

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université A. Mira /Bejaia



Faculté de la technologie

Département des Mines et géologie

Matière : Séparation magnétique et électrostatique

Mater1, spécialité Valorisation des ressources minérales

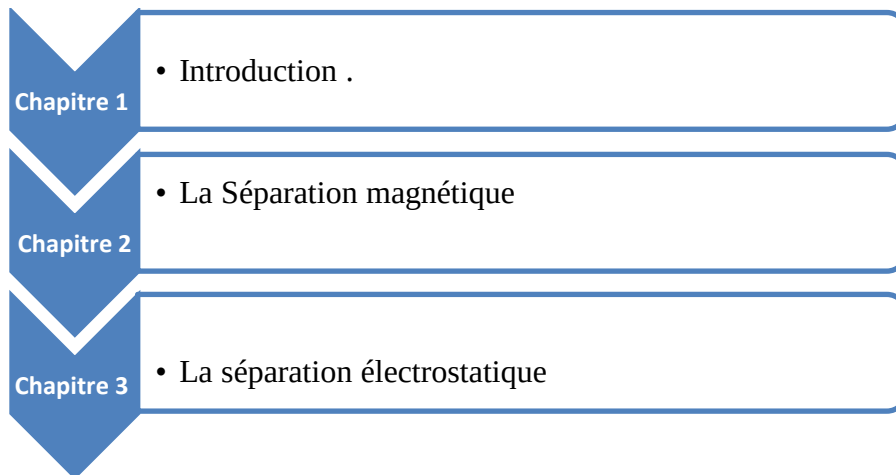
Enseignant de la matière : BOUABDALLAH Soufiane

E-mail: soufiane18@gmail.com

Année académique 2019-2020

II. Contenu

Le cours est scindé en trois chapitres d'apprentissages. Ce cours a été préparé pour les étudiants de la Master1 valorisation des ressources minérales selon le canevas du ministère Algérien.



Chapitre 1. Introduction

1.1. But d'une séparation

La valorisation des minerais consiste à éliminer, idéalement au complet, les constituants non-désirés, en ne laissant que les minéraux de valeur. Normalement on ne sera jamais capable d'effectuer cette séparation parfaite, de sorte qu'on se retrouvera à la fin de l'opération avec deux produits contenant tous les deux des minéraux de valeur et de la gangue, mais en proportions différentes. Le produit riche en minéraux de valeur s'appelle concentré tandis que celui riche en gangue s'appelle rejets.

1.2. Libération et mixtes

Au point de vue granulométrique, il faut qu'il existe une relation entre la taille d'une particule et sa teneur en minéral, lorsque des particules sont constituées d'un assemblage de plusieurs espèces minérales, on parle alors de mixtes minéralogiques. La quantité relative de ces mixtes détermine fortement l'efficacité de la séparation et le choix de la méthode à utiliser. Donc, on a évidemment avantage à travailler aux granulométries les plus fines possible pour obtenir le meilleur degré de libération des minéraux et réduire la quantité de grains mixtes, mais plus la granulométrie est fine, plus le temps de broyage et de tamisage s'allonge.

1.3. Terminologie générale et indices de la séparation

Les procédés d'enrichissement des minéraux utiles sont les procédés de séparation d'après laquelle on obtient quelques produits définis par la teneur en composant utile. Si cette teneur augmente dans l'un des produits, dans l'autre elle baisse.

D'habitude on obtient deux et plus rarement trois produits. Le matériau de départ est appelé brut (tout-venant). Les produits que l'on obtient après la séparation sont appelés concentré riche en composant utile et rejets pauvres en ce composant.

a) Le rendement poids

Le rendement poids généralement noté **Rp** est égal au rapport entre le poids du concentré et le poids à l'alimentation. Le poids à l'alimentation représente le poids du minerai tout-venant. Le poids du concentré représente le poids de la substance utile obtenue après traitement.

$$\mathbf{R_p = C/A}$$

$$\mathbf{R_p = a - r / c - r . 100}$$

b) Le rendement métal ou taux de récupération (vérifie l'efficacité du traitement)

Le rendement métal généralement noté **Rm** est le rapport entre la quantité de substance utile dans le minerai et la quantité de substance utile dans le minerai tout-venant.

