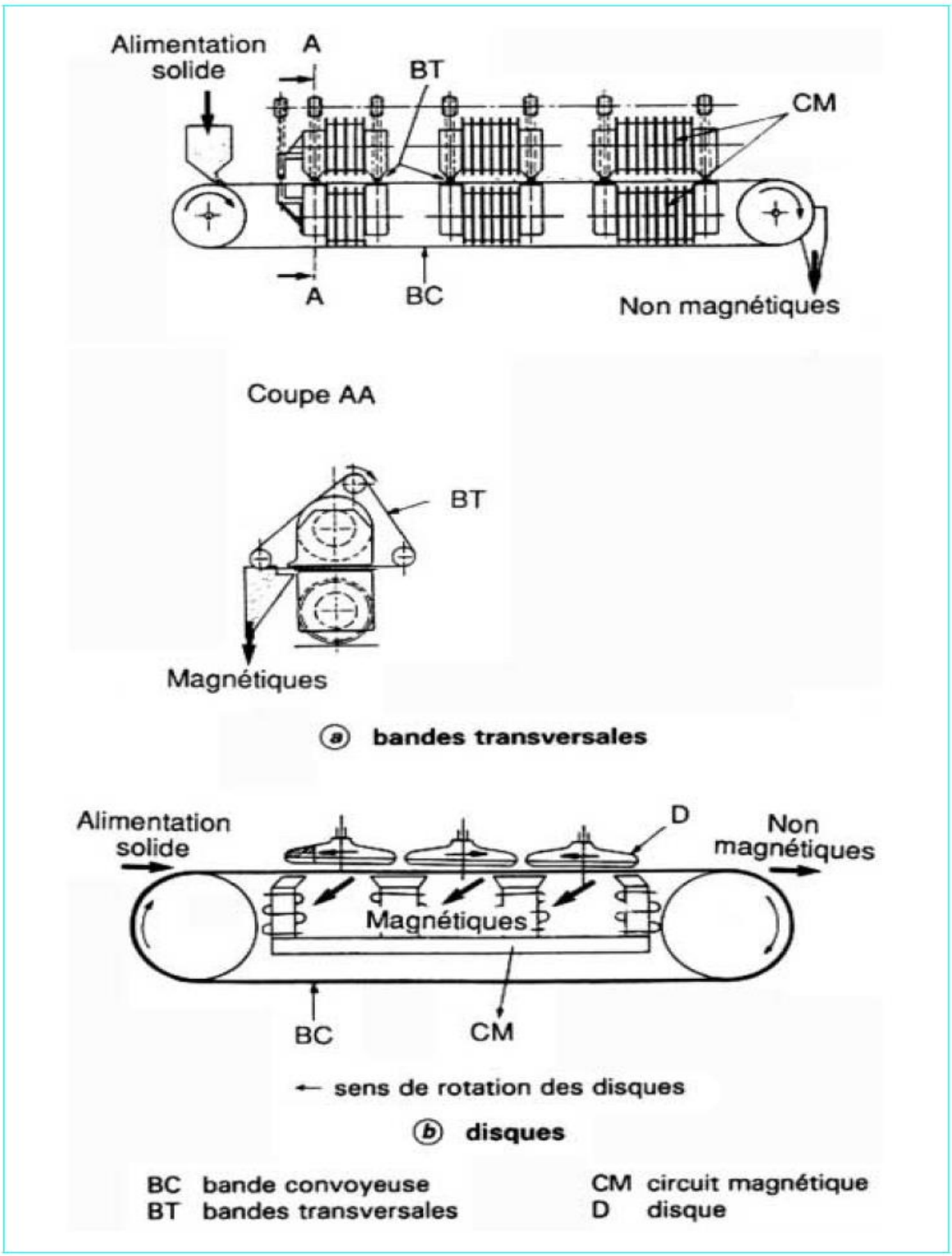


Figure II. 1 : Séparateurs à haute intensité en voie sèche

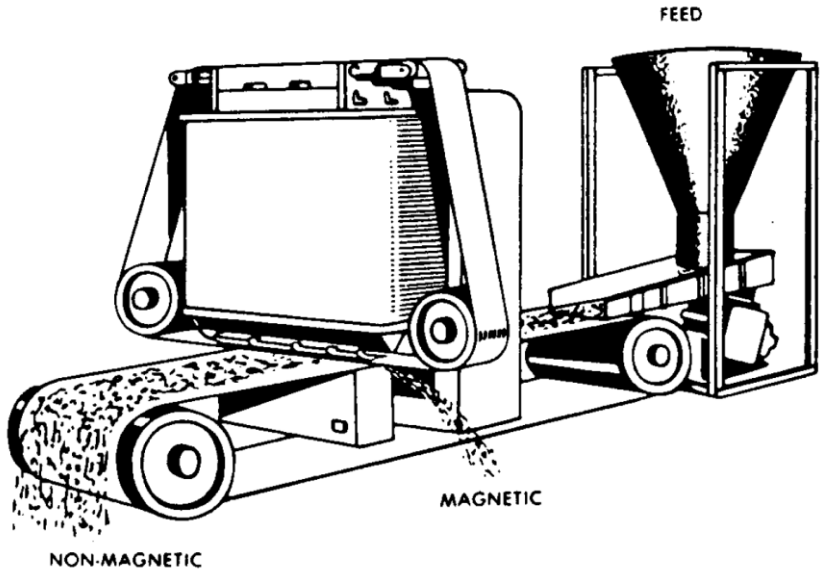


Figure III.2: schéma d'un séparateur magnétique de type Cross-belt



Figure III.3: séparateur magnétique de type Cross-belt (courtesy of Roche Mining).

III.1.1.2 Séparateurs travaillant par déviation

Les appareils utilisés industriellement sont des séparateurs dits à rotor qui, suivant la conception du circuit magnétique, peuvent également travailler par extraction.

Ils comportent (figure III. 4 et III. 5) un rotor denté tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique. Celui-ci comprend, dans sa conception de base, une culasse magnétique avec un noyau magnétique et une ou deux bobines d'électroaimant entourant ce dernier. Les pôles magnétiques ou pièces polaires, entre lesquelles tourne le rotor soumis à une induction magnétique, peuvent avoir diverses formes (plan incliné ou vertical). La séparation a lieu dans l'intervalle (entrefer) réglable situé entre les pièces polaires avant et le

rotor formant un contre-pôle. Le rotor est constitué d'un assemblage de minces tôles en métal allié, isolées les unes des autres de manière à former des arêtes rectangulaires, triangulaires ou trapézoïdales, donc des nervures, dents ou filets.

L'alimentation est faite sur le rotor entre ce dernier et la pièce polaire avant. Les particules magnétiques adhèrent au rotor sous l'influence de la force magnétique et sont portées par la rotation du rotor dans une zone de champ magnétique faible où elles sont décollées par une brosse. Les particules non magnétiques quittent le système sous l'action combinée de la force centrifuge et de la force de gravité. L'entrefer *e* et le pas de denture *p* sont adaptés à la granulométrie *d* du produit à traiter ($p = 2^e \geq 4d$).

Ces séparateurs ont une grande souplesse de fonctionnement et sont donc susceptibles de traiter des produits de texture très différente dans des limites granulométriques importantes (de 15 mm à 50µm). Suivant les applications Suivant les applications, la granulométrie et la composition minéralogique, les débits admissibles sur des séparateurs à rotor induit sont de l'ordre de 1500 à 6000 $kg \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$; ils peuvent atteindre dans certains cas 8000 $kg \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$, ce qui correspond, pour des rotors de longueur industrielle de 750 mm, à des capacités de 1 à 6 t/h par rotor. Ces appareils, relativement légers (de 2,5 à 12 t), peuvent développer des champs magnétiques pouvant aller de 400 à 1 600 kA/m avec une consommation énergétique comprise entre 1,0 et 2,5 kWh par tonne traitée (la moitié pour l'établissement du champ, l'autre moitié pour les moteurs d'entraînement).

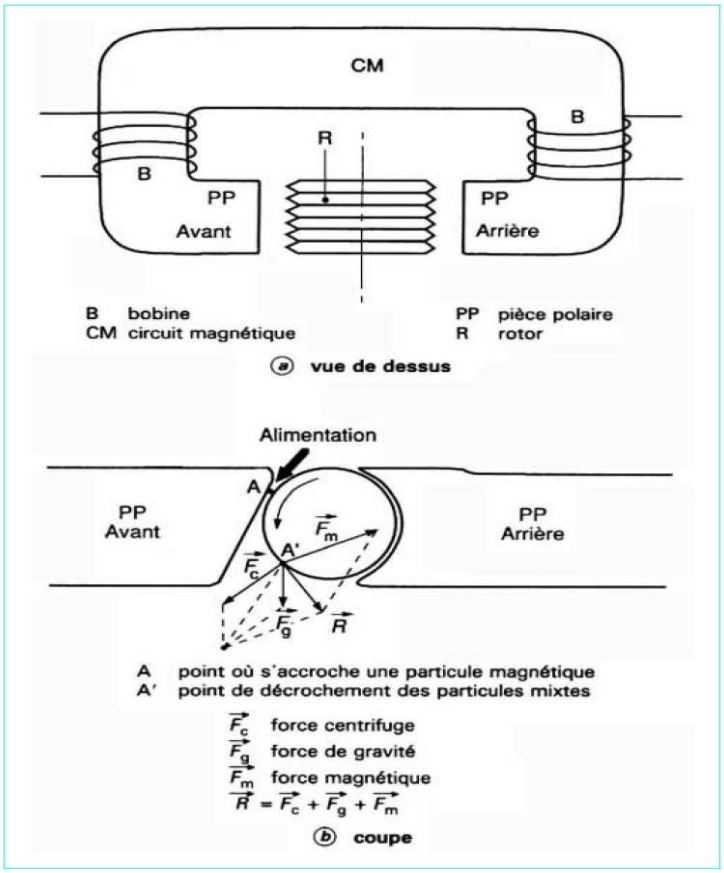


Figure III.4 : Séparateur à haute intensité en voie sèche à rotor induit

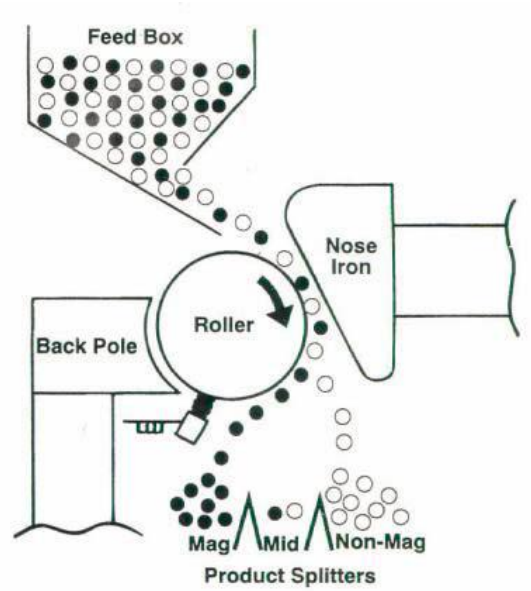


Figure III. 5: Schematic diagram of an induced magnetic roll separator (courtesy of Roche Mining).

Les appareils industriels fabriqués en Europe et aux États-Unis ont, en général, un diamètre variant de 150 à 300 mm et une largeur utile comprise entre 200 et 800mm. La plupart de ces séparateurs industriels sont réalisés suivant une conception modulaire à partir des éléments de base suivants :

- un seul rotor ;
- deux rotors fonctionnant en parallèle ou en série ;
- quatre rotors.

Chacun de ces modules est constitué d'un ensemble autonome qui a fait l'objet, de la part des constructeurs, d'un grand nombre d'améliorations et qui comprend :

- un circuit magnétique en acier doux à très haute perméabilité qui est rigide et indéformable sous l'action du champ magnétique. Il comprend les caissons de traitement (enveloppe protectrice de l'appareil), les rotors, le bobinage et les pièces polaires réglables dont la forme est adaptée au traitement ;

- un bobinage magnétique composé de plusieurs galettes autoventilées, d'une conception particulière qui évite la dispersion du flux tout en assurant une excellente dissipation thermique ;

- un rotor induit rainuré ou denté, constitué d'un empilage de rondelles d'acier au silicium, qui résiste mécaniquement et sans déformation aux forces considérables développées par l'attraction magnétique.Les appareils de séparation magnétique à haute intensité en voie sèche sont utilisés dans de nombreuses industries et principalement pour :

- la concentration de minéraux paramagnétiques : minerais de fer, chromite, wolframite, ilménite, oxydes de manganèse, etc. ;
- l'épuration de minéraux industriels : feldspaths, sables, andalousites, calcaire, etc. ;
- la séparation entre eux de minéraux paramagnétiques (minéraux des sables) à condition qu'ils possèdent une différence suffisante de susceptibilité.

III.1.2 Séparateurs en voie humide

III.1.2.1 Généralités

La technologie des séparateurs en voie humide a été plus délicate à mettre au point. Les premiers séparateurs reprennent le fonctionnement des appareils à rotor induit. Les progrès importants en SMHI humide ont été réalisés par G.H. Jones (1960) avec l'emploi de boîtes d'extraction contenant une matrice (plaques dentées) et ont permis la commercialisation, par la société KHD Humboldt Wedag, d'un appareil continu à carrousel en 1970.

Les techniques actuelles de SMHI, en voie humide (figure III. **6**), diffèrent des autres dans le sens où l'alimentation n'est plus distribuée sur ou sous un rotor ou tambour, mais circule au travers de matériel ferromagnétique aimanté par un champ magnétique extérieur et placé dans une enceinte annulaire (carrousel) tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique à entrefer large ou étroit.

Ce matériel représentant les matrices d'extraction a des configurations différentes suivant les constructeurs : plaques dentées, rainurées, assemblage de barreaux cylindriques ou biseautés, billes d'acier (figure III. 7- *a*).

Cette matrice a trois buts essentiels:

- produire des sites de collection pour les particules paramagnétiques et ainsi permettre la séparation de particules non magnétiques ;
- obtenir, dans la zone de séparation (entrefer), des valeurs de gradient de champ magnétique élevées, de façon à générer des forces d'attraction élevées ;

- amplifier le champ magnétique extérieur appliqué, avec une répartition des lignes de champ plus uniforme dans toute la zone de séparation.

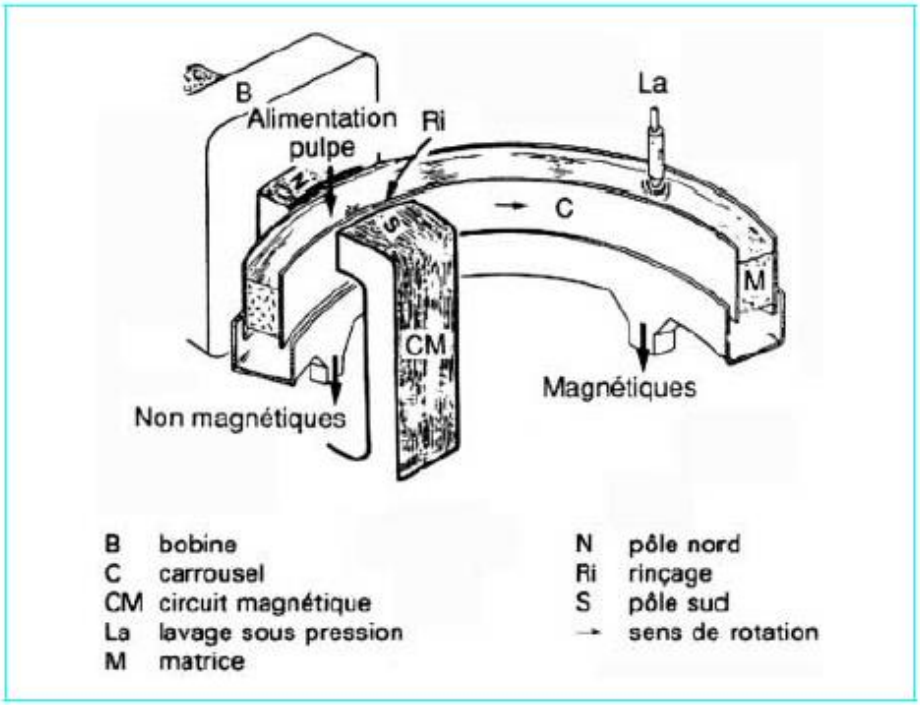


Figure III. 6 : Séparateur à haute intensité en voie humide

Cette matrice doit également être choisie pour s'adapter au mieux aux caractéristiques de l'appareil et du minerai à traiter. Les caractéristiques optimales de la matrice qui doivent être considérées sont les suivantes :

- une surface de collection maximale par unité de volume de la zone de collection ;
- un gradient de champ magnétique maximal ;
- une perméabilité magnétique maximale, pour avoir les effets maximaux d'accroissement et de régularité du champ ;
- une perméabilité de la matrice au fluide qui s'écoule (facilité de passage de la pulpe) ;
- une facilité de pénétration de l'eau de lavage et de l'eau sous pression sur tous les sites de collection de la matrice.

Du point de vue de la conception industrielle, tous les appareils mis en circulation actuellement sont de principe très voisin. Ils développent des champs magnétiques allant de 400 à 1 600 kA/m (bien que 1 200 kA/m suffisent en général pour une séparation industrielle) et ont une consommation énergétique comprise entre 0,5 et 2,0 kWh par tonne traitée. Leur capacité varie suivant le type d'appareil, de 10 à 180 t/h.

Le principe de ces appareils (figure III.6) est le suivant : l'alimentation est faite au-dessus des pôles des électroaimants de manière à ce que la pulpe passe dans une région de champ magnétique élevé. Les particules magnétiques peuvent donc être retenues par les éléments de matrice alors que les particules non magnétiques sont entraînées par le courant de pulpe.

Les particules restées piégées sont portées par la rotation du carrousel vers une [1]zone de champ magnétique faible et sont éliminées par lavage avec un jet d'eau sous pression. Mais auparavant, à la sortie du système magnétique, il peut être incorporé un système de rinçage (à basse pression) de la matrice afin d'éliminer les particules mixtes minéralogiques ou les particules diamagnétiques restées piégées mécaniquement (figure III.9).

Les séparateurs Jones, Boxmag Rapid, Gill Readings, Eriez et Carpco sont actuellement disponibles sur le marché et représentent pour certains une gamme assez étendue de modèles.

Les appareils *Jones* sont largement utilisés pour le traitement des minerais de fer où ils représentent les plus grosses installations actuelles.

III.1.2.2 Séparateur de type Jones

Dans le séparateur *Jones* (figure III.7), le carrousel tourne dans l'entrefer du circuit magnétique. Ce carrousel sert donc de culasse magnétique aux bobines inductrices, assurant ainsi la fermeture du champ magnétique d'un pôle à l'autre. Cette conception nécessite un carrousel plein, faisant partie intégrante du circuit magnétique, et a tendance à alourdir l'ensemble. Suivant la capacité des appareils (de 10 à 180 t/h), l'arbre vertical porte un ou deux carrousels, avec, à leur périphérie, les boîtes d'extraction. Chacune d'elles contient la matrice, composée de plaques dentées en acier ferromagnétique et montées perpendiculairement aux lignes de champ. Ce type de matrice offre de forts gradients de champ magnétique, donc des forces d'attraction élevées résultant de la concentration du flux magnétique aux arêtes de plaques.

Des efforts ont été réalisés afin de minimiser le risque d'obstruction de la matrice par la présence de faibles quantités de magnétite ou de particules de fer. Le fait que le carrousel parcoure de façon continue une zone démagnétisée et que le passage vertical du produit se réalise sans gêne, l'écartement entre les plaques étant constant, diminue le risque de colmatage. Toutefois, si la proportion d'éléments fortement magnétiques dépasse 1%, ce risque s'accroît et il est recommandé de prévoir un séparateur scalpeur à basse intensité avant l'appareil à haute intensité.