$$\mathbf{R_m = C_c / A_a . 100, \text{Quantité} = \text{Masse} \times \text{teneur}}$$

$$\mathbf{R_m = R_p . c / a = [a - r . c / c - r . a] 100}$$

c) Rapport d'enrichissement

On définit également le rapport d'enrichissement. C'est le rapport entre la teneur du concentré et la teneur à l'alimentation

$$\mathbf{T = c / a}$$

d) Rapport de concentration

$$\mathbf{R = A/C = c - r / a - r , R = 100 / (a - r / c - r) . 100}$$

A : le poids à l'alimentation

C : le poids du concentré

R : le poids du rejet

a : la teneur à l'alimentation

c : la teneur du concentré

r : la teneur du rejet

1.4. Les types de séparation

Les méthodes de séparation minéralurgique se divisent en quatre grandes classes selon le principe de fonctionnement et les conditions d'utilisation (tableau 1).

Tableau 1. Conditions d'application des méthodes minéralurgiques

Type minéralurgique	Concentration gravimétrique	Flottation	Séparation magnétique	Séparation électrostatique
taille des particules	> 1 μm	> 5 μm	> 75 μm	60 à 500 μm
degré de libération	élevé	moyen	moyen	élevé
Différence de masse volumique entre les minéraux	> 1	*	*	*
Propriétés des surfaces des particules	*	élevée	*	*
Propriétés magnétiques des minéraux	*	*	élevée	*
Différence de conductivité électrique entre les minéraux	*	*	*	élevée

4.1. Séparation gravimétrique

La concentration par gravité ou gravimétrique est une voie importante de la minéralurgie. En effet, certains minerais pondéreux, peuvent faire leurs concentrations par une technique gravimétrique. Les équipements de concentration gravimétrique exploitent la différence de masse volumique entre les matériaux pour accomplir la séparation grâce à l'action combinée de la gravité et de différentes forces. En réalité, la séparation est aussi affectée par le volume et la forme des particules comme dans le cas de la classification.

4.2. Séparation magnétique

La séparation magnétique est un procédé qui utilise la force engendrée par un système magnétique pour séparer les particules présentant des propriétés magnétiques différentes. Ce type de séparation consiste à soumettre les minéraux à l'action d'un champ magnétique. Les différences de susceptibilité magnétique, entre les espèces minérales, sont alors les principaux critères qui permettent d'effectuer le fractionnement.

4.3. La flottation

La flottation est un procédé d'enrichissement des minerais en milieu aqueux. Son principe consiste, après avoir finement broyé un minéral, à séparer les particules en fonction de leur

hydrophobicité, les particules hydrophobes étant entraînées vers la surface par les bulles de mousse, le plus souvent grâce à l'intervention des réactifs chimiques connus sous l'appellation des collecteurs, alors que les particules hydrophiles tombent au fond de la cellule de flottation. Donc la flottation basé sur la chimie des surfaces, qui tire avantage des différences de mouillabilité à la surface des particules solides.

4.4. Séparation électrostatique

Les techniques électrostatiques ont été largement utilisées pour la séparation à sec de petites particules offrant une large différence de conductivité. La séparation électrostatique est un terme générique donné à une importante classe de technologies de traitement de matériel, largement utilisée pour le triage des mélanges granulaires grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées.

Chapitre 2. La séparation magnétique

Introduction

Les derniers développements en science des matériaux et de la technologie ont permis à la séparation magnétique d'élargir le champ de son application, non seulement dans l'industrie minière, mais aussi dans le recyclage et dans les sciences biomédicales, avec le développement des séparateurs magnétiques industriels d'intensité de champ peut atteindre 60 000 gauss ($1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ gauss}$).

La séparation électrostatique reste toujours l'opération la plus fiable et la plus économique pour traiter les gisements de sable riche en minéraux tel que : ilménite, rutile, zircon, etc. Comme elle est favorisée dans le domaine de recyclage et la récupération des plastiques à partir des métaux.

La séparation magnétique est l'un des processus physique de concentration qui utilise les différences des propriétés magnétiques de divers minéraux présents dans le corps de minerais.