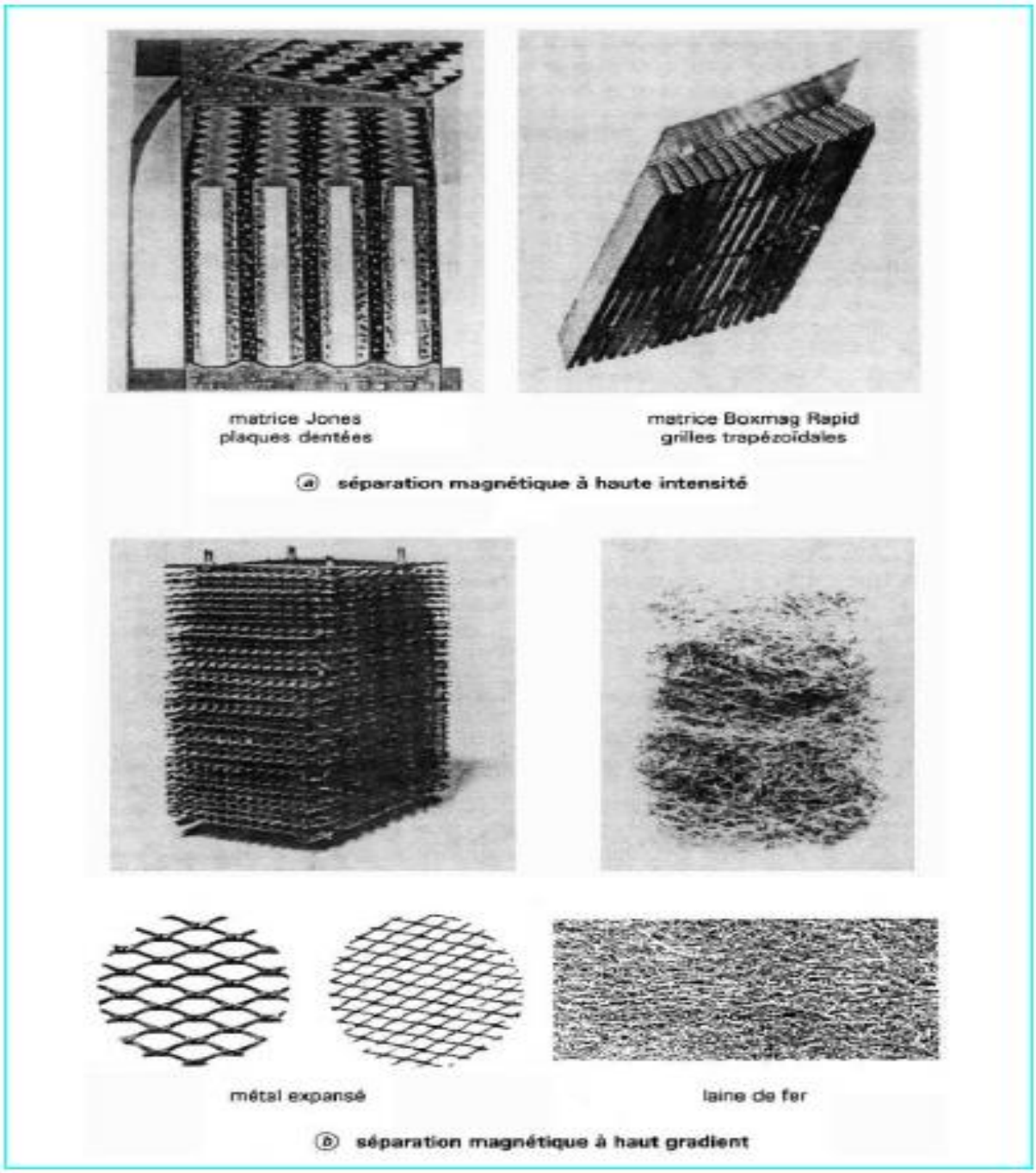


Figure III.7 : Différents types de matrice

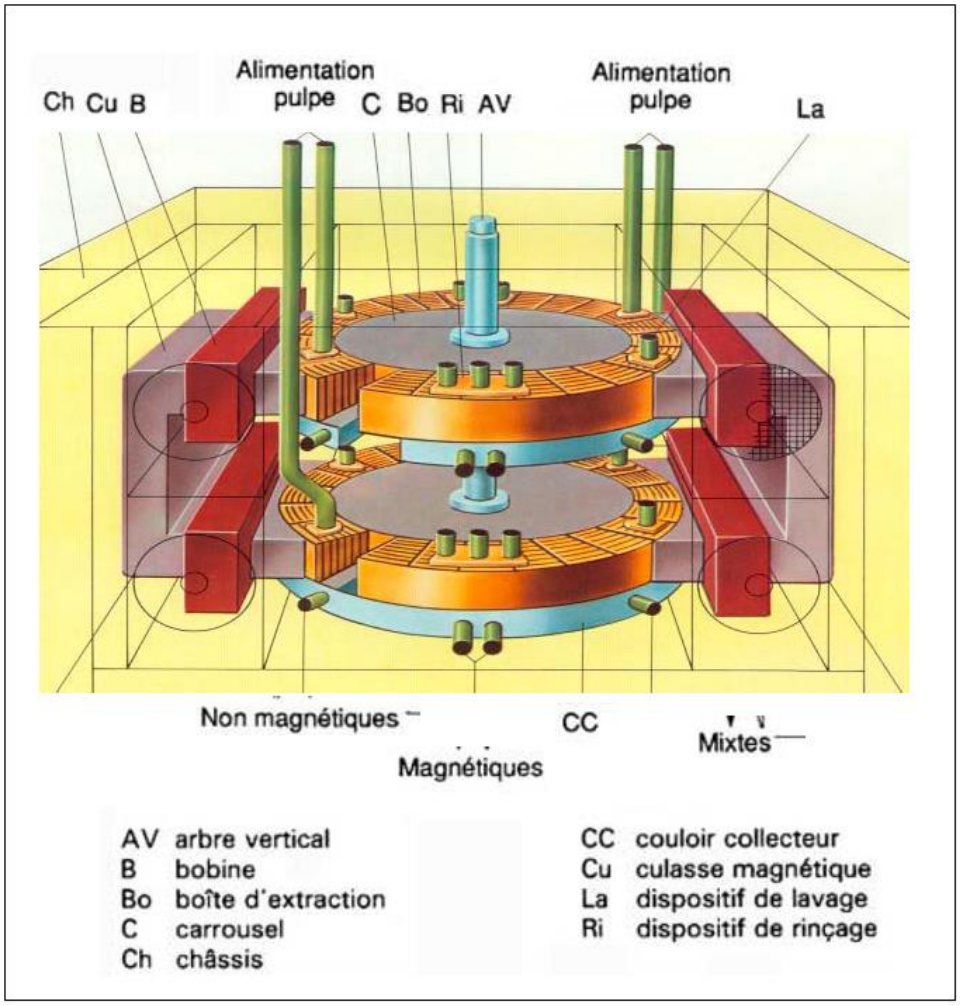


Figure III. 8: Séparateur à haute intensité en voie humide type *Jones DP 317* double rotor (KHD Humboldt Wedag)

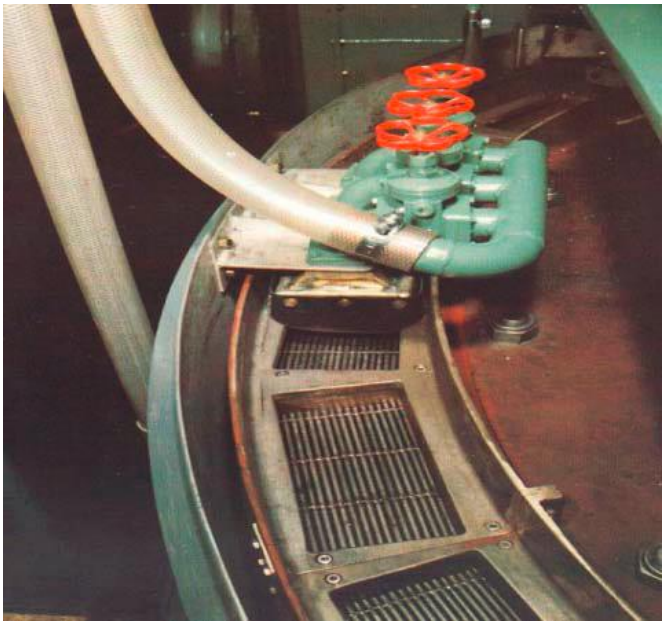


Figure III.9: Dispositif de rinçage pour la fraction magnétique dans le Jones WHIMS

La vitesse de rotation du rotor est de 3,5 tr/min, l'intensité du champ magnétique est au maximum de 1200 kA/m entre les plaques (entrefer de 0,5 mm). Pour les versions à simple ou double rotor (DP 317-S ou DP 335), trois types de plaques dentées sont disponibles (4, 8 ou 12 dents sur 2,5 cm) pour réaliser des entrefers variant de 0,5 à 10mm. La granulométrie est en général inférieure à 1 mm, mais peut être de 4 à 5 mm pour un entrefer large et la concentration solide de l'alimentation peut aller jusqu'à 55 %. Pour les grosses unités de type DP 335, il est possible, avec un entrefer de 5 mm et des plaques dentées grossières (4 dents sur 2,5 cm), de traiter des minerais de fer (Martite) à un débit de 300 t/h. Ces séparateurs, bien que de construction compacte et par là même peu encombrants malgré leur débit élevé, restent lourds du fait de la conception magnétique qui nécessite un rotor plein ; il faut compter une masse de 0,8 t par tonne horaire de produit traité.

Ces dernières années, Humboldt a cherché à alléger l'appareil par l'emploi de rotors creux. Les séparateurs Jones représentent certainement les installations de plus fort tonnage traité actuellement dans le monde en séparation magnétique à haute intensité en voie humide.

Les séparateurs Jones sont disponibles en plusieurs tailles, certaines d'entre elles sont résumées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Différents modèles de Jones WHIMS.

Type	Capacite (t/h)	Masse (t)	Diametre du rotor (m)
DP 335	180	114	3.35
DP 317	120	98	3.17
DP 250	75	70	2.50
DP 140	25	30	1.14
DP 90	10	16	0.9

III.1.2.3 Séparateur Boxmag Rapid

Ce séparateur est construit par la société Boxmag Rapid en Grande-Bretagne (figure III.10 et III.11**)**. Il est de conception légèrement différente du précédent. Le carrousel comportant la matrice tourne, étroitement ajusté dans l'entrefer d'un électroaimant de forte puissance. Le rotor ne fait plus partie intégrante du circuit magnétique et peut être de construction plus légère, ce qui réduit le poids de l'appareil.

La matrice des séparateurs Boxmag Rapid est constituée de barreaux inclinés en acier inox (figure III.7-***a***), ayant une section trapézoïdale et montée entre deux couronnes (carrousel) en acier inox amagnétique. Cette disposition permet d'assurer un gradient de champ magnétique élevé, le passage des particules à travers plusieurs barreaux inclinés, donc plusieurs zones magnétisées, et d'augmenter la durée de rinçage des produits magnétiques.

Ce qui caractérise surtout ces appareils, ce sont le rotor réalisé en acier inox amagnétique, qui est de construction légère, et le circuit magnétique, qui comporte des

électro-aimants ayant leurs pôles alternés par rapport à ceux de leurs voisins et placés à égale distance les uns des autres. Cette conception présente l'avantage d'avoir un champ magnétique voisin de zéro aux points d'évacuation des produits magnétiques.

Ces appareils sont capables de développer des champs magnétiques allant jusqu'à 1 400 kA/m, ont une capacité comprise entre 5 et 160 t/ h et peuvent être à simple ou double rotor. Leurs utilisations sont, comme pour les précédents, la concentration de minerais de fer ou de minerais paramagnétiques (wolframite, chromite) et l'épuration de minéraux industriels.

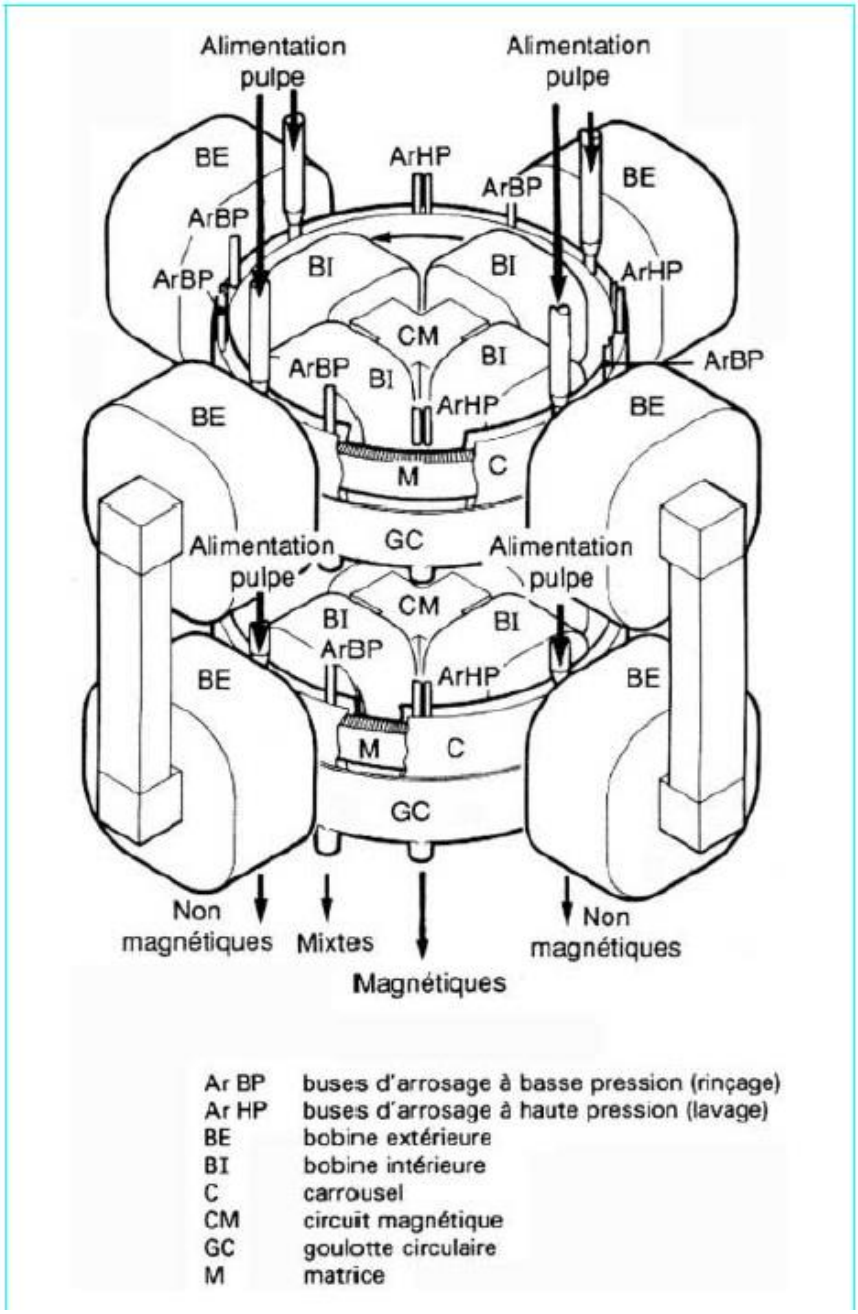


Figure III.10 : Séparateur à haute intensité en voie humide *HIW 8* (Boxmag Rapid)

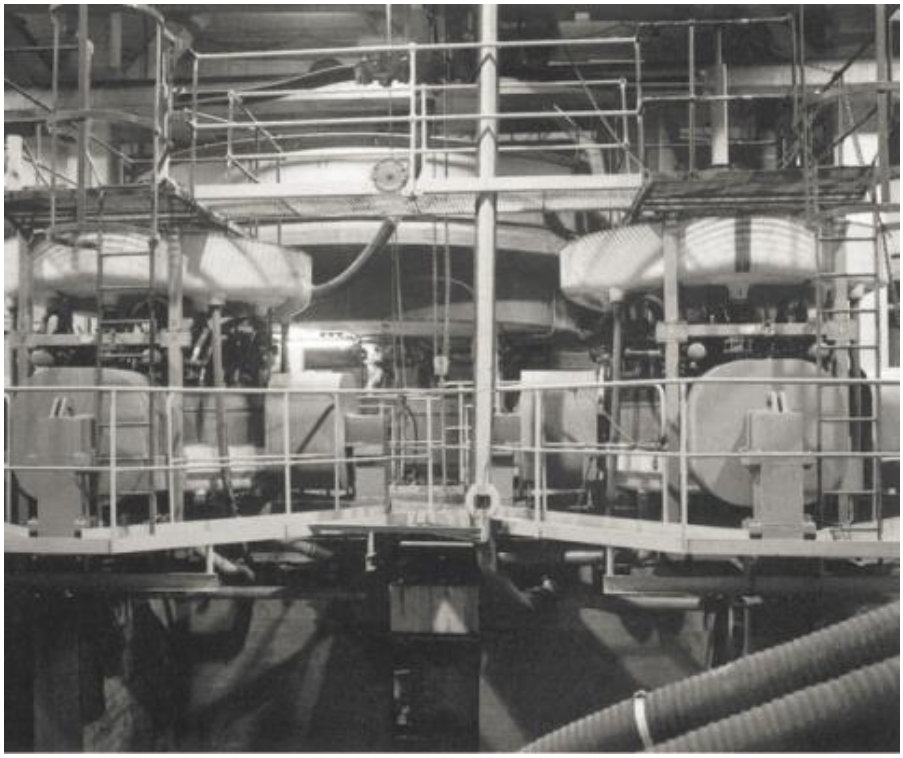


Figure III.11: Deux machines Boxmag-Rapid de SMHI installées dans une usine de récupération d'ilménite (voie humide).

III.2 Séparateurs à aimants permanents en céramique

III.2.1 Généralités

Les très récentes évolutions de la technologie de fabrication des aimants permanents ont permis de mettre sur le marché de nouveaux alliages en céramique, à base soit de **terres rares-Co**, soit de **Fe-Nd-B** présentant des énergies internes (*BH*) max**.**

Ils peuvent donc être utilisés en tant que générateurs de champ magnétique élevé pour des séparateurs magnétiques à haute intensité avec des agencements :

- qui garantissent des gradients de champ magnétique importants et nécessaires à la création de forces magnétiques sur les particules à trier ;

- qui correspondent à des champs magnétiques ouverts, c'est-à-dire à des forces générées à l'extérieur d'une pièce multipolaire évitant les problèmes traditionnels de circulation des particules dans des entrefers.

À l'heure actuelle, les différentes machines proposées par les constructeurs, essentiellement dans le domaine de la valorisation des matières premières minérales, sont :

- *Permroll*, construit par Ore Sorters International OSI (Afrique du Sud) ;
- *Magnaroll*, construit par Boxmag Rapid (Grande-Bretagne) ;

- *RE Roll*, construit par Eriez (États-Unis) ;
- *Rollap*, construit par Fives-Cail-Babcock FCB (France).

Les trois premiers correspondent à des technologies où la tête multipolaire travaille comme une poulie de courroie d'amenée du produit à traiter. Le dernier est conçu pour que la tête multipolaire cylindrique reçoive directement à sa surface le produit alimenté en chute sur l'une de ses génératrices. Dans tous ces cas, la conception en champ magnétique ouvert permet le traitement de granulométries importantes (supérieures à 10mm) et de formes de particules irrégulières (copeaux, particules plates, allongées, etc.).

Ces séparateurs, employés aussi bien dans le domaine de la concentration (fer, chromite, ilménite) que de l'épuration (sable, phosphate, feldspaths), sont également bien adaptés pour répondre aux problèmes de la récupération et du recyclage de déchets métalliques (scories, copeaux, déchets d'usinage).

Les firmes Carpco et Eriez (États-Unis) commercialisent un séparateur à carrousel dont la conception du circuit magnétique est identique à celle du séparateur Boxmag Rapid. Seules les matrices utilisées diffèrent : ce sont des billes d'acier (Carpco et Eriez), ou des plaques dentées ou grilles de métal déployé (Eriez).

Le séparateur Eriez (figure III. 12 et III.13) a une capacité de 120 t/h et peut être équipé, pour des séparations ne nécessitant pas de champ élevé (< 800 kA/m), d'un circuit magnétique à aimants permanents (moindre coût énergétique) [13] [33].

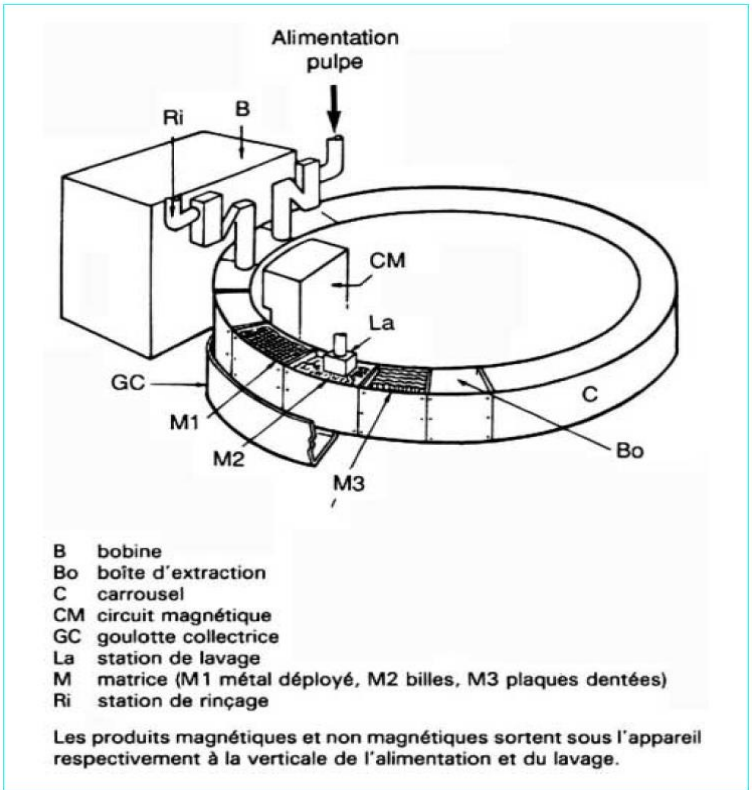


Figure III.12: Séparateur à haute intensité en voie humide *CF 5MM* (Eriez)

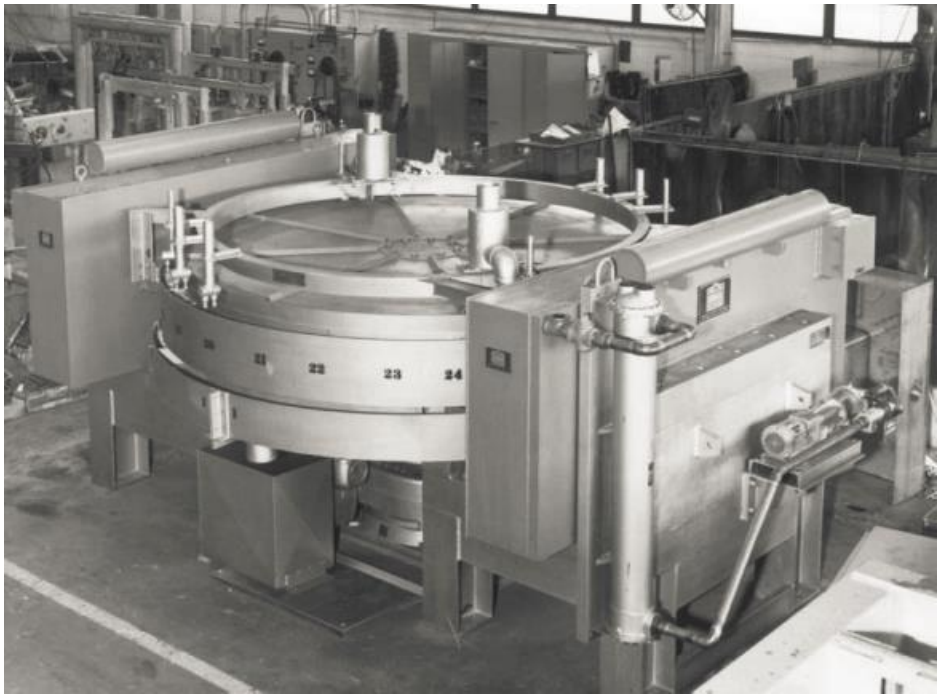


Figure III. 13: Two-head Eriez CF-600 WHIMS, with capacity up to 60 t/h (courtesy of Eriez Magnetics, Inc.).