La séparation magnétique consiste à se mettre les grains d'un solide (minerais) à des forces magnétiques, développées par un séparateur, suivant leurs propriétés magnétique, les différentes catégories minéralogiques possèdent des trajectoires caractéristiques de leurs natures.

2.1. Notions de base sur le champ magnétique

L'existence de champs magnétiques est liée aux déplacements de charges électriques.

En plus d'un champ électrique, une charge électrique en mouvement crée dans son voisinage un champ magnétique qui dépend de sa vitesse de déplacement.

Quels sont alors les effets de ce champ magnétique ? Celui d'attirer ou de repousser d'autres charges en mouvement, et ceci avec une force différente de la force électrique.

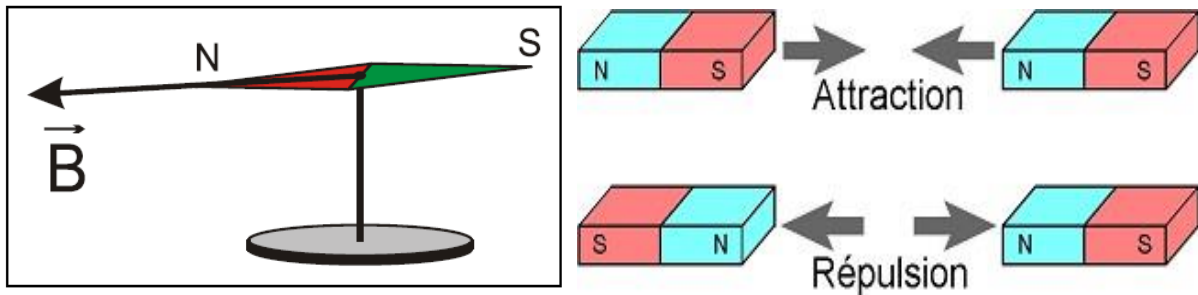
2.1. 1.Sources de champs magnétiques

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).

a) Champ magnétique créé par un aimant

→ Un aimant attire les substances ferreuses (ex : limaille de fer) par leur extrémités, appelé pôle d'aimantation (pôle Nord et Sud).

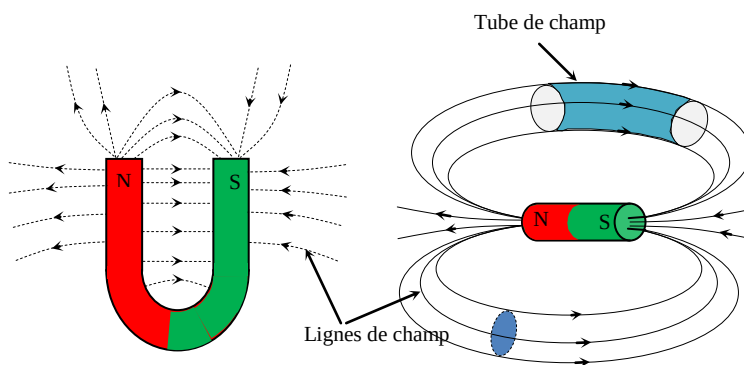
→ L'aimant crée un champ magnétique, représenté par un vecteur $\vec{B}$, dont la direction et le sens en un point donné, est l'axe de l'aiguille et le sens Sud – Nord de l'aiguille.



✓ Lignes de champ

Lorsqu'on déplace une aiguille aimantée dans la direction et dans le sens du vecteur champ magnétique $\vec{B}$, on dessine une courbe orientée appelée ligne de champ. Une ligne de champ commence au pôle nord d'un aimant et se termine en son pôle sud.

En un point donné, le vecteur $\vec{B}$, est par conséquent tangent à la ligne de champ passant par ce point et orienté dans le même sens.



Un spectre est constitué par un ensemble de lignes de champ (figure 1). Plus les lignes de champ sont rapprochées, plus le champ est intense.

b) Champ magnétique créé par un courant

Les courants électriques correspondent à des déplacements de charges dans les conducteurs, ces courants produisent donc des champs magnétiques dans leur voisinage.

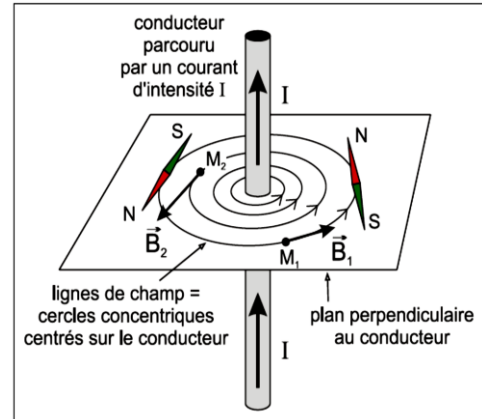
La valeur du champ magnétique créé par les courants électriques ne se détermine simplement que dans quelques cas particuliers, ou même qu'en certains points, comme il va être vu ci-dessous.

c) Champ créé par un fil (conducteur) rectiligne parcouru par le courant

Il n'y a pas de pôles N ni S.

Le sens de B dépend du sens de I.

Formons le spectre magnétique du champ créé par un fil rectiligne vertical parcouru par un courant. Saupoudrons de la limaille de fer dans un plan perpendiculaire au fil. Plaçons également quelques aiguilles aimantées au voisinage du fil. L'intensité B du champ augmente avec l'intensité de courant et diminue avec la distance au conducteur.



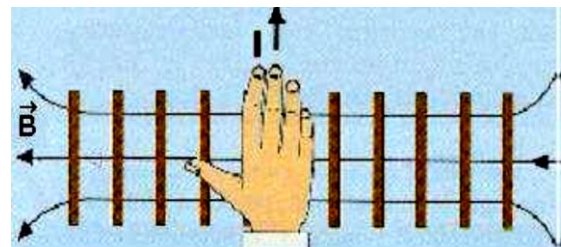
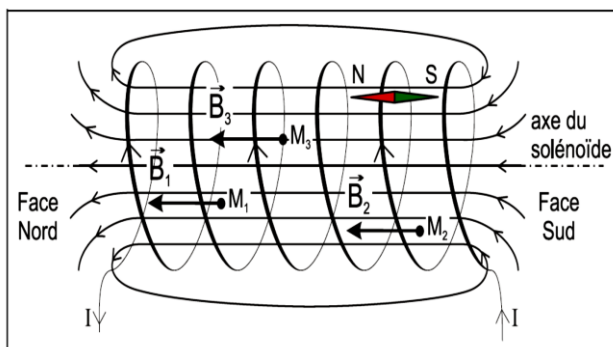
Un champ magnétique B créé par un segment de fil électrique est donné par :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad (d : \text{distance la plus petite de mesure au fil})$$

d) Champ créé par un solénoïde (bobine longue) parcouru par le courant

Un solénoïde est constitué d'un fil conducteur enroulé régulièrement en hélice de façon à former une bobine dont la longueur est grande par rapport à son rayon (Un solénoïde est constitué de N spires écartées les unes des autres sur une longueur L)

Formons le spectre magnétique du champ créé par un solénoïde d'axe horizontal parcouru par un courant électrique.



A l'intérieur d'un solénoïde le champ est uniforme d'intensité : $B = \frac{\mu_0 N I}{\ell} = \mu_0 n I$

μ_0 = perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ unités S.I. (H/m = henry/mètre)

n = densité de spires : $n = \frac{N}{\ell}$, avec ℓ = longueur du solénoïde et N = nombre de spires

I = intensité de courant à travers le solénoïde.

e) Champ créé par un conducteur circulaire (bobine plate) parcouru par le courant

Une bobine est un regroupement de spire que l'on peut approximer comme étant superposé les uns sur les autres. Le module du champ magnétique produit au centre d'une bobine parcourue par un courant I est défini à l'aide de l'équation suivante :