III.2.2 Séparateurs à tambour ou rouleau

Ces séparateurs ne sont pas encore développés au stade industriel. Le tambour comporte des cannelures constituant l'entrefer d'aimants permanents (Co-Sm ou Fe-Nd-B) qui sont le siège d'un champ magnétique intense (≈1 200 à 1 600 kA/m) capable de retenir des particules faiblement magnétiques.

Ces appareils (figure III.14), comme le séparateur expérimental type *Laurila*, sont constitués d'un tambour comportant de nombreuses cannelures longitudinales (largeur de 2 mm à la base et profondeur de 5 mm). L'intensité du champ magnétique mesurée au fond de la cannelure est de 1 120 kA/m et la valeur du produit $H\,\mathrm{d}H/\mathrm{d}x$ est très élevée : 1,3. 1017 A^2/m^3. Ces séparateurs ont été expérimentés avec du minerai de chrome : pour un diamètre de tambour de 600 mm, la capacité de traitement était de 3,6 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$. Ils peuvent également travailler en voie humide.

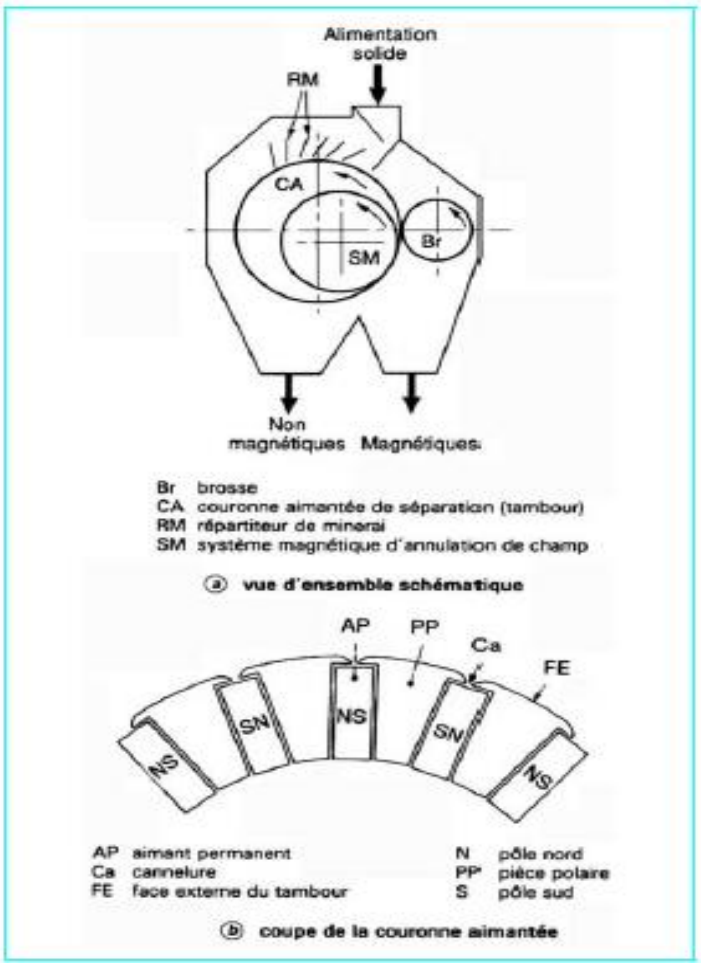


Figure III.14 : Séparateur à haut champ en voie sèche et à aimants permanents type *Laurila*

L'appareil FCB est constitué d'un rouleau équipé d'aimants à base de terres rares (Co-Sm ou Fe-Nd-B), recouvert d'un revêtement anticorrosion et anti-abrasion en céramique électro-fondue de faible épaisseur. Ces aimants sont séparés par des disques en acier doux jouant le rôle de pièces polaires. Le champ magnétique se referme d'une pièce polaire à la pièce suivante, de polarité inverse, et le pas polaire des rouleaux peut être adapté à la granulométrie des produits à traiter. L'appareil industriel a une largeur utile de 1 000 mm et a été testé sur des minéraux industriels (sables, verrerie, feldspaths, etc.) et des phosphates (élimination du fer et de l'aluminium).

III.2.3 Séparateurs de type *Permroll*

L'organe actif de l'appareil (figure **III.15**) se compose d'une poulie magnétique entraînant une fine courroie transportant le produit à traiter. La poulie est constituée d'un empilement de disques en aimant permanent à hautes caractéristiques (samarium, cobalt ou fer néodyme) séparés par des éléments de fer doux de plus faible épaisseur. Les polarités des disques aimantés sont alternées (figure **III.15-*a***). Le disque de fer doux canalisant, en les resserrant, les lignes de champ, assure ainsi le maintien, à la surface de la bobine, d'un gradient de champ élevé qui peut être, en première approximation, considéré comme uniforme selon la direction de l'axe de la poulie.

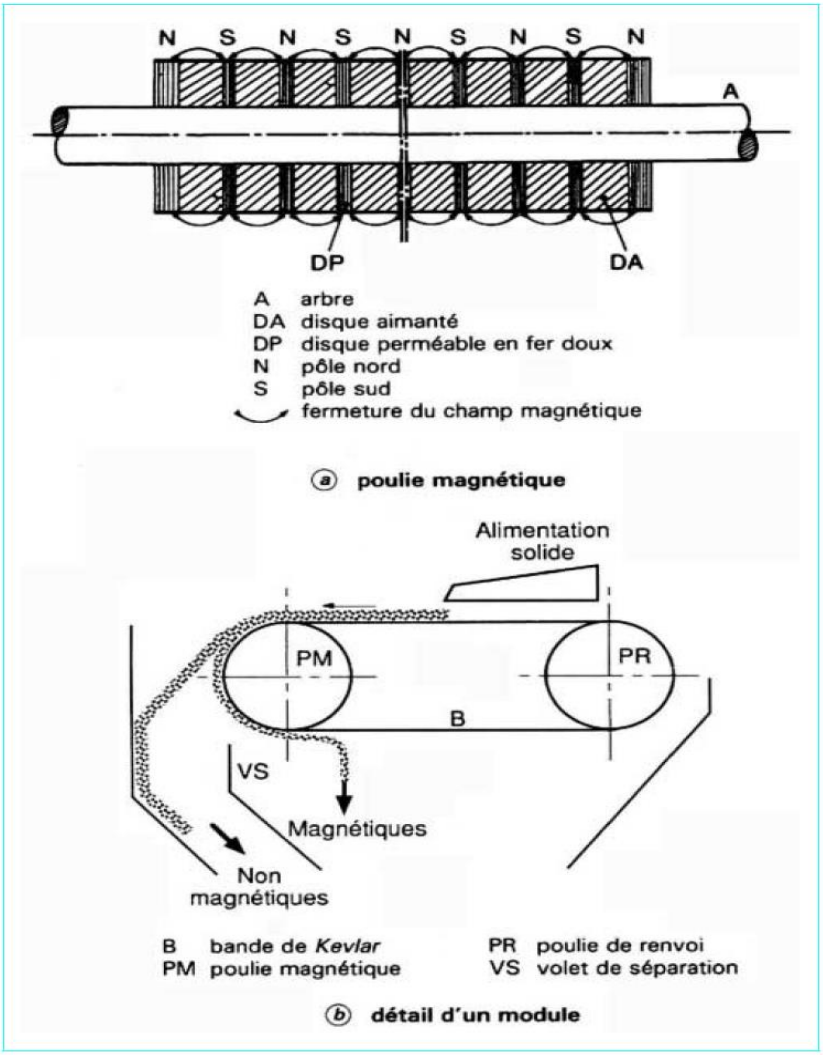


Figure III.15: Séparateur à haut champ et à aimants permanents *Permroll*.

Le séparateur standard a une poulie d'un diamètre de 72 mm pour 1 m de largeur, avec un débit moyen de l'ordre de 10 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$. Suivant le type d'opération, ce débit varie de 1 à 5 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$ (suivant le degré d'épuration voulu) à 40 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$ (pour la concentration de produits grossiers). Les dimensions de grains acceptables pour le traitement vont de 45µm à 25mm, mais peuvent dans certains cas être supérieures à 100mm. Les unités industrielles peuvent comporter jusqu'à trois étages de traitement. Les bandes transportant la matière sont en *Kevlar* et peuvent avoir différentes épaisseurs (0,13, 0,20 et 0,70mm) ; ces dernières s'adaptent à la granulométrie du produit à traiter ou à l'intensité du champ magnétique nécessaire à la séparation. Les modules industriels sont pourvus d'un dispositif de centrage de bande à commande électronique et d'un système antistatique (pour éviter l'adhérence électrostatique des produits fins).

Ce séparateur est construit pour des applications industrielles dans le domaine de l'épuration de matériaux et de minéraux divers comme des feldspaths (élimination des micas),

des andalousites, ou du diamant. Sur le plan économique, ces dispositifs ont également l'intérêt :

- de nécessiter des investissements plus faibles que les séparateurs électromagnétiques conventionnels (de l'ordre de 50 %, ramené à la tonne traitée) ;

- d'entraîner de très faibles consommations énergétiques, limitées aux transports des solides et à la rotation de la pièce polaire (faible coût de maintenance et de traitement) ;

- de permettre, le plus souvent, le traitement direct d'un produit non préalablement traité par séparation magnétique à basse intensité, le décrochage des particules ferromagnétiques étant garanti par les dispositifs prévus pour l'ensemble des produits magnétiques ;

- de fournir des unités de plus faible poids (10 fois moins lourdes) et d'encombrement au sol réduit (50 %) vis-à-vis des séparateurs à rotor induit.

Les principales contraintes et limitations sont par contre essentiellement dues :

- à l'intensité maximale des champs magnétiques qui est atteinte à l'heure actuelle pour les aimants à Fe-Nd (≈ 1600 kA/m) qui sont les plus sensibles à la chaleur, leur aimantation s'altérant rapidement à des températures voisines de 100^{o} C (or, beaucoup de traitements s'effectuent à la sortie d'un four) ;

- à la faible épaisseur de la zone de champ magnétique, imposée par la recherche de gradients élevés, qui influe grandement sur la force magnétique appliquée à des particules de fortes dimensions et de formes variées ;

- aux conditions de séparation qui ne peuvent être contrôlées que par la vitesse de la poulie ou de la bande ;

- aux risques de pollution des produits séparés par des ultrafines adhérant à la bande par effet électrostatique ou à l'impossibilité ou à la difficulté de traiter des produits fins (dégradation de la séparation à partir de 30- 40 µm).

La capacité *Q* d'un séparateur à bande peut être exprimée par la relation :

$$\boldsymbol{Q = l\, v\, f\, r\, \rho}$$

Avec ;

- f fraction d'alimentation couvrant la bande,
- l largeur de la bande, (m)
- r rayon de la particule, (m)
- v vitesse de la bande, (m/s)
- ρ masse volumique de l'alimentation. (kg/m3)

Cette capacité peut être augmentée par :

- l'augmentation de la largeur de bande (1,5 m est la limite technique maximale) ;
- l'augmentation de la vitesse de bande ;
- l'augmentation du rayon de la poulie magnétique d'entraînement de la bande.

CHAPITRE IV SEPARATION MAGNETIQUE A HAUT GRADIENT DE CHAMP (SMHG) ET/OU A HAUT CHAMP

Introduction

Les circuits classiques (électroaimants, aimants permanents) ont, malgré tout, de gros inconvénients (saturation magnétique rapidement atteinte, mauvaise récupération des particules de dimensions inférieures à 25 μm, rémanence du circuit, risque de colmatage, appareils lourds et encombrants). Ces techniques permettent d'obtenir un champ magnétique d'environ 1 600 kA/m dans le noyau même ou à la surface des pôles ; toutefois, ce champ ne peut être utilisé pour la séparation magnétique qu'à la condition de créer une discontinuité servant d'espace de séparation dans la culasse magnétique qui assure la fermeture des lignes de champ. Cet entrefer entraîne une réduction du champ magnétique disponible pour le tri, réduction en partie compensée par l'utilisation d'une matrice ferromagnétique. Ces inconvénients ont poussé les utilisateurs et les constructeurs à chercher de nouveaux matériaux et de nouveaux générateurs de champ magnétique.

La tendance actuelle est de remplacer les masses magnétiques induites par des solénoïdes (en cuivre ou supraconducteur). Les séparateurs à solénoïdes présentent l'avantage d'effectuer la séparation à l'intérieur même de la bobine d'induction où l'on a mis une matrice de type laine de fer ou plaque de métal expansé, dans laquelle seront retenues les fines particules paramagnétiques.

IV. 1. Présentation générale

Ces séparateurs existent en deux versions, une cyclique (solénoïdes en cuivre ou supraconducteur), de capacité pouvant atteindre 200 t/h, et une autre, de fonctionnement continu, à carrousel, pouvant atteindre 800 t/h (solénoïde dipôle en cuivre). Les matrices utilisées en SMHG sont constituées d'empilages de grilles en métal expansé, de grillage, de laine ou de mousse de fer ou de billes.

L'utilisation de ce type de matrices d'extraction dans les séparateurs à haut gradient est parfaitement adaptée aux problèmes complexes rencontrés lors des opérations d'épuration ou de récupération de produits ultrafins.

Le principe (figure IV.**1**) de la séparation magnétique à haut gradient et haut champ consiste à produire, au moyen d'éléments ferromagnétiques fins, de fortes hétérogénéités dans un champ magnétique extérieur à l'origine homogène. Il en résulte des centres de forces magnétiques de faibles portées, sur lesquels sont piégés les produits paramagnétiques. Le volume interne de la bobine est équipé d'un **canister** (**boîte d'extraction remplie d'une matrice d'extraction** (Figure **1**). Ce canister comporte des tuyauteries pour la circulation de la suspension et de l'eau de lavage, ainsi que pour la récupération des produits de séparation. Quand le champ magnétique est appliqué, on fait passer la pulpe à travers la matrice ; les

particules dont la susceptibilité magnétique est suffisamment élevée sont attirées sur les fibres de la matrice, et les particules non magnétiques quittent le système (figure IV. **1-*a***). Lorsque la capacité de rétention de la matrice est atteinte, l'alimentation est arrêtée, un lavage à l'eau est effectué sous champ pour nettoyer la matrice des particules mixtes ou piégées mécaniquement, puis le champ magnétique est ramené au voisinage de zéro, afin d'expulser, par de l'eau sous pression, les particules magnétiques (figure IV.**1-*b***). L'alimentation peut alors reprendre. Ces différentes opérations constituent le cycle de fonctionnement du séparateur.

IV. 2. Matrices et capacité d'un séparateur à haut gradient

IV. 2.1 Les matrices

En ce qui concerne l'optimisation et l'adaptation des matrices, dans un séparateur SMHG, il a été montré, que le rapport $\lambda(D/d)$ peut atteindre une valeur 10 sans affecter l'efficacité de l'opération de traitement.

Essayer d'optimiser le rapport $\boldsymbol{\lambda}$ de la force d'attraction magnétique à la force d'entraînement du fluide tend généralement à assimiler le phénomène de capture à un mécanisme de filtration. Si le rapport $\boldsymbol{\lambda < 10}$, ce mécanisme de filtration est dominant et conduit à la formation d'un dépôt de matière sur la matrice, ce qui augmente la résistance au fluide. Le phénomène de filtration mécanique doit être au maximum évité dans les opérations industrielles et pour cela, il est nécessaire d'avoir un rapport $\boldsymbol{\lambda >> 10}$.

Les analyses théoriques d'adaptation de matrice à partir des modèles sont complexes et, en réalité, un grand nombre de résultats expérimentaux montrent que les performances minéralurgiques ne sont pas dégradées pour des valeurs de $\boldsymbol{\lambda}$ variant entre 100 et 200. Les critères pour sélectionner la forme optimale des éléments collecteurs d'une matrice sont souvent moins précis que ceux qui définissent la dimension. Des formes variées de matrice sont utilisées, comme les plaques dentées, les barreaux, les billes, les grillages, la laine de fer et le métal déployé. En plus du critère de dimension, certaines matrices sont caractérisées par leur **facteur de remplissage *F*** ou par leur **pourcentage de vide $\boldsymbol{\varepsilon}$** :

$$\boldsymbol{F = \text{volume de la matrice / volume de la chambre de séparation}}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon = 1 - F}$$

Le pourcentage de vide d'une matrice change en fonction du temps avec l'accumulation de la matière et peut se mettre sous la forme :

$$\boldsymbol{\varepsilon = \varepsilon i - \sigma d / 1 - \varepsilon d}$$

Avec :

$\boldsymbol{\sigma d}$ le volume de matière déposée par unité de volume de matrice,
$\boldsymbol{\varepsilon d}$ **et** $\boldsymbol{\varepsilon i}$ respectivement le pourcentage de vide du dépôt et de la matrice propre.

Une matrice doit effectivement offrir un maximum d'efficacité de collecte, un minimum de reluctance magnétique, une bonne perméabilité au fluide, mais également une bonne facilité de nettoyage. Le tableau IV.**1** donne les facteurs de remplissage des principaux types de matrices. Dans presque toutes les opérations de traitement magnétique, une certaine proportion de matière alimentée dans le séparateur sera retenue mécaniquement. Ce piégeage mécanique est accentué dans les cas des particules grossières et/ou d'utilisation de matrice fine.

En règle générale, pour les particules fines **(<10µm),** la capture mécanique est pratiquement constante, quel que soit le type de matrice. Avec une granulométrie inférieure à **25µm**, le piégeage mécanique augmente très lentement avec la diminution de tailles des éléments de la matrice, et ce n'est qu'à partir de **50µm** que cet effet se fait réellement sentir avec des matrices de type laine ou mousse de fer.

La hauteur de la matrice est également un paramètre important dans la mesure où elle peut contribuer à un accroissement du pouvoir de rétention mécanique, mais surtout dans la mesure où elle déterminera le temps de rétention des particules dans le champ.

Simultanément, la puissance électrique consommée, la masse du séparateur, les baisses de pression d'eau de lavage dépendent aussi de la hauteur de la matrice. Dans la plupart des cas d'épuration (minéraux industriels, eaux, fluides...) de particules paramagnétiques fines (< 50µm maximum), sur des appareils industriels continus ou cycliques, la hauteur de la matrice varie entre 80 et 200mm (figure IV.**2**). À résultats équivalents, une diminution de hauteur peut avoir des répercussions économiques non négligeables (réduction de la hauteur des pièces polaires et de la bobine ; consommation moins importante aussi bien d'acier pour le circuit de fermeture du champ et du conducteur pour le bobinage (Cu, Nb-Ti), et donc de la puissance électrique installée.

L'efficacité d'une matrice d'extraction va également dépendre de la matière qu'elle peut retenir. Quantitativement, le nombre de particules minérales, que la matrice peut accumuler avant de voir son efficacité de capture diminuer, est exprimée par la notion de chargement de matrice, pour laquelle plusieurs définitions sont possibles.

En minéralurgie, quatre expressions peuvent être utilisées :

$\boldsymbol{L_{F1}}$ = masse de solide de l′alimentation / masse de matrice

Avec : $\boldsymbol{L_{F1}}$ sans dimension,

$\boldsymbol{L_{F2}}$ = masse de solide de l′alimentation / surface de matrice

avec :$\boldsymbol{L_{F2}}$ en kg . m^{-2} ou g . cm^{-2},

$\boldsymbol{L_{F3}}$ = masse de solide de l′alimentation/ volume de matrice

Avec : $\boldsymbol{L_{F3}}$ en kg . m^{-3} ou g . cm^{-3},

L_M= masse du produit magnétique / volume de matrice

Avec: L_M en kg . m^{-3} ou g . cm^{-3},

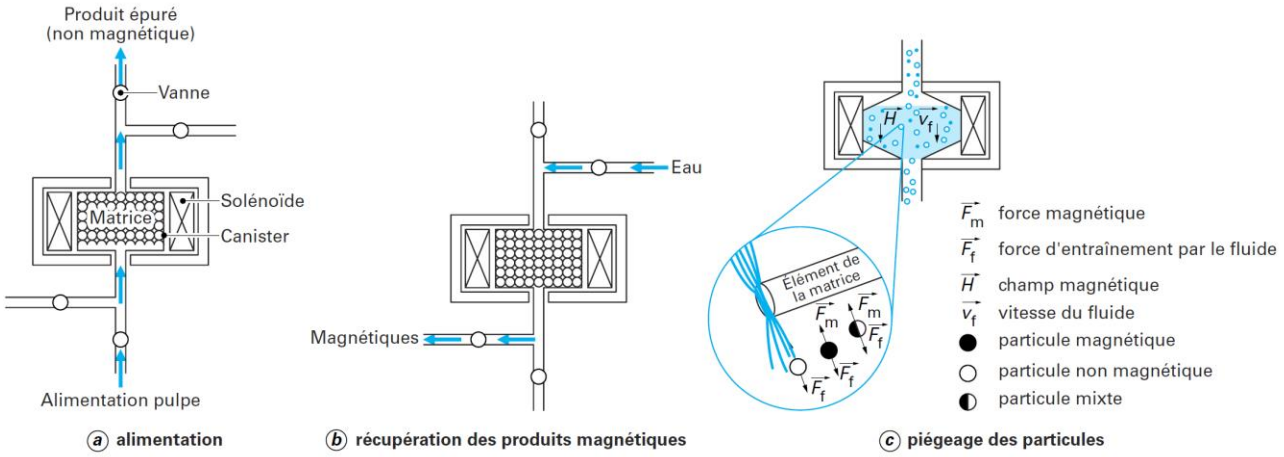


Figure IV. 1 : Schéma de principe du séparateur à haut gradient

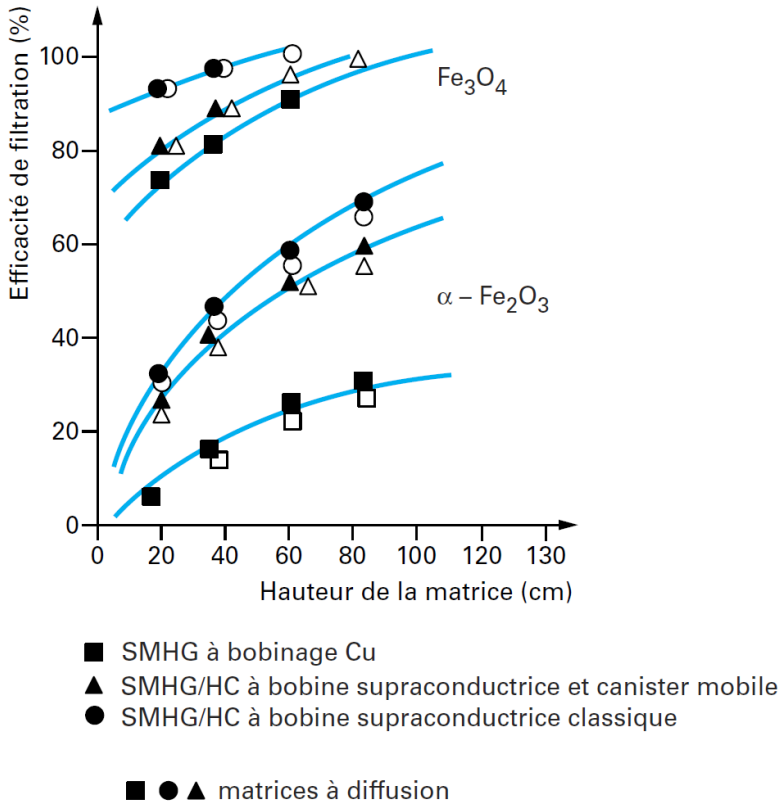


Figure IV. 2 : Efficacité de filtration (eau industrielle) en fonction de la hauteur de matrice

« Volume de matrice » : volume des éléments de matrice dans la chambre de séparation (canister).

L_{F3} est l'expression la plus utilisée, car la plus commode, et décrivant très bien la capacité de chargement d'une matrice dans la plupart des cas simples, où le rendement en masse dans la fraction magnétique varie peu. L_M est plus appropriée pour caractériser un procédé de séparation appliqué à différents minerais ou différentes matrices, puisque c'est la masse des produits magnétiques et non de l'alimentation qui est utilisé pour définir le degré de chargement. L'inconvénient est que ce dernier, bien souvent, ne peut être connu avant la séparation.

En concentration, les effets de chargement de matrice n'affectent pas seulement la récupération, mais aussi la teneur du concentré. En règle générale, avec une augmentation du chargement, on constate une diminution de récupération et une augmentation de la teneur du concentré magnétique. Le phénomène inverse est observé pour les opérations d'épuration où le produit de valeur est représenté par les éléments non magnétiques. Ce paramètre est important dans les opérations de séparations magnétiques dans la mesure où il définit la capacité du séparateur, la vitesse de rotation pour les appareils de marche continue (carrousel) ou la durée du cycle de fonctionnement (alimentation, lavage, expulsion) des machines cycliques. Le tableau IV. **2** donne quelques valeurs de chargement et de temps de chargement pour diverses applications.

Les modèles de séparation magnétique indiquent que la probabilité de capture des particules sur un élément de matrice est directement proportionnelle à la saturation magnétique du matériau dont est composée la matrice.

Le choix des matériaux entrant dans la composition d'une matrice doit être dicté par ses propriétés magnétiques. La polarisation magnétique à saturation doit être suffisamment élevée **(> 0,5 T, de préférence 2 T)** pour avoir une efficacité acceptable. Par contre, la polarisation rémanente doit être la plus faible possible pour faciliter l'expulsion des produits magnétiques, mais surtout des éléments ferromagnétiques. Les matériaux les plus communément employés pour les matrices sont les aciers doux (bonnes propriétés mécaniques et magnétiques, faible résistance à la corrosion), et les aciers inoxydables (martensitiques, ferritiques, austénitiques).

Enfin, la rigidité structurale de matrice de type laine d'acier et/ou mousse de fer peut être améliorée par un traitement approprié, sans altérer le critère d'efficacité de capture ou de porosité, pour diminuer le pourcentage d'arrachement d'éléments collecteurs fins lors des différentes phases de traitement. Les nouvelles matrices « ***Diffusion Bonded Matrice*** » fabriquées par la Société Hitachi, à partir de fils (8 à 300µm) d'acier inoxydable ferromagnétique (SUS 430, 832 Fe, 182 Cr**)** répondent à ces critères. D'autres matrices de type « tricompact » en acier inoxydable mécanique, conçues par la société Gantois, donnent également d'excellents résultats, principalement en épuration de fluides industriels contenant des métaux dissous.

Tableau IV. 1 : Facteur de remplissage de différentes matrices

Matrices	Facteur de remplissage F	Diamètre des éléments (mm)	Gradient B_0 (T/m)
Billes	0,50 à 0,64	2 à 6	2×10^3
Mousse de fer	0,01 à 0,05	0,008 à 0,35	4×10^4
Métal déployé	0,12 à 0,27	0,030 à 4	6×10^3
Grillage (tissage métallique)	0,15 à 0,25	0,50 à 3	6×10^3
Tricot métallique	0,05 à 0,10	0,02 à 0,4	10^4
Plaques dentées	0,50 à 0,80	4 à 8 cannelures par 2,5 cm	2×10^3

Tableau IV. 2 : Chargement et temps de chargement de matrice de haut gradient pour différentes applications

Applications	**Masse d'éléments magnétiques dans l'alimentation**	**Débit par m^2 de matrice** ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)	**Temps de chargement**	**Matrices**	L_{F3} ($kg \cdot m^{-3}$)
Usines thermiques, électriques, nucléaires	0,1 mg/L	740	1 000 h	Laine de fer	4 000
Métallurgie : aciéries, laminoirs	< 100 mg/L	4pm	1 h 30 min	Laine de fer	9 000
Kaolin	8 g/L	52	12,5 min	Laine de fer	(non connu)
Ultrafine de minerais de fer	140 g/L	495	1,6 s	Métal déployé	100 à 1 000

IV. 2.2 Capacité d'un séparateur SMHG

- Les performances minéralurgiques d'un séparateur changent avec la vitesse d'écoulement de la pulpe et, de ce fait, cette dernière devient un facteur aussi important que le champ magnétique et la matrice pour l'efficacité de séparation. La vitesse de la pulpe s'écoulant au travers de la matrice détermine la force de cisaillement qui va agir sur les particules retenues à la surface des fils collecteurs, et aura ainsi un effet sur la teneur et la récupération du produit. En même temps, elle détermine le temps de rétention de la pulpe dans le champ et donc l'efficacité et la capacité du séparateur.

La vitesse de la pulpe intervient dans l'expression de la force hydrodynamique d'écoulement, force s'opposant à la force d'attraction magnétique et à la force d'adhérence

des particules. On peut voir immédiatement qu'une diminution ou une augmentation de la vitesse peut avoir des conséquences importantes sur l'efficacité de séparation et sur les résultats métallurgiques obtenus.

En épuration ou en filtration magnétique, une augmentation de la vitesse de la pulpe a pour effet de diminuer l'efficacité de piégeage et la qualité du produit obtenu. Cet effet varie bien sûr en fonction des caractéristiques magnétiques des éléments à piéger et du champ magnétique appliqué. La détermination de la vitesse d'écoulement de la pulpe, en concentration magnétique haut gradient, sera, dans le sens où le concentré est représenté par le produit magnétique, dictée par le but à atteindre : concentré à forte teneur ou à forte récupération. Il sera alors possible de déterminer les conditions opératoires pour faire fonctionner les séparateurs en régime de haute récupération (vitesse lente) ou de haute teneur (vitesse élevée).

- En pratique, dans une opération de concentration ou d'épuration, il est nécessaire d'arrêter l'alimentation (quand les éléments de matrice sont saturés) pour nettoyer le filtre, après un certain volume de pulpe d'alimentation (défini en **unité n_0 de volume de canister actif**). Le nettoyage se fait alors sous champ magnétique, avec un volume d'eau claire, correspondant à $n1$ volume de canister et à une v'_0 vitesse.

Produits magnétiques retenus sur les éléments de la matrice par un courant d'eau sous pression, avant de reprendre l'alimentation (une fois le champ magnétique ramené à sa valeur H_0).

Dans ces conditions de cycle, la **production d'alimentation d'un séparateur** peut être donnée :

— soit en mètres cubes par seconde ($m^3 \cdot s^{-1}$), par la relation :

$$P = v_0 A (1 - f) m n_0 / (_{n0} + n_1 + D/T) \qquad (1)$$

— soit en tonnes par heure (t/h) par la relation :

$$P = 3{,}6 v_0 A F L_{F3} \qquad (2)$$

Avec :
$T = L/v_0$ (s) temps de séjour,
L (m) longueur du filtre,
F facteur de remplissage,
L_{F3} (kg. m^{-3}) taux de chargement,
A (m^2) surface effective des filtrations (diamètre interne du canister),
m (kg) masse de solide dans la pulpe,
$1 - f$ fraction de particules sortant du système,

D (s) somme des temps pour monter et descendre le champ magnétique, expulser les produits magnétiques placés dans la matrice, etc. C'est ce qu'on appelle le **temps mort du séparateur**.

Le **cycle de fonctionnement du séparateur** est représenté par la quantité :

$$\boldsymbol{n_0T / (n_0T + n_1T + D)}$$

Industriellement, il est en effet intéressant de pouvoir connaître les caractéristiques qui peuvent améliorer la production, et diminuer les coûts de traitement. Celles-ci peuvent être définies comme étant représentées par :

— un cycle de fonctionnement élevé (temps mort minimal, capacité maximal) ;
— une grande efficacité d'épuration avec une production élevée ;
— une énergie consommée faible ;
— un coût d'investissement le plus faible possible ;
— un fonctionnement et une maintenance simple et à faible coût.

Dans cette catégorie de séparateurs, les deux types, qui existent, diffèrent uniquement par leurs systèmes générant le champ magnétique : bobines résistives en cuivre ou bobines supraconductrices.

Les principaux désavantages des appareils classiques à haut gradient (bobinage cuivre) SMHG, tels qu'ils existent actuellement, sont les puissances installées de l'ordre de 400 à 600 kW pour maintenir un champ magnétique de fonctionnement relativement bas (2 T maximum) et une grande quantité d'acier doux entrant dans la conception du circuit magnétique, afin de canaliser les lignes de force, et éviter les fuites magnétiques. De plus, le système de matrice fixe, qui demande à être nettoyée à la fin de chaque cycle d'alimentation, peut entraîner des cycles de fonctionnement peu élevés ou des « temps morts » importants. Tout cela conduit à un investissement lourd et à des coûts opératoires plus élevés pour des capacités moyennes des unités de production.

Il est peut-être intéressant de pouvoir estimer le rapport *Ps*/*Pc* de la capacité des séparateurs supraconducteurs (*Ps*) à celle des séparateurs classiques (*Pc*) de même dimension comme étant une fonction du rapport B_0s/B_0c (avec B_0 induction magnétique) pour une opération d'épuration similaire.

Exemple : les données caractéristiques pour un séparateur classique traitant des argiles kaoliniques sont :

$v_0c = 10{-}2\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}{-}1$,
$Tc = 50$ s,
$n_0c = 4$ à 8,
$n_1c = 1$,

Dc = 100 à 200 s.

Les données correspondantes pour un séparateur supraconducteur deviennent (en admettant que la performance du séparateur est une fonction de $B0T$) :

$v_0s = qv0c$,
$Ts = Tc\ /q$,
$n_0s = n0c$,
$n_1s = n1c = 1$,
Ds = 10 à 30 s,

Pour les séparateurs supraconducteurs Ds correspond au temps de remplacement du canister après l'alimentation [la technologie des séparateurs supraconducteurs peut être conçue de façon à recevoir un canister mobile afin de diminuer le temps mort (séparateur Carpco SMS – Outokumpu)].

Le rapport Ps /Pc peut alors être calculé en utilisant l'expression de P [relation (1) ou (2)]. Les résultats donnés à la figure **3** montrent que, pour q environ > 1, les capacités des séparateurs supraconducteurs sont considérablement plus élevées que celles des appareils classiques, toutes dimensions étant conservées.

- Enfin, un autre facteur intéressant, dans le cas des systèmes supraconducteurs, est le rapport de puissance électrique installée et consommée. Dans une première approximation, l'on peut considérer comme seule consommée la puissance requise pour la compression de l'hélium gazeux dans les systèmes de réfrigération autonome et continue. Certains liquéfacteurs peuvent en effet avoir une production de 7 L d'hélium liquide avec une puissance installée de seulement 30 kW, et cela pour un système de dimensions identiques aux appareils conventionnels opérant actuellement dans l'industrie du kaolin.

-Dans un séparateur continu, le cycle de fonctionnement est égal à l'unité, et la capacité dépend de la largeur de la matrice, de la vitesse d'écoulement de la pulpe, de la vitesse de déplacement de la matrice et du chargement de cette dernière.

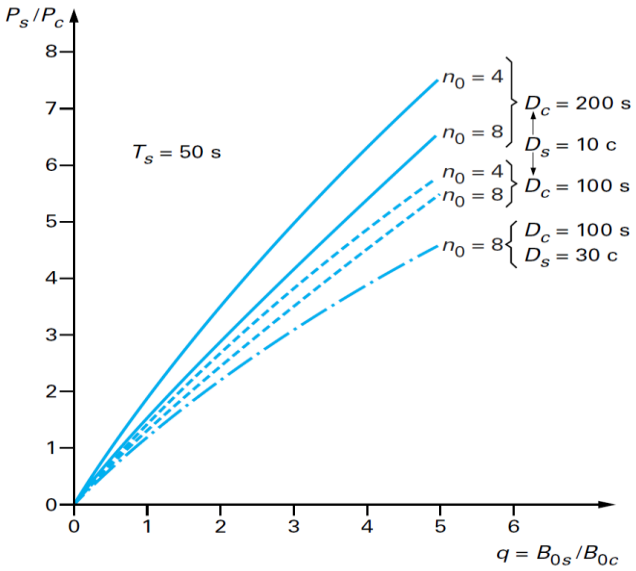


Figure IV. 3 : Rapport *Ps* /*Pc* en fonction de B_0s /B_0c pour des séparateurs supraconducteurs et classiques

Le temps de résidence de la pulpe dans la matrice est donné par la relation :

$$T = L/v0$$

et puisque la pulpe doit quitter le système quand elle est toujours sous l'influence du champ magnétique, la vitesse maximale permise pour le carrousel est :

$$v_c < lm\ V/L$$

Avec :

lm longueur de la zone magnétique,

V vitesse interstitielle de la pulpe dans la matrice.

La **capacité du séparateur** peut alors être représentée par :

$$\boldsymbol{Q = 3{,}6 L W V c L_M F / Rm}$$

ou par :

$$\boldsymbol{Q = 3{,}6\ L W V c L_{F3} F}$$

Avec :

Q capacité (en t/h),

$\boldsymbol{L_M}$ **et** $\boldsymbol{L_{F3}}$ taux de chargement (en kg · m_{-3}),

Rm rendement en masse de la fraction magnétique.

IV. 3 Séparateurs à haut gradient à bobinage en cuivre

Ces séparateurs existent en deux versions, l'une cyclique d'une capacité allant jusqu'à 100 t/h et l'autre à fonctionnement continu à carrousel pouvant atteindre 800 t/h.

IV.3.1 Séparateurs cycliques

Ces séparateurs (figures **4** et **5**) sont constitués d'un bobinage réalisé à partir d'un conducteur creux en cuivre de haute conductivité, isolé par des fibres de verre imprégnées de résine époxyde. L'enveloppe du solénoïde pour la fermeture du champ est en acier à bas taux de carbone. Le système réfrigérant comprend un échangeur de température et une pompe pour la circulation de l'eau (désionisée) de réfrigération à travers le bobinage et le générateur de puissance.

Les débits d'eau varient de 5 à 10 L/s (1,5 L · min−1 · kW−1). Le cœur de la bobine est rempli d'une matrice ferromagnétique de porosité très élevée (95 à 98 %). Ces séparateurs fonctionnent suivant trois phases : alimentation, puis rinçage sous champ, enfin expulsion des produits magnétiques.

Les caractéristiques de ces appareils, commercialisés par Svedala, Pacific Electric Motor (PEM) ou Eriez et parfois dénommés filtres magnétiques, sont données dans le tableau IV.**3**.

Ces séparateurs sont principalement utilisés dans l'industrie du kaolin (États-Unis, Tchécoslovaquie, Angleterre), mais aussi dans le domaine de l'épuration de l'eau urbaine (États-Unis) ou de la filtration de l'eau de recirculation (aciérie-laminoir) de la sidérurgie (États-Unis, Suède, Japon), ou de centrale thermique (États-Unis, Japon).

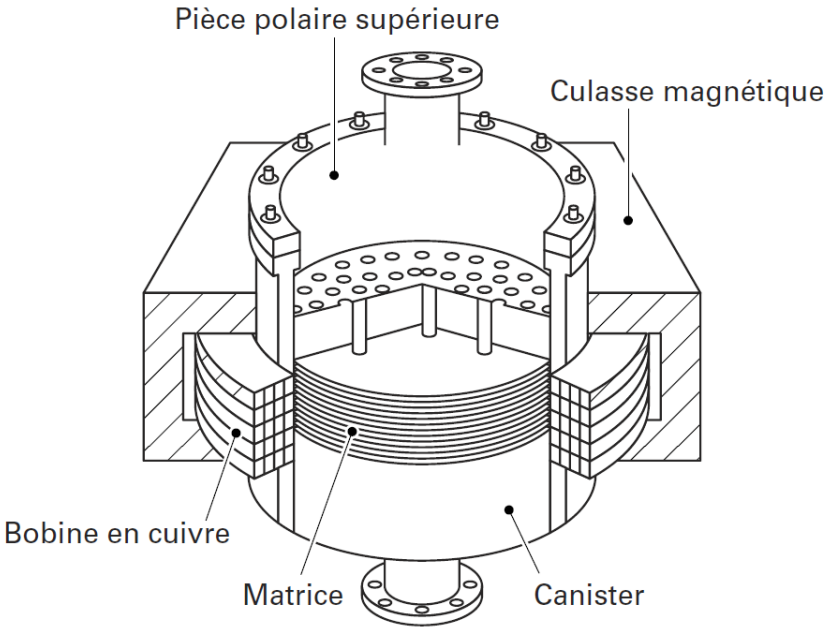


Figure IV. 4 : Séparateur à haut gradient à bobinage de cuivre (Doc. Sala/ Svedala)

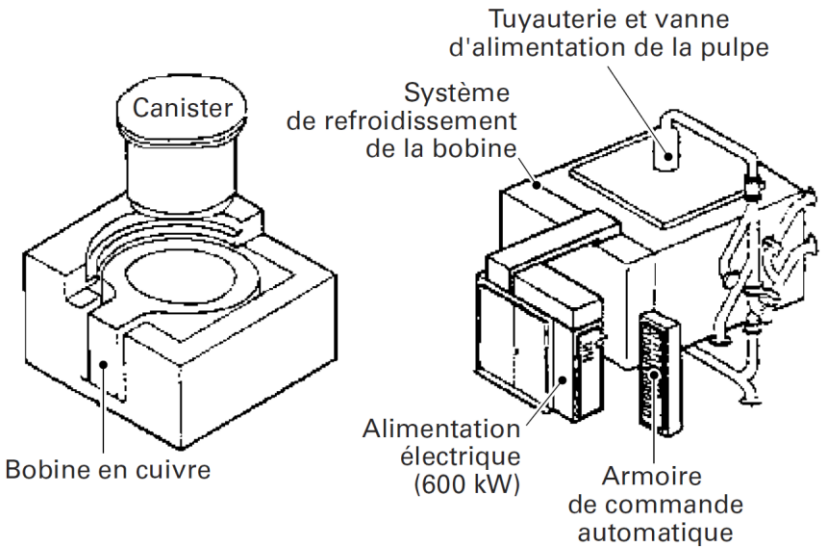


Figure IV. 5 : Séparateur à haut gradient à bobinage de cuivre (Doc. PEM)

Tableau IV.3 : Caractéristiques des séparateurs cycliques

Diamètre du canister .....(m)	0,1 à 3,05
Hauteur de matrice .....(cm)	15 à 50
Capacité de traitement .....(t/h)	2 à 100
Vitesse de passage de la pulpe.....(cm/min)	10 à 100
Temps de rétention.....(s)	30 à 120
Champ magnétique .....(kA/m)	jusqu'à 1600
Puissance électrique installée.....(kW)	100 à 600
Masse des appareils .....(t)	400

IV. 3.2 Séparateurs à fonctionnement continu

Suivant les constructeurs (Krupp ou Sala), deux conceptions magnétiques existent.

- Dans l'appareil développé par Krupp, le carrousel traverse le solénoïde. Les lignes de force magnétique sont donc dans le même sens que la rotation du carrousel. Cette solution n'est pas très satisfaisante car elle conduit à une mauvaise utilisation de l'excitation magnétique, du fait de l'absence de culasse de fermeture de champ magnétique, et à une augmentation de la consommation électrique. Par contre, elle a l'avantage de diminuer le besoin en acier doux et d'alléger l'appareil.

- Le séparateur construit par Svedala (figure IV. **6**) comporte un générateur de champ constitué par deux bobinages allongés en cuivre (solénoïde dipôle) entre lesquels passe le carrousel. Le solénoïde dipôle comprend une culasse de fermeture de champ en forme de grille, sur les faces supérieure et inférieure, de façon à laisser passer la pulpe et l'eau de rinçage. Le carrousel est équipé de compartiments renfermant la matrice (laine ou mousse de fer, grille de métal expansé). Cette conception permet d'avoir, comme dans les appareils

cycliques, la direction du champ magnétique parallèle à la direction d'écoulement de la pulpe. Cette dernière est alimentée à l'entrée du solénoïde dipôle, la fraction retenue dans la matrice est lavée ; puis le produit magnétique est extrait à la sortie du circuit magnétique. Ces séparateurs ont un carrousel (1,2 à 4,8 m de diamètre) pouvant supporter jusqu'à 4 têtes magnétiques (4 bobines) d'une masse comprise entre 2 et 300 t suivant le champ magnétique développé (400 à 1 600 kA/m). Les capacités de traitement par tête varient quant à elles de 3 à 200 t/h.