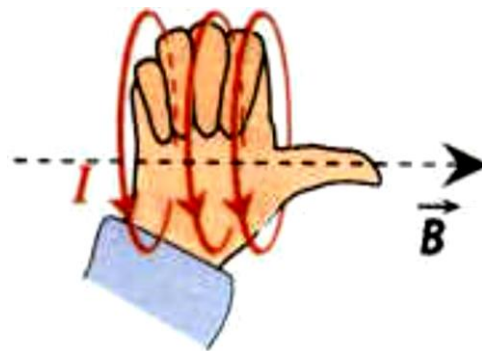
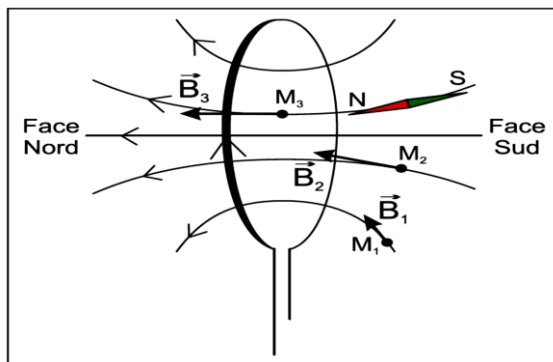
$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R}$$

B : Champ magnétique produit au centre de la bobine en tesla (T)

N : Le nombre de spire dans la bobine, $N > 0$

I : Courant électrique en ampère (A)

R : Le rayon de la bobine en mètre (m)



2. 2. La Séparation magnétique

2.2.1. Principe

La séparation magnétique exploite les propriétés magnétiques des matériaux afin d'effectuer leur séparation. La susceptibilité magnétique est la propriété d'un matériau qui détermine son comportement dans un champ magnétique. À partir de cette propriété, les matériaux peuvent être divisés en trois classes. La première classe est composée des matériaux ferromagnétiques dont la susceptibilité magnétique est très forte. La deuxième classe comporte des matériaux paramagnétiques qui présentent une susceptibilité magnétique faible. La troisième classe est constituée des matériaux diamagnétiques possédant une susceptibilité nulle.

2.2.2. Théorie

Le sens physique de procédé de la séparation magnétique consiste en fait que le champ magnétique change la trajectoire gravitationnel des particules possédantes les propriétés magnétique, de qui provoque leur extraction du mélange avec d'autre minéraux, cette extraction est due au champ magnétique et au gradient de l'intensité qui exprime le changement de l'intensité du champ par l'unité de distance.

2.2.3. Les variables opérationnelles

Afin d'obtenir le rendement et la qualité des produits désirés, trois paramètres d'opération des séparateurs magnétiques peuvent être ajustés.

- ✓ Le paramètre le plus simple pouvant être modifié directement à partir de la salle de contrôle est la vitesse de rotation du tambour.
- ✓ Le second paramètre pouvant être manipulé est le tonnage d'alimentation. Bien que ce paramètre soit fixé par le tonnage et la qualité du matériel alimentant l'usine, il est toujours possible de le modifier en jouant avec les réserves de minerai ou avec la position des barrières des séparateurs en amont, lorsque le séparateur à régler est utilisé pour traiter le concentré ou le rejet d'un séparateur magnétique en amont.
- ✓ Finalement, l'intensité des aimants peut être modifiée lors de la reconstruction des séparateurs. Ce type d'ajustement nécessite évidemment beaucoup de temps et de travail et ne peut être effectué que lors d'une séance d'entretien majeur de l'usine.

2.2.4. Le magnétisme dans la matière

L'état magnétique de la matière peut être caractérisé par un vecteur $\vec{M}$ appelé magnétisation, ou moment magnétique dipolaire par unité de volume. Dans le vide, l'induction magnétique $\vec{B}$ et le champ magnétique $\vec{H}$ sont liés par la relation

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

« μ_0 » Représente $4\pi \cdot 10^{-7}$ SI, soit la perméabilité magnétique du vide (la perméabilité magnétique de l'air est uniquement 0,000037 % supérieure à celle du vide).

Par contre, dans la matière, l'induction magnétique dépend de la magnétisation M de la matière de la façon suivante :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (2)$$

La magnétisation $\vec{M}$ de la matière est une fonction du champ $\vec{H}$, de la nature de la substance, et des traitements magnétiques, mécaniques et thermiques antérieurement subis par la substance.