- Pour l'instant, aucune unité industrielle n'est installée définitivement dans l'industrie minérale. Seules des installations pilotes de fort tonnage sont en démonstration sur divers sites (usine de Strassa, en Suède par exemple). La consommation énergétique des appareils à haut gradient à bobinage en cuivre est comprise entre 0,5 et 15 kWh/t, suivant la conception du circuit magnétique (culasse de fermeture ou non, et champ magnétique développé).

IV.4. Séparateurs à haut gradient et à haut champ à bobine supraconductrice

IV.4.1 Généralités

Comme les séparateurs à haute intensité, les séparateurs à haut gradient présentent des inconvénients majeurs quand le champ magnétique nécessaire à la séparation dépasse 800 kA/m :

— puissance électrique installée élevée (≈ 400 kW) ;
— énergie électrique consommée élevée (en moyenne 5 kWh/t) ;
— complexité du système de refroidissement et forte consommation d'eau désionisée (1 L/kW installé) ;
— forte consommation d'acier (300 t).

Pour la **séparation de particules ultrafines** (< 5µm), de susceptibilité magnétique faible, des densités de forces magnétiques supérieures à 1011 N/m3 sont nécessaires. Avec les circuits classiques, cela n'est pas réalisable techniquement ou économiquement (saturation magnétique du circuit ou de la matrice) puisque l'élévation de champ au-dessus d'une valeur de 1 600 kA/m n'est pas possible.

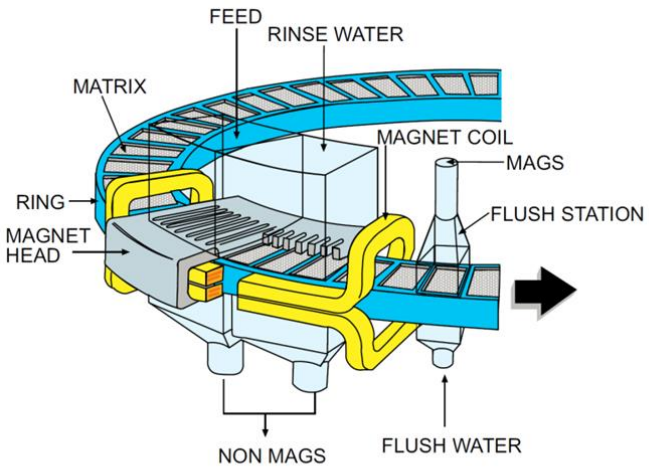
Pour obtenir de telles valeurs, l'emploi de bobines supraconductrices s'impose. Un aimant supraconducteur génère en effet un champ magnétique élevé ou une forte excitation magnétique non réduite par la saturation du fer. Cela procure les avantages suivants :

— une augmentation de la force d'attraction magnétique (× 25 dans certains cas) qui permet de piéger des particules de l'ordre du micromètre ;
— une diminution de la puissance électrique installée et de la consommation d'énergie électrique (≈ 90 %) ;
— une réduction de la masse (≈ 50 %) et de l'encombrement des appareils (≈ 35 à 40 %) ;

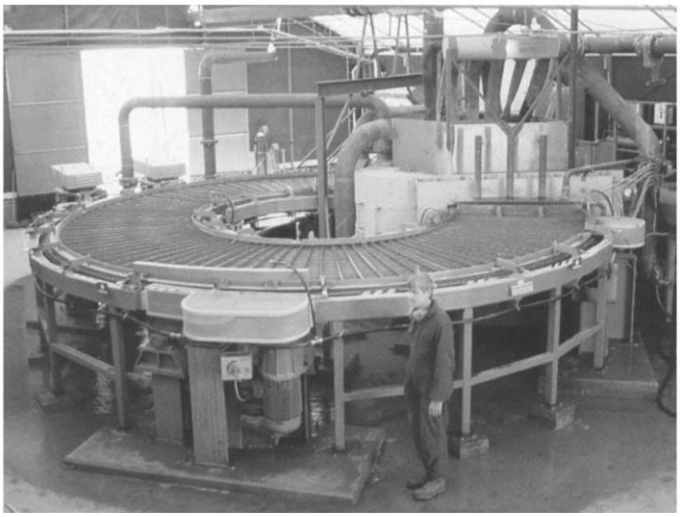
— une augmentation des capacités de traitement par augmentation de champ magnétique ;
— un élargissement des domaines d'utilisation de la méthode ;
— le remplacement de schémas de traitement complexes et onéreux.

L'utilisation des supraconducteurs Nb-Ti à une température de 4,2 K est bien maîtrisée. Le problème n'est pas technique mais économique : investissement (coût de la bobine) et fonctionnement (consommation d'hélium liquide ou coût de réfrigération).

Les appareils supraconducteurs fonctionnent suivant trois modes : matrices d'extraction, gradient ouvert et tambour. Ces séparateurs n'ont pas dépassé, pour la plupart, le stade de l'unité pilote.



ⓐ Schéma de principe



ⓑ vue générale

Figure IV.6 : Séparateur à haut gradient continu en voie humide à bobinage en cuivre (Doc. Sala/Svedala)

IV. 4.2 Séparateurs à matrice d'extraction

Ces appareils travaillent dans une gamme de champs magnétiques comprise entre 1 600 et 4 000 kA/m et fonctionnent le plus souvent cycliquement de la même manière que les séparateurs à haut gradient à bobinage en cuivre. Leur technologie est la même sauf que le bobinage en cuivre est remplacé par un bobinage supraconducteur Nb-Ti immergé dans une enceinte isolée contenant de l'hélium liquide. Le conteneur d'hélium est entouré de plusieurs couches isolantes et d'une paroi thermique refroidie à l'azote liquide afin de diminuer la consommation d'hélium. Un système de récupération de l'hélium gaz ou de liquéfaction peut compléter l'appareillage.

- Le séparateur développé par la société Eriez (figure IV.**7**) reprend ce système. Ce type de séparateur est en fonctionnement depuis 1986 à la Compagnie J.M. Huber Corporation sur les sites miniers de Géorgie (États-Unis) et de Caroline du Sud pour épurer des argiles kaoliniques. Ces séparateurs fonctionnent sous un champ magnétique de 1 600 kA/m pour une puissance électrique installée d'environ 60 kW (compresseur et cryogénérateur compris). Le canister, rempli d'une matrice de type mousse de fer, a un diamètre de 2,14 m et une profondeur de 0,5 m. Le système magnétique (bobine-cryostat), entouré d'une légère enveloppe d'acier doux pour la fermeture du champ magnétique, a une masse de 230 t. Le liquéfacteur (compresseur, récupérateur de gaz, cryogénérateur) a une production d'hélium de 20 L/h. Cette première installation commerciale a pu donner quelques indications sur les coûts de fonctionnement et montrer l'intérêt et la supériorité des bobinages supraconducteurs par rapport aux bobinages en cuivre. Le gain de consommation électrique est compris entre 80 et 90 % (suivant que l'on incorpore un liquéfacteur ou non), ce qui représente une économie de l'ordre de 150 000 $/an. La consommation d'hélium liquide donnée par le constructeur est (sans liquéfacteur) de 2 L par cycle (montée, maintien et descente du champ) pour un temps de montée en champ magnétique de 1 min.

Dans le traitement des kaolins, il faut compter deux cycles de fonctionnement à l'heure (capacité ≈1200 t/h). Ces systèmes permettent également de réduire les coûts d'installation dans le sens où l'occupation au sol et la masse sont respectivement diminués de 35 et 45 % par comparaison avec les appareils à hauts gradients à bobinage en cuivre. En 1990, Eriez a installé, pour le compte de la Compagnie J.M. Huber Corporation, une unité de séparateurs de 3 m de diamètre (500 t).

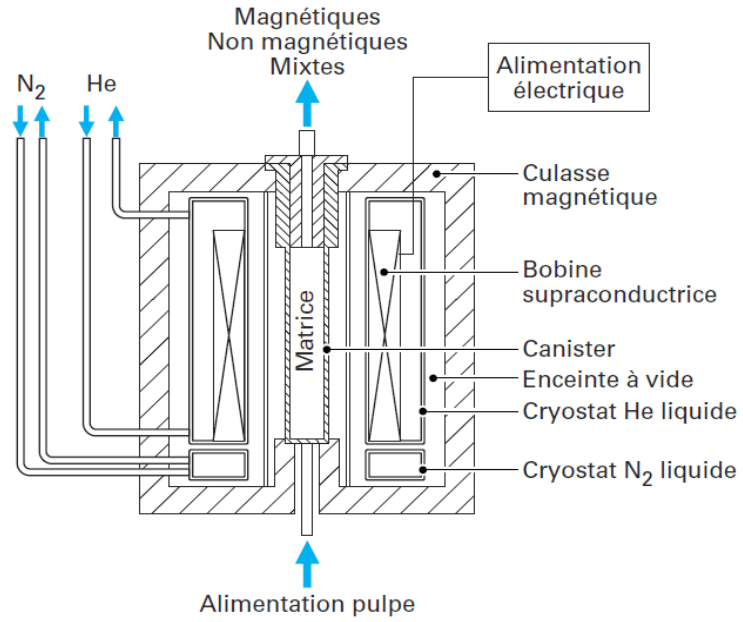
IV.4.3 Séparateurs à tambour

Ce sont des appareils à gradient ouvert reprenant la conception des tambours magnétiques où la couronne d'aimants permanents est remplacée par une série de bobines supraconductrices à bobinage plat.

Le séparateur Descos (figure IV. **9**), commercialisé par KHD Humboldt Wedag, développe un champ magnétique de 2600 kA/m à la surface du tambour. Les bobinages supraconducteurs sont disposés dans un réservoir cylindrique fabriqué en matériau isolant

contenant l'hélium liquide et maintenu sous vide. L'appareil est équipé d'une réfrigération autonome de grande souplesse et de maintenance facile. Le tambour, fabriqué à partir de fibres de carbone renforcées, a un diamètre de 1,20m pour une longueur de 1,5m. Le séparateur peut fonctionner en voie sèche ou en voie humide, avec une capacité de l'ordre de 100 $t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$. Sa granulométrie de traitement peut aller jusqu'à 100mm.

Une unité pilote a été testée avec succès pour différents minerais et minéraux industriels (magnésie en Turquie, bauxite, phosphate, etc.).



ⓐ **schéma de principe**



ⓑ **vue générale**

Figure IV. 7 : Séparateur à haut gradient en voie humide à bobine supraconductrice et à matrice d'extraction (Doc. Eriez)

- Les systèmes Cryofilter-HGMS (figure IV. **8**), comme celui développé par Cryogenic Consultants et commercialisé Carpco-Outokumpu (Grande-Bretagne), comportent un train de

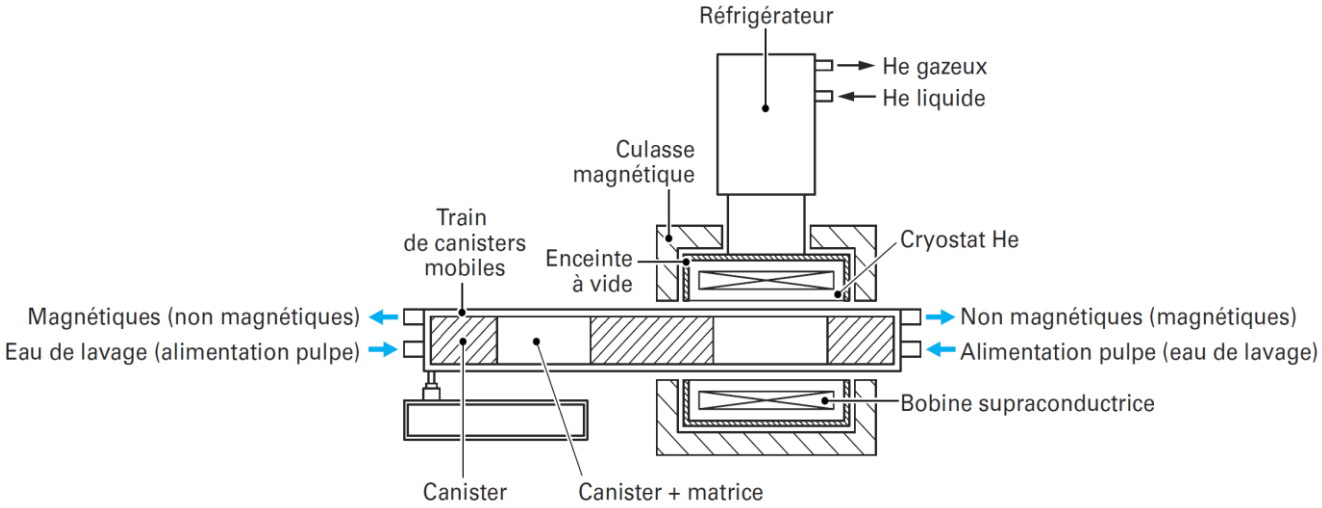
canisters mobiles et fonctionnent en continu. Ce train de canisters, mis en mouvement par un système hydraulique, est constitué par une succession de canisters de séparation et de boîtes vides pour faciliter le mouvement à l'intérieur de la bobine. Quand un canister est dans le champ magnétique, il est alimenté, puis extrait hors du système pour lavage, alors que le canister suivant se présente devant l'alimentation.

Ces systèmes peuvent être à bobines horizontales ou verticales. Ces séparateurs, développant un champ magnétique de 4000 kA/m dans une bobine de 0,3m de diamètre pour une longueur de 7,5 m, ont été installés en Angleterre et en Tchécoslovaquie pour traiter du kaolin (15 t/h). Ces appareils, d'une masse de 7 t, sont équipés d'un système de recyclage d'hélium et ont une puissance électrique installée de 12kW. Une version de capacité 30 t/h est également disponible chez le constructeur.

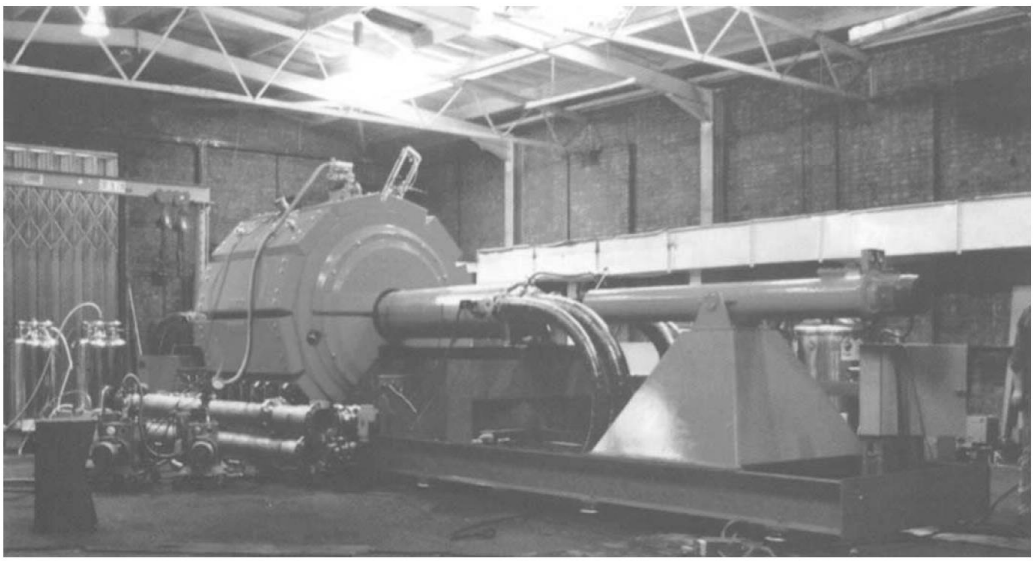
IV.4.4 Séparateurs magnétiques à gradient ouvert (SMGO)

Ces séparateurs sont encore au stade pilote et effectuent la séparation sans piégeage dans une matrice d'extraction. Ils ont été développés en 1975 en Angleterre par Oxford Instruments et Cryogenic Consultants en collaboration avec l'Imperial College. Ces appareils magnétiques sont conçus à partir d'un ensemble cylindrique de quatre solénoïdes supraconducteurs ou d'un système supraconducteur multipôle linéaire. Cette configuration spéciale génère des gradients de champ magnétique, donc des forces magnétiques élevées extérieures et orientées radialement. La séparation se fait à l'extérieur du système en continu, par déviation des particules en voie sèche. Le dispositif de séparation en voie humide comporte un chenal intérieur ou extérieur au système magnétique permettant la circulation de la pulpe et la séparation des éléments magnétiques et non magnétiques.

Deux séparatrices de ce type (l'une de 5 t/h, avec un chenal de 10 cm^2 de section, et l'autre de 30 t/h, avec une section carrée de chenal légèrement plus grande) ont été testées en Afrique du Sud (phosphate et charbon). Des essais ont également été réalisés sur des minéraux industriels (quartz, feldspaths) de granulométrie comprise entre 0,1 et 5mm. Les résultats des différentes séparations effectuées en gradient ouvert semblent montrer que l'efficacité de séparation chute fortement à partir de 50μm.



ⓐ schéma de principe



ⓑ vue générale

Figure IV.8 : Séparateur à haut gradient en voie humide à bobine supraconductrice et à matrice d'extraction mobile (Doc. Cryogenic Consultants – Outokumpu (Carpco))

IV. 5. Principaux domaines d'application de la SMHG

L'application de ces techniques a permis d'étendre la séparation magnétique à des minerais non économiquement valorisables par d'autres méthodes ou à d'autres secteurs d'activité. Cette méthode a surtout permis de repousser les limites techniques de séparation vers les particules ultrafines et pour des rendements d'épuration similaires, sinon meilleurs, présente un intérêt économique en ce qui concerne l'abaissement des coûts de fonctionnement.

Cette application se retrouve dans :

— l'épuration de produits destinés à l'industrie du verre ou de la céramique et qui demandent un taux d'épuration élevé (argiles kaoliniques, sables, syénites néphéliniques) ;

— l'élimination des sulfures des charbons pulvérulents destinés aux centrales thermiques ou électriques ;

— l'épuration des eaux industrielles (métallurgie et sidérurgie), des eaux urbaine, des eaux de refroidissement des centrales électriques, thermiques ou nucléaires, à des débits importants de l'ordre de 500 m3 · h−1 par mètre carré de surface de canister ;

— l'extraction de particules contenues dans les procédés de synthèse chimique, dans des alimentations de fluide énergétique ou de vapeur des centrales électriques ou thermiques ;

— la concentration de minéraux comme des ultrafines de Fe, Mo, W, terres rares ou de résidus métalliques pour le recyclage ;

— l'épuration de divers fluides industriels (industrie de traitement de surface, hydrométallurgie, industrie pétrolière) dans les domaines de l'environnement ou du recyclage ;

— le traitement des catalyseurs usés ;

— l'utilisation dans des domaines biochimiques, biologiques (production de plasma), alimentaires.

CHAPITRE V : LA SEPARATION ELECTROSTATIQUE

Introduction

La séparation électrostatique est généralement utilisée pour recycler les matériaux métalliques issus des déchets électroniques. Elle est utilisée avec succès dans le traitement des minéraux et l'industrie alimentaire. Cette technologie respectueuse de l'environnement utilise les propriétés électriques des matériaux pour les séparer. Les minéraux sont classés en trois groupes en fonction de leur conductivité électrique : non conducteurs, semi-conducteurs et conducteurs. Le tableau V.1 présente des exemples de minéraux conducteurs et non conducteurs.

Tableau V.1 : Minéraux typiques conducteurs et non conducteurs.

Minéraux Non-conducteurs	Minéraux Conducteurs
Apatite	Cassitérite
Baryte	Chromite
Calcite	Diamant
Charbon	Feldspath
Grenet	Or
Gypse	Hématite
Kyanite	Ilmenite
Monazite	Limonite
Quartz	Magnetite
Scheelite	Pyrite
Sillimante	Rutile
Spinel	Sphalérite
Tormaline	*stibine*
Zircon	Wolframite

Deux forces principales sont impliquées dans la séparation électrique : les forces électrophorétiques et les forces diélectrophorétiques. Les premières s'appliquent aux matières chargées dans un champ électrique, tandis que les secondes se produisent avec des matières neutres dans un champ électrique non uniforme. Cependant, la diélectrophorèse est rarement utilisée dans le traitement des minéraux. Avant d'utiliser la force électrophorétique pour la séparation des minéraux, une étape préparatoire est nécessaire pour améliorer le processus en fonction des différences de conductivité des minéraux. La séparation électrostatique est généralement considérée comme une technique basée sur la surface, similaire à la flottation par moussage, car la conduction électrique se produit principalement dans les couches superficielles des atomes.

Différents mécanismes peuvent être utilisés pour charger électriquement les matériaux, tels que le bombardement ionique, les méthodes thermioniques, la congélation, l'induction

conductrice, la charge par décroissance radioactive, la charge triboélectrique, l'émission de champ photoélectrique et la charge photoélectrique. Cependant, pour la séparation des particules minérales, trois mécanismes principaux sont utilisés :

- le bombardement ionique,
- l'induction conductrice
- la charge par frottement.

Le choix du type de séparateur dépend des caractéristiques des particules dans l'alimentation. Par exemple, lorsque l'alimentation contient du charbon et d'autres minéraux, la méthode de séparation choisie dépend des propriétés électriques du charbon et de ses impuretés. Les séparateurs triboélectriques peuvent être utilisés pour les matériaux isolants, tandis que le bombardement ionique peut recycler les matériaux non conducteurs à partir des matériaux conducteurs. Pour la séparation entre des matériaux conducteurs et des isolants ou entre des matériaux isolants et des conducteurs, l'induction conductrice peut être utilisée avec succès. Cependant, dans le cas de l'anthracite, seuls les séparateurs triboélectriques ont été utilisés. Les méthodes électrostatiques sont utilisées pour séparer divers mélanges minéraux et non minéraux.

V.1 Mécanisme de bombardement ionique (charge par corona)

La charge par corona en utilisant le bombardement ionique est un mécanisme où un champ électrique élevé est appliqué entre deux électrodes pour ioniser le gaz près des électrodes, créant ainsi une décharge de corona (un flux continu d'ions dans l'air). Les ions gazeux bombardent les particules minérales, provoquant une charge électrique à leur surface et permettant leur séparation. Ce mécanisme est similaire à celui utilisé pour éliminer les fines particules de poussière des flux de gaz dans les précipitateurs électrostatiques. Des études ont montré que la technique de bombardement ionique peut séparer efficacement différents matériaux.

Un exemple de dispositif utilisant ce mécanisme est le tambour à haute tension (HTR), composé d'un tambour rotatif en matériau conducteur, comme de l'acier, de décharges de corona, d'électrodes de corona alternées (CA) et d'une raclette de brosses. Les séparateurs HTR ont été initialement utilisés dans le traitement des sables minéraux lourds, puis ont été utilisés pour le nettoyage du charbon et la séparation des métaux des déchets plastiques. Dans le processus, les minéraux conducteurs déchargent les ions qu'ils reçoivent immédiatement après leur introduction dans le tambour rotatif, tandis que les particules non conductrices conservent les ions à leur surface et restent fixées au tambour. La force centrifuge générée par la rotation du tambour sépare ensuite les minéraux conducteurs de l'alimentation. Les particules minérales isolantes sont transportées et finalement détachées par les électrodes de corona alternées (CA) et la raclette de brosses. En raison du glissement possible des particules sur la surface du tambour, elles n'atteignent pas instantanément la vitesse du tambour, rendant le trajet exact des particules difficile à prédire.

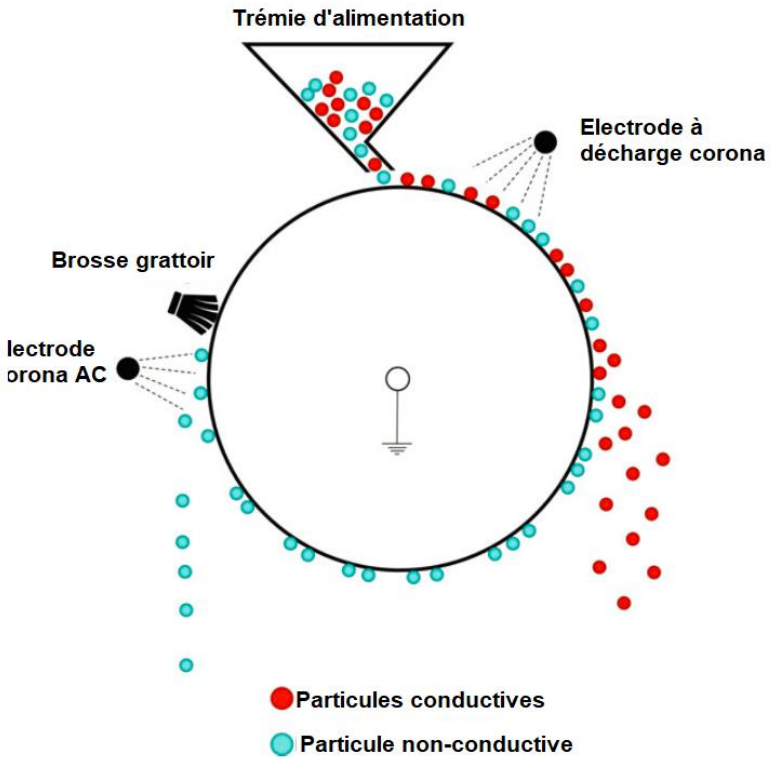


Figure V.1 : Mécanisme de charge Corona

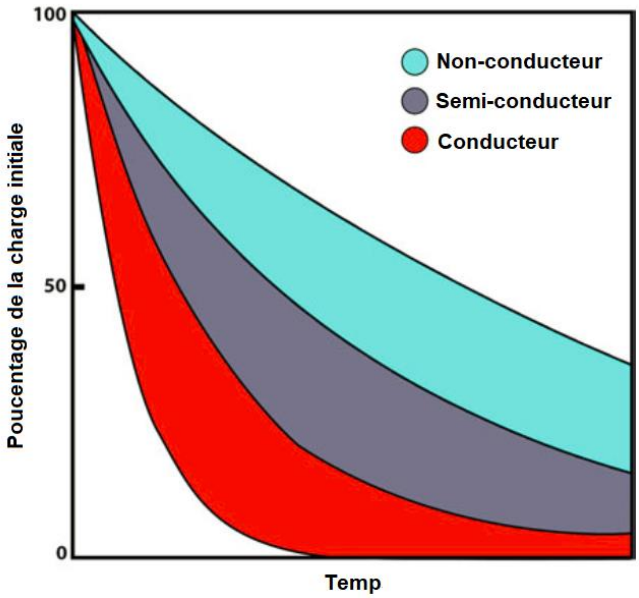


Figure V.2 : Courbes de chargement/ déchargement des particules

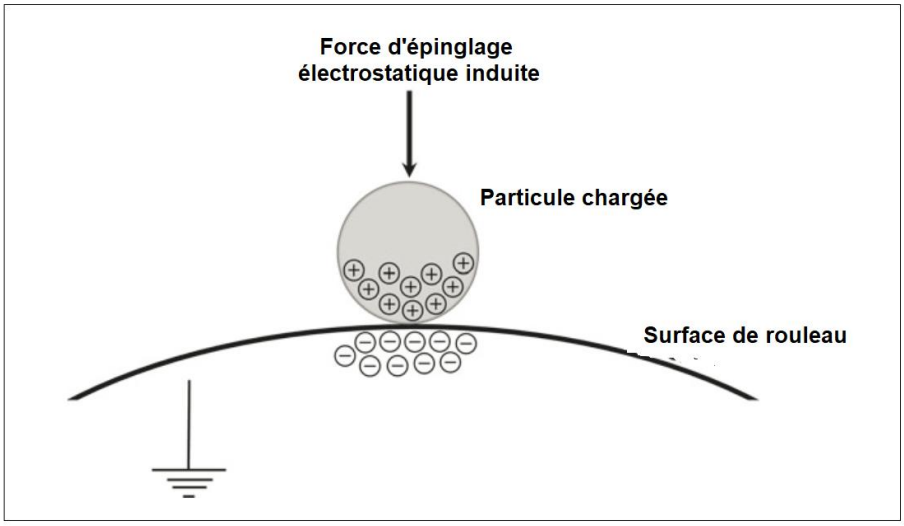


Figure V.3 : Force d'épinglage subie par une particule non conductrice dans les séparateurs HTR.

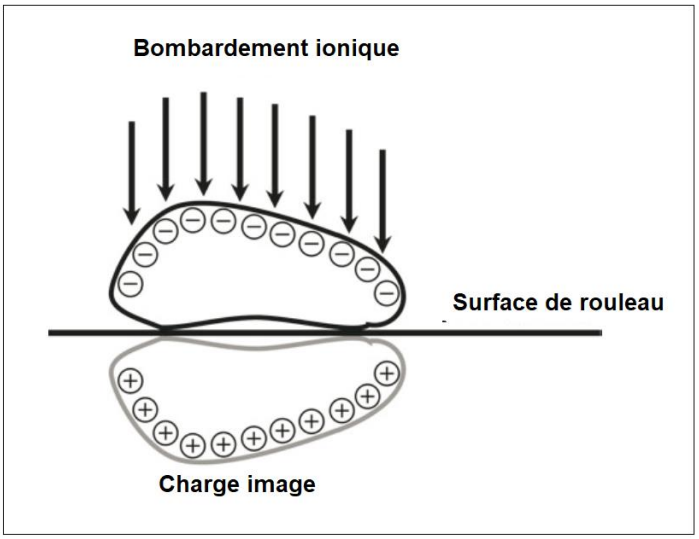


Figure V.4 : Le concept de force image pour une particule non conductrice.

Les séparateurs à haute tension peuvent être utilisés pour des alimentations avec des tailles de particules dans la plage de 60 à 500 µm. La taille des particules influence considérablement l'efficacité de la séparation. Pour les grosses particules, moins de charge électrique peut être obtenue à la surface par rapport à la masse des particules. Par conséquent, les particules minérales non conductrices plus grossières sont beaucoup plus facilement séparées de la surface du tambour. En revanche, les particules plus fines reçoivent plus de charge électrique. Cela entraîne, après l'opération de séparation, la présence de certaines fines particules conductrices dans la fraction non conductrice et vice versa. Cette contamination croisée a un effet négatif sur l'efficacité de la séparation. Ce phénomène peut être interprété par l'interaction entre la force centrifuge et la force d'image (Figure V.4), qui fixe les particules minérales chargées électriquement à la surface du rouleau.

La force centrifuge est fonction de la masse des particules, tandis que la force d'image est influencée par le changement de la surface des particules. En conséquence, la force centrifuge est dominante en termes de tailles de particules grossières. Outre la taille des particules de l'alimentation, d'autres paramètres affectent également l'efficacité de séparation des machines électrostatiques ; notamment la géométrie des électrodes, le diamètre du rotor, la vitesse de rotation, la tension, la polarité des électrodes, la densité des particules et la position du séparateur. Plus le diamètre du rotor est grand, plus la récupération sera élevée, tandis qu'un diamètre de rotor plus petit améliore la qualité de la fraction des particules conductrices.

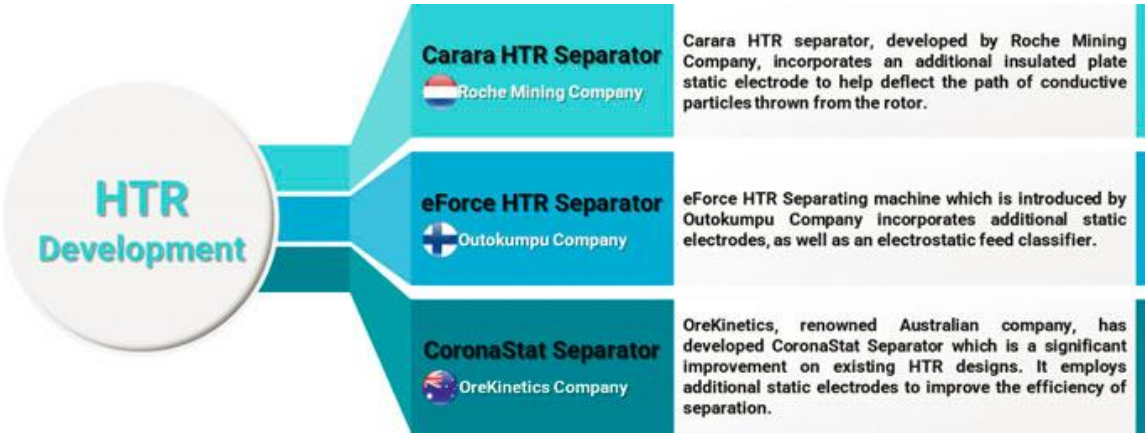


Figure V.5 : machines HTR développées Récemment.

L'effet de la vitesse de rotation du rotor sur la séparation peut être analysé de deux manières. D'une part, une augmentation de la vitesse permet aux particules minérales de perdre plus rapidement leur charge électrique, ce qui peut entraîner la présence de particules conductrices dans la fraction non conductrice. D'autre part, une vitesse de rotation plus élevée entraîne une force centrifuge plus importante, favorisant ainsi la présence de particules minérales non conductrices dans la fraction conductrice. En raison de cette interaction complexe, l'effet de la vitesse du rotor sur l'efficacité de séparation varie considérablement en fonction de la conductivité des particules.

Pour une séparation efficace, la présence d'au moins un minéral hautement conducteur dans l'alimentation est cruciale lors de l'utilisation du séparateur HTR. De grandes différences de conductivité minérale ne garantissent pas automatiquement une séparation efficace. Si toutes les espèces minérales sont non conductrices ou faiblement conductrices, cela peut nuire à l'efficacité de la séparation. En revanche, même une légère différence de conductivité inhérente peut permettre une séparation efficace entre deux matériaux fortement conducteurs. Des progrès ont été réalisés dans le développement de nouveaux types de séparateurs HTR, tels que le séparateur CoronaStat, qui intègre des électrodes statiques supplémentaires pour améliorer l'efficacité de la séparation. Ces électrodes ne sont pas exposées, ce qui rend l'appareil plus sûr à utiliser. Le séparateur CoronaStat est équipé d'électrodes d'induction qui renforcent la force d'attachement des particules minérales non conductrices et accélèrent la décharge des particules conductrices.

V.2 Mécanisme d'induction conductrice

Un autre mécanisme utilisé par les séparateurs électrostatiques est l'induction conductrice, dans lequel un champ électrique est développé dans l'espace entre une surface chargée et une plaque de mise à la terre. Lorsque les particules minérales sont transférées sur la surface inclinée chargée, la polarisation des matériaux se produit en raison de l'existence d'un champ électrique.

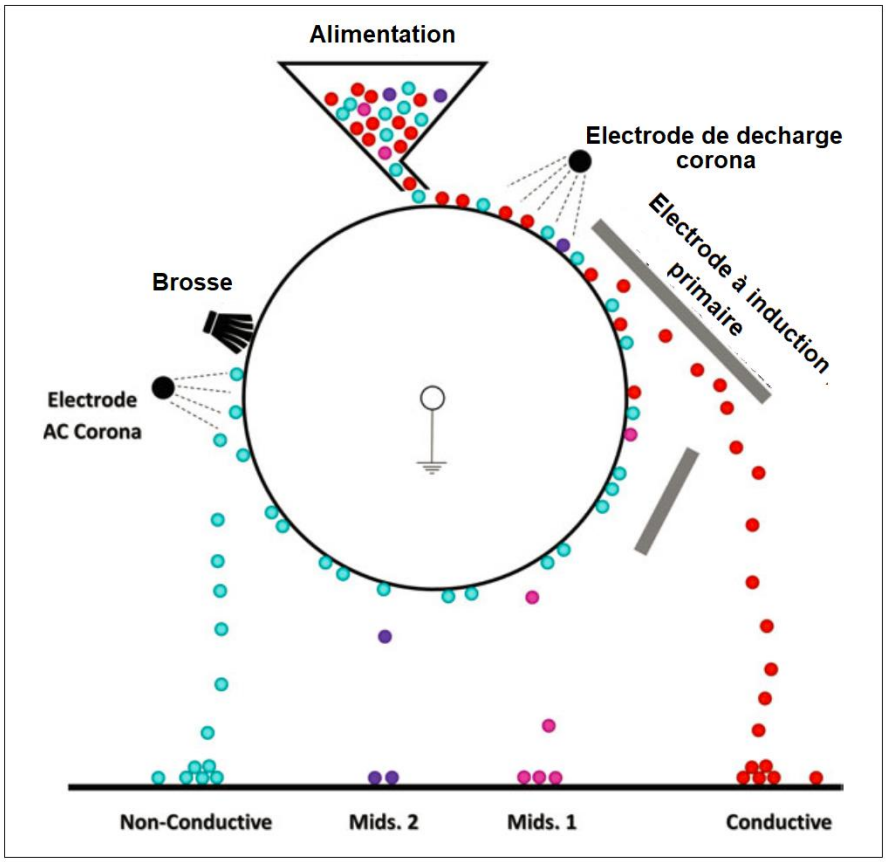


Figure V.6 : Diagramme Simplifié de séparateur CoronaStat.

De manière similaire à ce qui se passe dans les séparateurs HTR lors de la décharge électrique, le facteur le plus important dans le processus de séparation est la conductivité électrique des particules, qui détermine la capacité à acquérir la tension de la plaque chargée et, par conséquent, l'intensité de polarisation. Après l'alimentation et le contact des particules minérales avec la plaque chargée, la polarisation se produit rapidement dans les matériaux conducteurs.

Dans ce processus, les particules acquièrent un potentiel électrique égal à celui de la surface chargée. Les matériaux isolants obtiennent également une polarité, mais seulement d'un côté, celui qui ne touche pas la surface chargée. L'autre côté du minéral non conducteur en contact avec la plaque chargée obtient une quantité égale de charges électriques positives et négatives, donc il n'a pas de polarité. Cela est dû à la résistance électrique élevée des particules non conductrices, ce qui retarde la distribution de la charge sur toute leur surface. En revanche, les particules isolantes ne peuvent pas redistribuer les charges et restent polarisées. La taille et la

forme des particules affectent également l'intensité de la polarisation et la force électrique résultante.

Si une particule minérale non conductrice polarisée, qui ne possède pas de charge électrique nette, entre en contact avec une surface conductrice, elle n'éprouve pas de force d'attraction provenant d'un champ électrique appliqué. Cependant, les minéraux conducteurs sont attirés vers une électrode qui fournit la charge électrique opposée. Comme le montre la figure V.8, le mécanisme de séparation par induction conductrice peut être considéré comme un processus de séparation électrostatique dans lequel des charges électriques sont induites sur des particules minérales conductrices non chargées en n'appliquant aucune force d'attraction sur les isolants sans charge nette.

Le mécanisme de séparation par induction conductrice est utilisé pour séparer les minéraux ayant des conductivités différentes. Les électrodes statiques sont utilisées pour soulever les minéraux conducteurs chargés électriquement du flux, tandis que les autres minéraux restent attachés à la surface inclinée. Le séparateur à plaque électrostatique (ESP) est un exemple courant de séparateur utilisant ce mécanisme. Il est utilisé pour séparer la poussière grillée épuisée dans les unités de grillage des sulfures. L'humidité de l'alimentation dans ces séparateurs doit être maintenue basse, car elle peut affecter la conductivité des particules et de l'air dans le séparateur. Ore Kinetics a développé un séparateur ESP amélioré appelé UltraStat. (Figure V.9)

Les principaux changements dans l'UltraStat concernent la géométrie des électrodes améliorées et les différents trajets du flux d'alimentation. De plus, il est équipé d'électrodes supplémentaires et d'un rouleau pour améliorer davantage la force de levage et le dernier pour nettoyer la surface du rouleau principal.

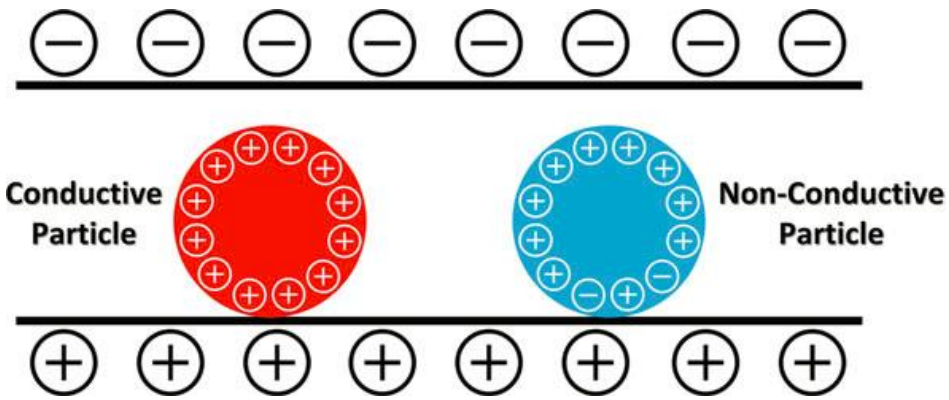


Figure V.7 : Le comportement des particules conductrices et non conductrices lors de la charge par induction conductrice.

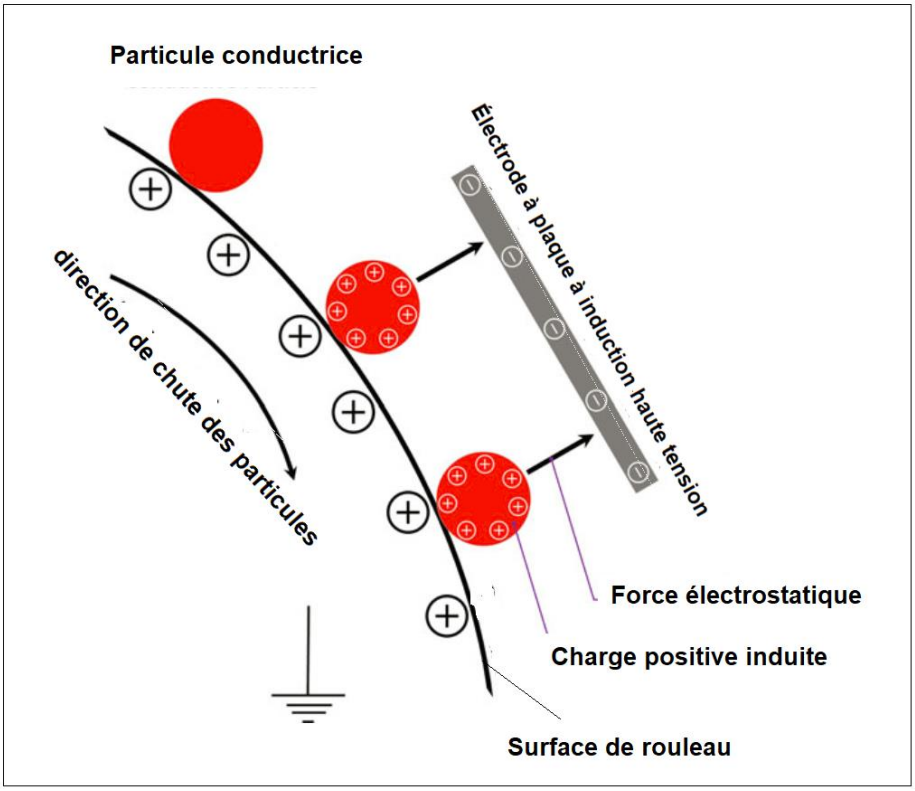


Figure V.8 Représentation graphique du mécanisme d'induction conductrice.

V.3 Mécanisme de chargement triboélectrique

Le mécanisme de chargement tribo-électrostatique est utilisé dans divers domaines tels que le recyclage des polymères, le revêtement en poudre, la livraison de médicaments, l'électrophotographie, la sécurité incendie et la sécurité alimentaire. Dans le traitement des minéraux, cette méthode a été utilisée avec succès pour la valorisation du charbon et la séparation de divers mélanges tels que le quartz-calcite et le quartz-feldspath. La Figure V.9 montre les différences entre le chargement triboélectrique et les autres mécanismes.