La figure 1 indique l'allure générale de la courbe de dépendance de B en fonction de H dans la matière. Cette courbe montre que l'induction B tend vers une valeur limite B_s dite valeur de saturation. On distingue deux zones : une zone linéaire (a) et une zone de saturation (b). Dans la zone linéaire ($H < H_s$), on peut écrire :

$$\vec{M} = \mu_0 \chi_m \vec{H} \quad (3)$$

Où χ_m est la susceptibilité magnétique de l'échantillon de matière considéré.

Dans la zone de saturation ($H > H_s$), M n'est plus une fonction linéaire de H .

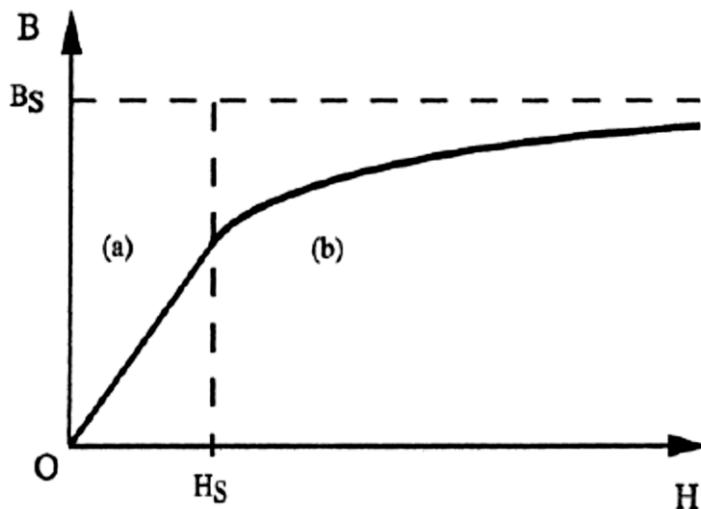


Figure 1. L'induction magnétique en fonction de champ magnétique dans la matière

2.2.5. Les différents comportements magnétiques:

Toute substance matérielle est formée d'un ensemble d'atomes qui peuvent être soit non magnétiques soit magnétiques. Il convient avant tout de distinguer les matières diamagnétiques des matières paramagnétiques. Un champ magnétique induit des moments à

l'intérieur des atomes constituant une matière diamagnétique et le repousse. Dans le cas d'une matière paramagnétique, le champ magnétique induit des moments magnétiques à l'ensemble des atomes et tend à les aligner dans la direction de son champ. On différencie les principaux types de comportements magnétiques :

a) Diamagnétisme : La susceptibilité magnétique des matériaux diamagnétiques est très faible et négative, autour de -10^{-5} ou -10^{-6} ($\chi_m < 0$).

L'intensité de l'aimantation induite est dans la direction opposée au champ inducteur. Les lignes de champ H ne pénètrent pas dans un matériau diamagnétique parfait. La perméabilité est donc nulle. Tous les corps présentent un phénomène de diamagnétisme parce que son origine provient de la déformation des orbites électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur. Ce phénomène est réversible puisque lorsque le champ extérieur disparaît, l'action disparaît. Le quartz est diamagnétique.

La susceptibilité d'un matériau diamagnétique reste constante quand la température varie. C'est une différence majeure avec les matériaux paramagnétiques, qui ont une susceptibilité positive, plus importante et qui diminue lorsque la température augmente.

b) Paramagnétisme: Le paramagnétisme apparaît dans les atomes, les molécules ou les ions contenant des électrons célibataires par exemple. Certains atomes et certains ions (oxygène, air, sels de fer, etc.) possèdent un moment magnétique propre. En l'absence de champ $\vec{H}$, ceux-ci sont orientés au hasard, et de ce fait ne produisent pas de magnétisation macroscopiquement observable. Mais l'application d'un champ magnétique $\vec{H}$ extérieur aura pour effet d'orienter ces moments magnétiques dans sa propre direction, faisant apparaître ainsi un moment magnétique macroscopique $\vec{M}$ non nul. Cette orientation préférentielle cesse avec la disparition de $\vec{H}$, sous l'effet de l'agitation thermique du milieu.