Les différences dans la fonction de travail de surface de divers matériaux non conducteurs sont à la base du mécanisme de chargement triboélectrique (électrification par contact). Ce mécanisme entraîne une collision et une friction entre les particules, une polarité et une variété de charges. La fonction de travail est la quantité minimale d'énergie nécessaire pour détacher un électron du niveau de Fermi et le transférer à un niveau de vide. De plus, le niveau de Fermi est défini comme le niveau d'énergie dans lequel la moitié des états d'énergie dans un matériau sont occupés par des électrons. Une particule avec un faible niveau de Fermi possède une plus grande fonction de travail de surface qu'un matériau avec un niveau de Fermi plus élevé. Lorsque deux particules différentes entrent en contact, celle avec une plus petite fonction de travail de surface cède des électrons ; par conséquent, sa charge électrique devient positive. En revanche, la particule avec une plus grande fonction de travail de surface acquiert les électrons et devient chargée négativement. Après avoir accompli ce processus, le niveau de charge des deux espèces de minéraux s'égalise. Il convient également de noter que

la conductivité électrique de la plupart des minéraux se situe dans la plage de 10^{-8} à 10^{5} $\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$, et ils peuvent être catégorisés comme semi-conducteurs. Cependant, la méthode de séparation triboélectrique peut être largement appliquée même en l'absence d'une grande différence de conductivité dans cette technique. Cette méthode est applicable dans le cas de presque tous les mélanges dont les particules présentent une différence de niveau de Fermi. Comme le montre la Figure V.10, le séparateur triboélectrique comprend une section horizontale appelée tribo-chargeur, où il y a un flux continu d'air et de particules minérales.

Cette section, également connue sous le nom de section de chargement par frottement, permet la polarisation des particules minérales après un contact avec des plaques intégrées ou par frottement mutuel. Par la suite, les particules passent à travers une buse et entrent dans la section de traitement à haute tension (chambre de chute libre), dans laquelle se trouvent des plaques positives et négatives créant un champ électrique. Le trajet des particules minérales à l'intérieur de la zone de traitement dépend de deux principaux facteurs :

- la charge de la surface des particules (négative ou positive)
- le rapport charge-masse (charge de surface par unité de masse de particule).

La plaque négative attire les particules minérales chargées positivement, tandis que les particules chargées négativement sont déviées vers la plaque positive. Au cours de cette étape, les particules minérales qui possèdent un rapport charge-masse plus élevé subissent une force électrique plus importante et se déplacent plus rapidement. Il convient de noter que les particules ayant un rapport charge-masse trop faible ne suivent ni les particules chargées négativement ni l'autre courant, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité de la séparation.

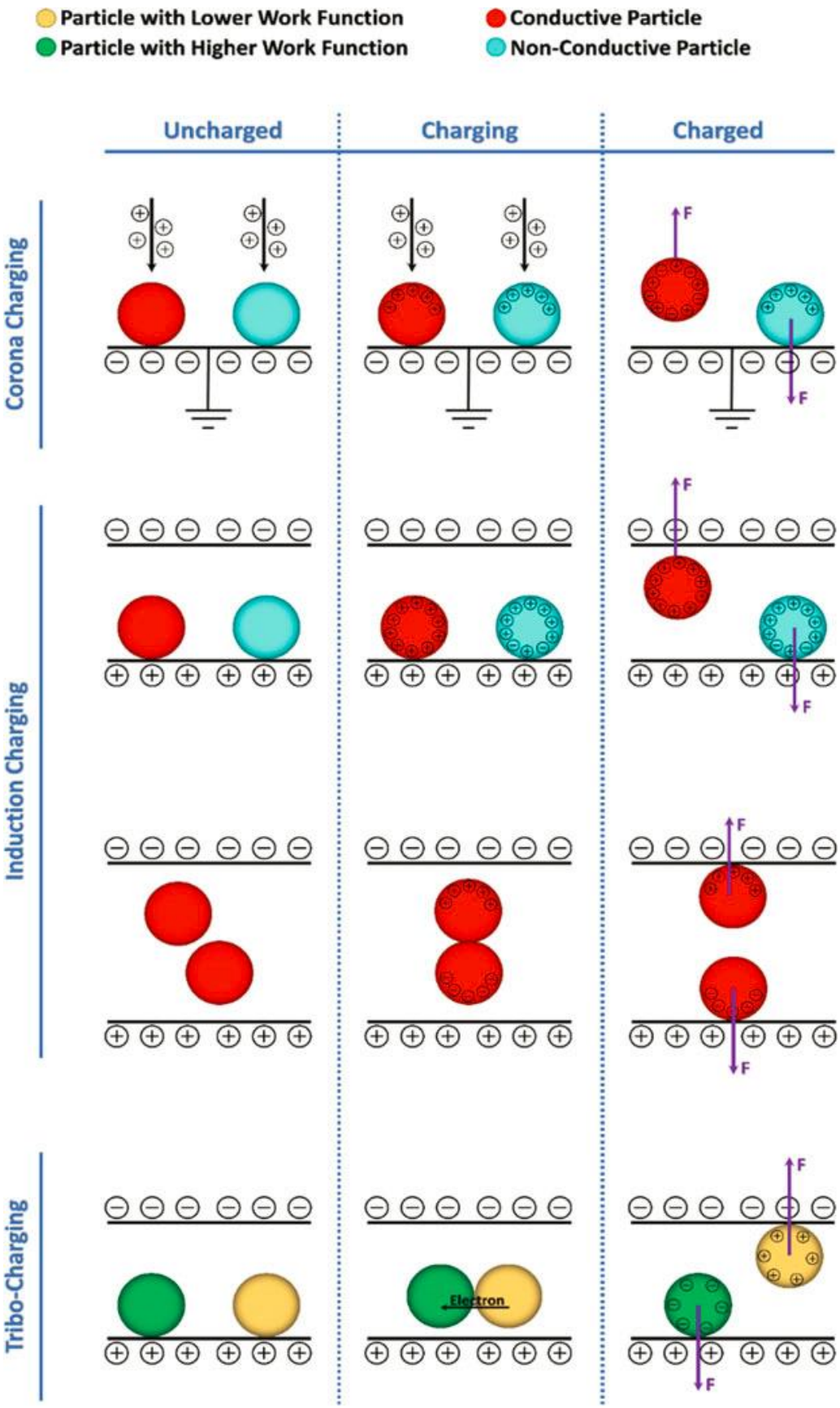


Figure V.9 : Comparaison des différents mécanismes de charge électrostatique.

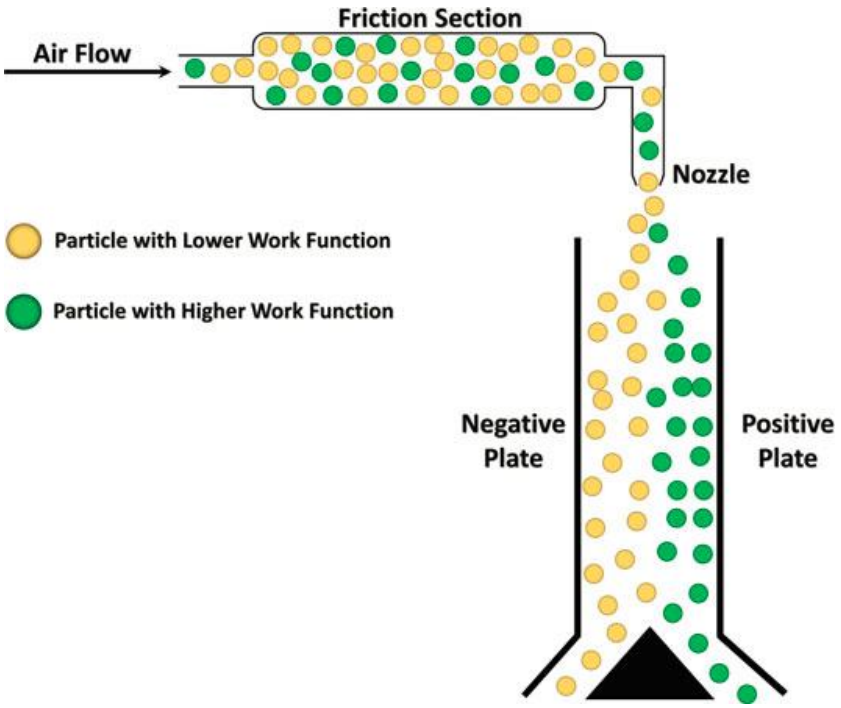


Figure V.10 Mécanisme de séparation par chargement triboélectrique.

La séparation triboélectrique est largement utilisée dans la valorisation du charbon, notamment pour répondre aux exigences environnementales strictes. En utilisant cette méthode, il est possible de nettoyer le charbon en éliminant les impuretés et en améliorant sa qualité, ce qui réduit les émissions nocives de SOX et NOX. Cela offre des avantages environnementaux et commerciaux aux industries du charbon, car le charbon de haute qualité a une plus grande valeur commerciale.

Pour réaliser une séparation efficace à l'aide d'un séparateur triboélectrique, les paramètres qui ont un effet sont les suivants :

- Le traitement de surface des matières premières avant l'utilisation du chargement triboélectrique est important pour contrôler et améliorer la charge électrique. Cela peut inclure des processus tels que le prétraitement chimique, le nettoyage de surface, l'irradiation, le prétraitement thermique et le dopage de surface, qui améliorent les différences de charge électrique entre les minéraux.

- Le débit d'air joue un rôle clé lors des étapes de chargement et de séparation. Un débit d'air optimal améliore le rendement du produit final et réduit la teneur en cendres. Une augmentation du débit d'air augmente la vitesse des particules, améliorant ainsi le frottement et le rapport charge-masse. Cependant, un débit d'air excessif peut augmenter la teneur en cendres et réduire le rendement. Le régime d'écoulement de l'air doit être contrôlé pour minimiser la turbulence.

- L'humidité de l'air affecte la conductivité des particules minérales. L'humidification de la surface des particules réduit leur capacité à conserver une charge électrique de surface, entraînant ainsi une diminution du rapport charge-masse. Il est donc essentiel de contrôler et maintenir une humidité basse pour optimiser la séparation triboélectrique.

Ce problème peut causer de grandes difficultés pour le processus de séparation et réduire le pourcentage de rendement.

• Taille des particules : Les particules plus petites ont une meilleure fonction de travail de surface, ce qui améliore l'efficacité de la séparation triboélectrique.

• Tension de séparation : Une tension plus élevée renforce la force d'attraction et permet aux plaques de capturer plus de particules, améliorant ainsi le rendement.

• Longueur du chemin de séparation : Une longueur de chemin de séparation adéquate permet aux particules d'être capturées efficacement. Trop court, il peut entraîner la présence d'impuretés, tandis que trop long peut générer un régime turbulent et perturber la séparation.

• Position du diviseur : Le positionnement du diviseur détermine la séparation des flux de particules. Un placement optimal peut augmenter le rendement et la teneur en cendres du produit final.

• Minéraux gangue : Les minérales gangues influencent la charge électrique des particules minérales. Leurs fonctions de travail différentes peuvent conduire à des charges électriques variées lors de la séparation triboélectrique.

• Schéma de traitement : La technique triboélectrique peut être utilisée en une ou plusieurs étapes. Par exemple, dans la valorisation du charbon, les matériaux sont d'abord séparés en produits et stériles, puis le produit est retraité pour obtenir une qualité améliorée. Cependant, ce processus peut entraîner l'extraction de particules intermédiaires contenant des impuretés.La séparation triboélectrique, qui suscite aujourd'hui plus d'attention, s'est améliorée avec le temps, et divers types de séparateurs ont été développés sur la base de ce mécanisme :

V.3.1 Séparateur à Double Tambour

Le séparateur à double tambour (figure V.11) utilise le principe de la charge électrique de surface pour la séparation des minéraux. Les particules sont soumises à une brosse rotative qui augmente les contacts et les collisions entre elles. En fonction de leur fonction de travail de surface, les particules acquièrent une charge positive ou négative. Ces particules chargées sont ensuite transportées par le flux d'air vers la section de séparation, qui comprend deux tambours isolants. Chaque tambour est équipé de deux électrodes de charges électriques opposées, séparées par un espaceur non conducteur.

Dans le séparateur à double tambour, une électrode de capture guide les particules minérales vers le tambour en les fixant à sa surface, tandis qu'une électrode de détachement les éloigne

du tambour en appliquant une force répulsive. Les particules chargées sont capturées par l'électrode de charge opposée et fixées au tambour qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Lorsqu'elles atteignent la deuxième électrode et une brosse adjacente, les particules se détachent de la surface du tambour grâce à une force de répulsion et sont collectées dans une boîte correspondante. Les particules minérales intermédiaires, qui ont une faible charge électrique, ont moins de chances d'être attirées et sont éliminées par une partie appelée "frit" intégrée à l'extrémité de la chambre de séparation.

L'efficacité du séparateur à double tambour a été évaluée lors du traitement d'un mélange d'anthracite et de quartz, en modifiant des variables telles que l'intensité du champ électrique et la taille des particules. Étant donné que le quartz a une fonction de travail de surface plus élevée que l'anthracite, le quartz et l'anthracite acquièrent respectivement des charges de surface négatives et positives. L'augmentation de l'intensité du champ électrique et de la taille des particules améliore la récupération du charbon, mais les particules de quartz sont moins attirées par l'électrode.

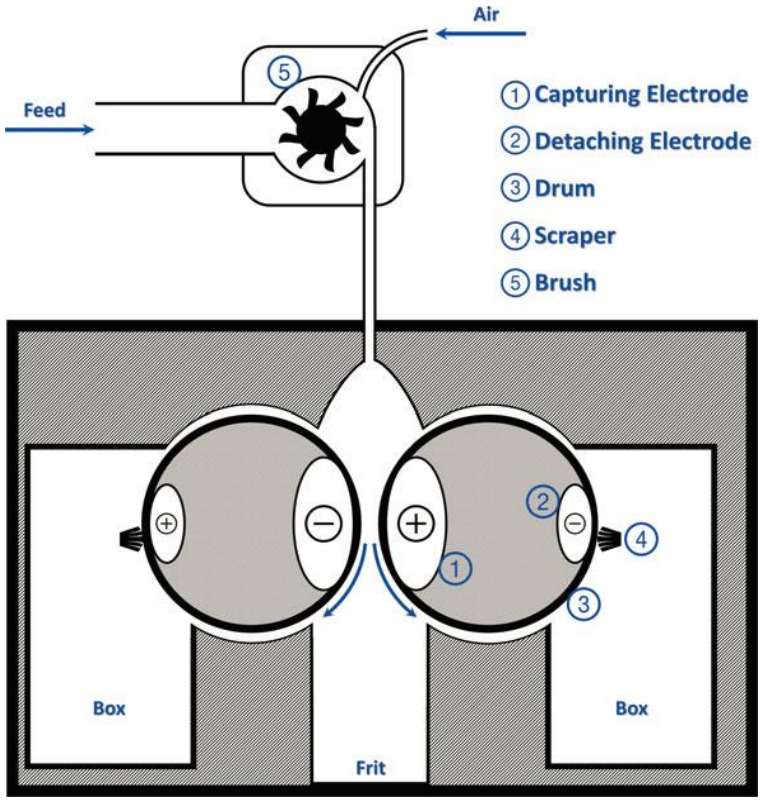


Figure V.11 Séparateur à double tambour.

V.3.2 Séparateur Tribo-Électrostatique Rotatif

Le séparateur tribo-électrostatique rotatif (STR) est une version améliorée du séparateur triboélectrique développé par l'Université du Kentucky. Les améliorations de conception apportées à cette machine ont rendu le processus de chargement des particules plus efficace. La principale amélioration est l'introduction d'une plaque rotative à haute tension tournant à l'intérieur d'une chambre cylindrique connectée à la terre, qui remplace la plaque de chargement fixe. Afin d'éviter la génération d'un régime turbulent à l'intérieur de la zone de

séparation, le débit d'air a été considérablement réduit. Dans ce STR amélioré, la probabilité de collision entre les particules est bien plus élevée que dans les types conventionnels.

De plus, le chargeur rotatif tourne à grande vitesse, ce qui entraîne une augmentation de l'énergie de frottement subie par les particules. La plaque chargée rotative améliore considérablement l'échange de charge entre les différents minéraux et les plaques. Dans cette machine, la densité de charge à la surface des minéraux a été considérablement améliorée par rapport au mécanisme de chargement précédemment mentionné. Par conséquent, la quantité de particules faiblement chargées (particules minérales intermédiaires) serait considérablement réduite. En tant que technique de séparation sèche efficace et satisfaisante, cette méthode a été largement récompensée dans les unités de valorisation du charbon. Les figures V.12 et V.13 illustrent respectivement la structure d'un séparateur tribo-électrostatique rotatif et son principe de fonctionnement.

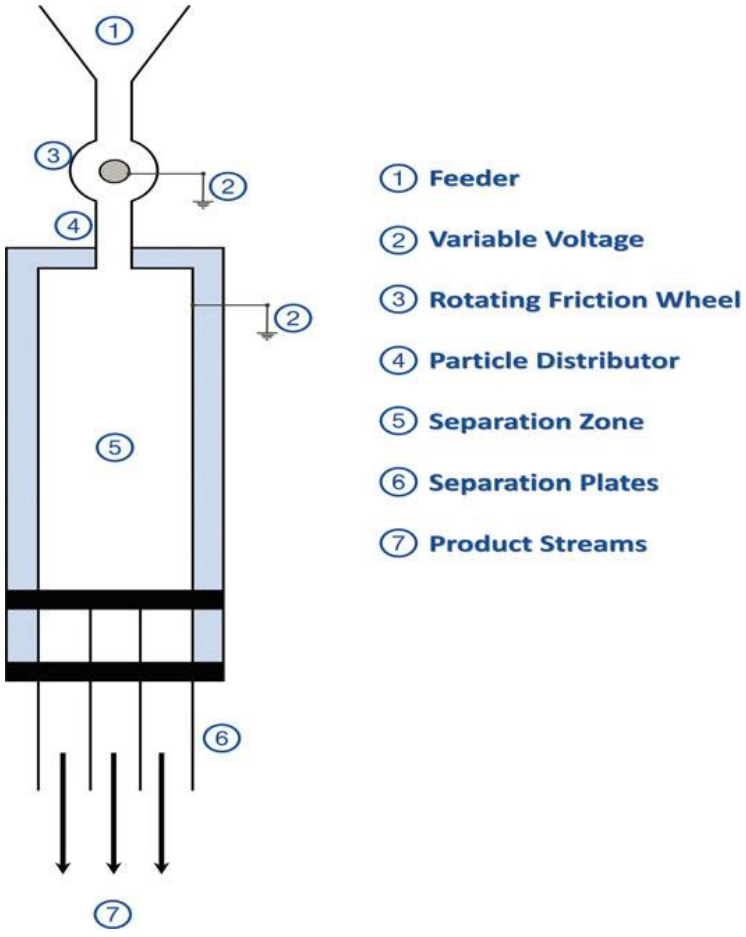


Figure V.12 Structure simplifiée d'un séparateur tribo-électrostatique rotatif.

V.3.3 Séparateur à courroie triboélectrique

Le séparateur à courroie triboélectrique (ST) est un nouvel équipement de séparation utilisé dans les unités de traitement. Il fonctionne en introduisant les matières premières entre deux électrodes chargées opposées dans un espace étroit (<1,5 cm). Le contact entre les particules génère une charge triboélectrique. Ensuite, une courroie à mailles ouvertes se déplaçant à une vitesse de 5 à 20 m/s sépare les particules chargées.

Cette courroie transporte les particules minérales près de chaque électrode vers les extrémités opposées de la machine. Le flux à contre-courant, le schéma turbulent et le mécanisme triboélectrique continu permettent une séparation efficace avec une récupération et une teneur satisfaisante, même en une seule étape. Malgré sa conception simple, ce séparateur à courroie triboélectrique présente des avantages significatifs

- Le processus est complètement sec.
- Il ne nécessite pas de matériaux supplémentaires.
- Il ne produit pas d'eaux usées ni d'émissions d'air.
- Sa compacité permet une flexibilité dans les conceptions d'installation.
- Il peut séparer des particules fines dans la plage de 1 à 300 µm.

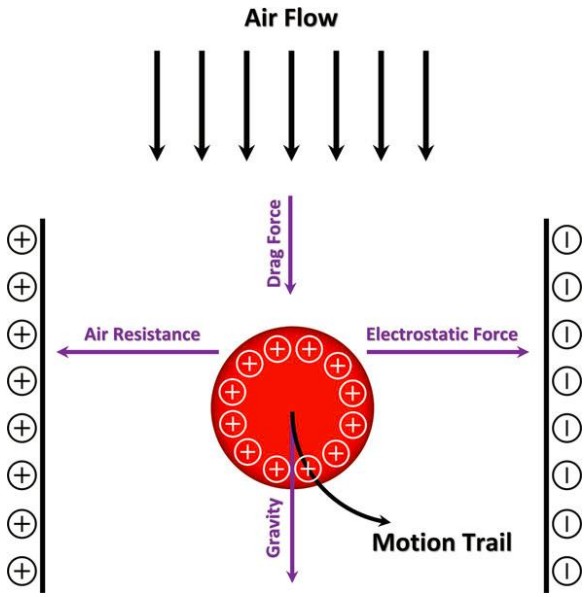


Figure V.13 Principe de fonctionnement d'un séparateur triboélectrique rotatif.

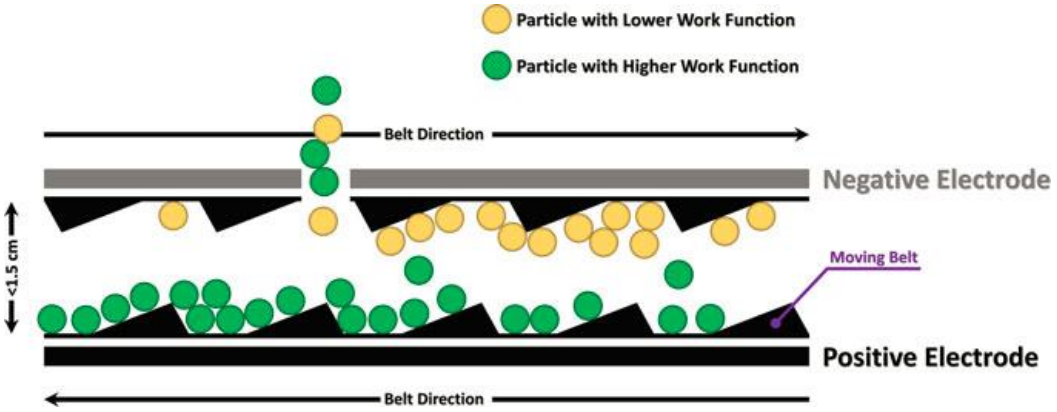


Figure V.14 Schéma d'un séparateur triboélectrique.

La figure V.15 représente un Schéma de traitement typique des sables minéraux lourds.

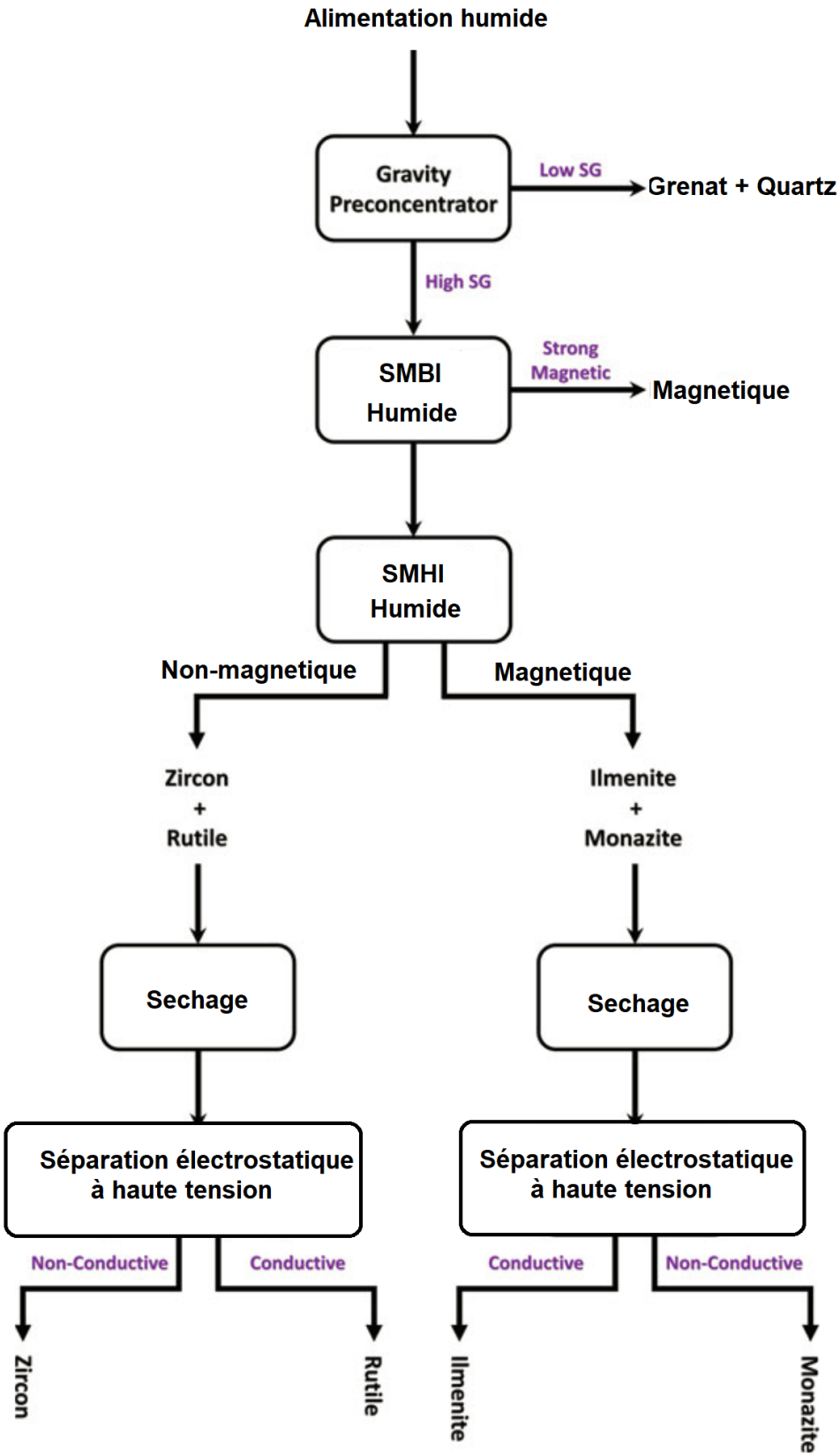


Figure V.15 : Schéma de traitement typique des sables minéraux lourds.

Références

Aman, F., Morar, R., Köhnlechner, R., Samuila, A., Dascalescu, L.: High-voltage electrode position: a key factor of elctrostatic separation efficiency. IEEE Trans. Ind. Appl. **40**, 905–910 (2004). https://doi.org/10.1109/TIA.2004.827813

Arsentyev,V.A.,Vaisberg, L.A.,Ustinov, I.D., Gerasimov, A.M.: Perspectives of reduced water consumption in coal cleaning. In: XVIII International Coal Preparation Congress: 28 June–01July 2016 Saint-Petersburg, Russia, pp. 1075–1081 (2016). https://doi.org/10.1007/978-3-319-40943-6_168

Bada, S.O., Tao, D., Honaker, R.Q., Falcon, L.M., Falcon, R.M.S.: A study of rotary triboelectrostatic separation of South African fine coal. Int. J. Coal Prep. Util. **30**, 154–172 (2010). https://doi.org/10.1080/19392699.2010.497100

Bada, S.O., Falcon, R.M.S., Falcon, L.M.: The potential of electrostatic separation in the upgrading of South African fine coal prior to utilization-a review. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 110, 691–702 (2010)

Bada, S.O., Falcon, L.M., Falcon, R.M.S., Du Cann, V.M.: Qualitative analysis of fine coals obtained from triboelectrostatic separation. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 112, 55–62 (2012)

Bedekovi´c, G., Trbovi´c, R.: Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process. Waste Manag. 108, 21–27 (2020). https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.033

Bittner, J.D., Hrach, F.J., Gasiorowski, S.A., Canellopoulus, L.A., Guicherd, H.: Triboelectric belt separator for beneficiation of fine minerals. Procedia Eng. 83, 122–129 (2014). https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.021

Bhoja, S.K., Tripathy, S.K., Murthy, Y.R., Ghosh, T.K., Raghu Kumar, C., Chakraborty, D.P.: Influence of mineralogy on the dry magnetic separation of ferruginous manganese ore—a comparative study. Minerals 11, 1–20 (2021). https://doi.org/10.3390/min11020150

Butcher, D.A., Rowson, N.A.: Electrostatic separation of pyrite from coal. Magn. Electr. Sep. 19–30 (1995)

Chelgani, S., Leißner,T.,Rudolph, M., Peuker, U.A.: Study of the relationship between zinnwaldite chemical composition and magnetic susceptibility. Miner. Eng. 72, 27–30 (2015). https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2014.12.024

Chen, J., Honaker, R.: Dry separation on coal—silica mixture using rotary triboelectrostatic separator. Fuel Process. Technol. 131, 317–324 (2015). https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.11.032

Chen, Q., Wei, L.: Coal dry beneficiation technology in china: the state-of-the-art. China Particuol. 1, 52–56 (2003). https://doi.org/10.1016/s1672-2515(07)60108-0

Dance, A.D., Morrison, R.D.: Quantifying a black art: the electrostatic separation of mineral sands. Miner. Eng. 5, 751–765 (1992). https://doi.org/10.1016/0892-6875(92)90244-4

Dascalescu, L., Iuga, A., Morar, R.: Corona–electrostatic separation: an efficient technique for the recovery of metals and plastics from industrial wastes. Magn. Electr. Sep. 241–255 (1993)

Dean, Reginald Scott, and C.W.D.: Magnetic separation of ores. US Government Printing Office (1941).

Dodbiba, G., Shibayama, A., Sadaki, J., Fujita, T.: Combination of triboelectrostatic separation and air tabling for sorting plastics from a multi-component plastic mixture. Mater. Trans. 44, 2427–2435 (2003). https://doi.org/10.2320/matertrans.44.2427

Dobbins, M., Domenico, J., Dunn, P.: A discussion of magnetic separation techniques for concentrating ilmenite and chromite ores (2007)

Dwari, R.K., Rao, D.S., Reddy, P.S.R.: Magnetic separation studies for a low grade siliceous iron ore sample. Int. J. Min. Sci. Technol. 23, 1–5 (2013). https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.001

Dwari, R.K., Hanumantha Rao, K.: Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator. Miner. Eng. 22, 119–127 (2009). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.05.009

Dwari, R.K., Rao, K.H.: Dry beneficiation of coal—a review. Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 28, 177–234 (2007). https://doi.org/10.1080/08827500601141271

Dwari, R.K., Hanumantha Rao, K.: Non-coking coal preparation by novel tribo-electrostatic method. Fuel 87, 3562–3571 (2008). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.05.029

Edward, D., Holtham, P.N., Kojovic, T.: The motion of mineral sand particles on the roll in high tension separators. Magn. Electr. Sep. 69–85 (1995)

Eichas, K., Schonert, K.: A double drum separator for triboelectric separation of very fine materials.pdf. 18th International Mineral Processing Congress, pp. 417–423 (1993)

Elder J. et domenico J.. – Enhancing Mineral Quality through magnetic separation. Industrial Minerals no 7, july 2000, pp. 27-33.

Eskibalci, M.F., Ozkan, S.G.: An investigation of effect of microwave energy on electrostatic separation of colemanite and ulexite. Miner. Eng. 31, 90–97 (2012). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.018

Franke, D., Suponik, T., Nuckowski, P.M., Golombek, K., Hyra, K.: Recovery of metals from printed circuit boards bymeans of electrostatic separation. Manag. Syst. Prod. Eng. 28, 213–219 (2020). https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0031

Germain, M., Lawson, T., Henderson, D.K., MacHunter, D.M.: The application of new design concepts in high tension electrostatic separation to the processing of mineral sands concentrates. Proc. Heavy Miner. 101–107 (2003)

Gerber R. et Watmough M.H., Linear superconducting OGMS system: Optimum configuration and performance. J. Phys. D : Appl. Phys. 22, 1989, pp. 440-448.

Gillet, G., Séparation magnétique, Théorie et modélisation, traité Génie des procédés, Technique de l'Ingénieur, J3 220 pages 1 à 11, juin 2008

Gillet G., Séparation Magnétique. Mines et Carrières. Les Techniques, I-II/96, 1996.

Gillet G. et Diot F., Technologie de la séparation magnétique. Memento des Mines et Carrières, no 4, Société de l'Industrie Minérale, 1998, pp. 409-433.

Gillet G. et Diot F., Application des séparateurs magnétiques et électriques aux déchets solides et aux effluents liquides. Les Techniques de l'Industrie Minérale no 6, juin 2000, pp. 60-84.

He, J., Yao, Y., Lu, W., Long, G., Bai, Q., Wang, H.: Cleaning and upgrading of coal-series kaolin fines via decarbonization using triboelectric separation. J. Clean. Prod. 228, 956–964 (2019). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.329

Hwang, Y., Gon, B., Bae, K., Seok, H.:Mechanism and performance of a dry particle separator using an elastic drum. Int. J. Miner. Process. 125, 34–38 (2013). https://doi.org/10.1016/j.min pro.2013.09.006

Hamerski, F., Krummenauer, A., Bernardes, A.M., Veit, H.M.: Improved settings of a coronaelectrostatic separator for copper concentration from waste printed circuit boards. J. Environ. Chem. Eng. 7 (2019). https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102896

Hamerski, F., Bernardes, D.P., Veit, H.M.: Operational conditions of an electrostatic separator for concentrate copper from electronic waste. Rev. Esc.Minas 71, 431–436 (2018). https://doi. org/10.1590/0370-44672017710159

Hansen, L., Wollmann, A., Weers, M., Benker, B., Weber, A.P.: Triboelectric charging and separation of fine powder mixtures. Chem. Eng. Technol. 43, 933–941 (2020). https://doi.org/10.1002/ceat.201900558

Jafari,M., Chegini, G., Akmal, A.A.S., Rezaeealam, B.: A roll-type corona discharge–electrostatic separator for separating wheat grain and straw particles. J. Food Process Eng. 42, e13281 (2019). https://doi.org/10.1111/JFPE.13281

Jeon, H.S., Park, C.H., Kim, B.G., Park, J.K.: Development of triboelectrostaic separation technique for recycling of final waste plastic. Geosystem Eng. 9, 21–24 (2006). https://doi.org/10.1080/12269328.2006.10541250

Kelly, E.G., Spottiswood, D.J.: The theory of electrostatic separations: a review Part I. Fundamentals. Miner. Eng. 2, 33–46 (1989). https://doi.org/10.1016/0892-6875(89)90063-0

Kelly, E.G., Spottiwood, D.J.: The theory of electrostatic separations: a review part II. Particle charging. Miner. Eng. 2, 193–205 (1989). https://doi.org/10.1016/0892-6875(89)90040-X

Karmazin, V.V.: Theoretical assessment of technological potential of magnetic and electrical separation. Magn. Electr. Sep. 8, 139–159 (1997). https://doi.org/10.1155/1997/23759

Landauer, J., Foerst, P.: Triboelectric separation of a starch-protein mixture—impact of electric field strength and flowrate. Adv. Powder Technol. 29, 117–123 (2018). https://doi.org/10.1016/ j.apt.2017.10.018

Lu,H., Li, J., Guo, J.,Xu, Z.:Movement behavior in electrostatic separation: recycling ofmetal materials from waste printed circuit board. J. Mater. Process. Technol. 197, 101–108 (2008). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.004

Li, J., Xu, Z., Zhou, Y.: Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards. J. Electrostat. 65, 233–238 (2007). https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.08.004

Li, T.X., Ban, H., Hower, J.C., Stencel, J.M., Saito, K.: Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: a potential application in space exploration. J. Electrostat. 47, 133–142 (1999). https://doi.org/10.1016/S0304-3886(99)00033-9

Lottering, J.M., Aldrich, C.: Online measurement of factors influencing the electrostatic separation of mineral sands. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 283–290 (2006)

Liu, Q., Bai, J., Gu, W., Peng, S., Wang, L., Wang, J., Li, H.: Leaching of copper from waste printed circuit boards using Phanerochaete chrysosporium fungi.Hydrometallurgy 196, 105427 (2020). https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2020.105427

Manouchehri, H.R.,Rao,K.H., Forssberg, K.S.E.: Triboelectric charge, electrophysical properties and electrical beneficiation potential of chemically treated feldspar, quartz andwollastonite. Magn. Electr. Sep. 11, 9–32 (2002). https://doi.org/10.1155/2002/46414

Manouchehri, H.R., Rao, K.H., Forssberg, K.S.E.: Review of electrical separation methods. Min. Metall. Explor. 17(1), 23–36 (2000). https://doi.org/10.1007/BF03402825

Ma, F., Tao, Y., Xian, Y., Zhang, M.: Effects of pulverized coal modification on rotary triboelectric separation. Energy Sources, Part A Recov. Util. Environ. Eff. 1–13 (2020). https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1772908

Manouchehri, H.R., Rao, K.H., Forssberg, K.S.E.: Changing potential for the electrical beneficiation ofminerals by chemical pretreatment.Min.Metall. Explor. 16(3), 14–22 (1999). https://doi.org/10.1007/BF03402814

Matsusaka, S., Maruyama, H., Matsuyama, T., Ghadiri, M.: Triboelectric charging of powders: a review. Chem. Eng. Sci. 65, 5781–5807 (2010). https://doi.org/10.1016/j.ces.2010. 07.005.

Ma, F., Tao, Y., Liu, J., Xian, Y.: Flow field and particle motion characteristics of rotary triboelectric separator based on CFD simulation. Int. J. Coal Prep. Util. 00, 1–22 (2020). https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1847094

Marine Schott, 2017. Propriétés magnétiques du système Pt/Co/AlOx et ses variations sous champ électrique, thèse de doctorat, université de Grenoble, Alpes.

Morgan, D.G., Bronkala,W.J.: The selection and application of magnetic separation equipment. Part I. Magn. Electr. Sep. 3, 5–16 (1991). https://doi.org/10.1155/1991/26791

Morgan, D.G.,Bronkala,W.J.: The selection and application of magnetic separation equipment. Part II. Magn. Electr. Sep. 4, 151–172 (1993). https://doi.org/10.1155/1993/81597

Oberteuffer, J.A., Magnetic separation: a review of principles, devices, and applications. IEEETrans. Magn. 10, 223–238 (1974). https://doi.org/10.1109/TMAG.1974.1058315

Ore Kinetics. Available online: https://www.orekinetics.com.au

Rvidson B.R. et Dille (B.). – Improved High-Intensity Magnetic Separation for Industrial Minerals. Industrial Minerals Supplement sept. 1996.

Soong, Y., Link, T.A., Schoffstall, M.R., Gray, M.L., Fauth, D.J., Knoer, J.P., Jones, J.R., Gamwo, I.K.: Dry beneficiation of Slovakian coal. Fuel Process. Technol. 72, 185–198 (2001). https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00187-4

Svoboda, J.: Separation of particles in the Corona-discharge field.Magn. Electr. Sep. 4, 173–192 (1993)

Svoboda J., Developments in Mineral Processing, 8, Magnetic Methods for the Treatment of Minerals. Elsevier, 1987.

Svoboda, J.: Magnetic Techniques for the Treatment of Minerals. Elsevier, Amsterdam (1987)

Samuila, A., Urs, A., Iuga, A., Morar, R., Aman, F., Dascalescu, L.: Optimization of corona electrode position in roll-type electrostatic separators. IEEE Trans. Ind. Appl. 41, 527–534 (2005). https://doi.org/10.1109/TIA.2005.844859

Silveira, A.V.M., Santana, M.P., Tanabe, E.H., Bertuol, D.A.: Recovery of valuable materialsfrom spent lithium ion batteries using electrostatic separation. Int. J. Miner. Process. 169, 91–98(2017). https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.11.003

Tao, D., Al-Hwaiti, M.: Beneficiation study of Eshidiya phosphorites using a rotary triboelectrostatic separator. Min. Sci. Technol. 20, 357–364 (2010). https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60208-8

Tao, D., Sayed-Ahmed, A., Li, Q., Honaker, R.: Dry fine coal cleaning using rotary triboelectrostatic separator (RTS). SME Annual Meeting and Exhibit (2010)

Tao, Y., Ding, Q., Deng, M., Tao, D., Wang, X., Zhang, J.: Electrical properties of fly ash andits decarbonization by electrostatic separation. Int. J. Min. Sci. Technol. 25, 629–633 (2015).https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.017

Tripathy, S.K., Banerjee, P.K., Suresh, N., Murthy,Y.R., Singh,V.: Dry high-intensity magnetic separation inmineral industry—a review of present status and future prospects. Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 38, 339–365 (2017). https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1323743

Urvantsev, A.I., Kashcheev, I.D.: Dry beneficiation of kyanite ores. Refract. Ind. Ceram. 54,166–168 (2013). https://doi.org/10.1007/s11148-013-9570-2

Venkatraman, P., Knoll, F.S., Lawver, J.E.: Magnetic and electrostatic separation. Miner. Process. Des. Oper. 629–687 (2016). https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63589-1.00017-4

Wang, J., Dai, H.X., Luo, L.: The application status of Triboelectric separation and its progress. Adv. Mater. Res. 734–737, 1114–1118 (2013). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.734-737.1114

Wu, J., Li, J., Xu, Z.: Electrostatic separation for recovering metals and nonmetals from waste printed circuit board: problems and improvements. Environ. Sci. Technol. 42, 5272–5276 (2008). https://doi.org/10.1021/es800868m

Wu, J., Li, J., Xu, Z.: Electrostatic separation for multi-size granule of crushed printed circuit board waste using two-roll separator. J. Hazard. Mater. 159, 230–234 (2008). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.013

WATSON (J.H.P.). – Status of Superconducting Magnetic Separation in the Minerals Industry. Minerals Engineering, Vol. 7, nos 5/6, 1994, pp. 737-746.

B. A. Wills, Mineral Processing Technology. Elsevier (2016)

Xing, Q.,Utami,D.P., Dematteу,M.B.,Kyriakopoulou, K., deWit,M., Boom,R.M., Schutyser, M.A.I.: A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 66, 102480 (2020). https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480

Yang, X., Wang, H., Peng, Z., Hao, J., Zhang, G., Xie, W., He, Y.: Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore. Int. J. Min. Sci. Technol. 28, 223–230 (2018). https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.01.003

Youjun, T., Ling, Z., Dongping, T., Yushuai, X., Qixiao, S.: Effects of key factors of rotary triboelectrostatic separator on efficiency of fly ash decarbonization. Int. J. Min. Sci. Technol.(2017). https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.004

Ziemski, M., Holtham, P.N.: Particle bed charge decay behaviour under high tension roll separation. Miner. Eng. 18, 1405–1411 (2005). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.02.013

Zhang, S., Forssberg, E.: Optimization of electrodynamic separation for metals recovery from electronic scrap. Resour. Conserv. Recycl. 22, 143–162 (1998). https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00004-4

Zhang, G., He, Y., Wang, H., Zhang, T., Yang, X., Wang, S., Chen, W.: Application of triboelectric separation to improve the usability of nonmetallic fractions of waste printed circuit boards: removing inorganics. J. Clean. Prod. 142, 1911–1917 (2017). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.093

Zhang, Z., Sun, B., Yang, J., Wei, Y., He, S.: Electrostatic separation for recycling silver, silicon and polyethylene terephthalate from waste photovoltaic cells. Mod. Phys. Lett. B 31, 1–11 (2017). https://doi.org/10.1142/S0217984917500877