Dans le cas où il n'y a pas d'interaction entre les différents moments magnétiques individuels, l'effet est appelé paramagnétisme et $\chi_m > 0$. Dans les cas usuels, $\vec{M}$ est une fonction linéaire de $\vec{H}$. Le paramagnétisme dépend de la température

c) Ferromagnétique:

S'il existe un fort couplage entre les moments magnétiques individuels qui sont orientés localement dans une même direction, l'agitation thermique demeure impuissante à détruire cet alignement au-dessous d'une certaine température (température de Curie). Ce phénomène, appelé ferromagnétisme, s'observe à l'échelle macroscopique par la présence de domaines appelés domaines de Weiss, à l'intérieur desquels tous les moments sont orientés dans la même direction. Au sein d'une matière ferromagnétique n'ayant pas subi l'influence d'un

champ magnétique $\vec{H}$ extérieur non nul, ces domaines s'orientent dans la direction du champ $\vec{H}$ et développent ainsi une forte magnétisation macroscopique $\vec{M}$.

Le ferromagnétisme dépend de la température et de l'état ferromagnétique d'une substance dépend de son histoire (champs $\vec{H}$ appliqués antérieurement, traitements thermodynamiques, etc.). Les principaux corps ferromagnétiques sont le fer, le cobalt et le nickel.

2.2.6. Bases théoriques de la séparation magnétique

Les techniques de séparation magnétique consistent à soumettre des particules de minerais à des forces magnétiques et mécaniques développées par le séparateur. Suivant la différence des propriétés magnétiques, les trajectoires des particules résultent avant tout de l'interaction des forces mécaniques et des forces magnétiques.

a) La force magnétique

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

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 V_p \left[\frac{Kp}{1+DKp} - Kf \right] \nabla \vec{H}^2 \quad (4)$$

b) Les forces mécaniques

Parmi les forces concurrentes appliquées, on distingue :

- **La force de gravité**

$$\vec{F}_g = V_p (\rho_p - \rho_f) \vec{g}$$

- **La force centrifuge**

$$\vec{F}_C = \rho_p V_p \omega^2 R \quad (6)$$

- **La force d'entraînement par le fluide**

$$\vec{F}_f = 6\pi\mu R_p (\vec{v}_f - \vec{v}_p) \quad (7)$$

k_p est la susceptibilité magnétique d'une particule, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, V_p est le volume de la particule, D est le coefficient de démagnétisation des particules, $\nabla \vec{H}$ gradient du champ magnétique, ρ_p et ρ_f représentent respectivement la masse volumique de la particule et du fluide, « g » est la constante gravitationnelle, ω désigne la vitesse angulaire de la particule, μ est la viscosité dynamique du fluide, R rayon du tambour rotatif, v_p et v_f sont utilisés respectivement de déplacement de la particule et du fluide tandis que R_p est le rayon de la particule.

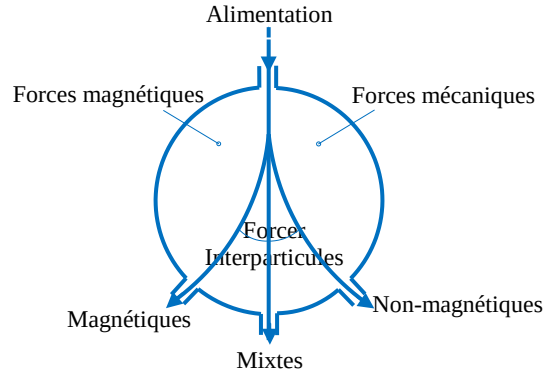


Figure 2 : Schéma de principe de

D'une manière générale, il faut que, pour une fraction minéralogique du minerai, les forces magnétiques soient nettement supérieures aux forces mécaniques s'exerçant sur les particules appartenant à cette fraction pour espérer leur extraction, soit :

$$\vec{F}_m > \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_f \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} \mu_0 V_p \left[\frac{Kp}{1+DKp} - Kf \right] \nabla \vec{H}^2 > V_p (\rho_p - \rho_f) \vec{g} + \rho_p V_p \omega^2 R + 6\pi\mu R_p (\vec{v}_f - \vec{v}_p) \quad (10)$$

Hypothèse 1 : Chacune des particules possède une forme sphérique avec un volume :

$$V_p = \frac{4}{3} \pi R_p^3 \quad (11)$$

Hypothèse 2 : Lors d'une séparation en voie sèche, pour tous les minéraux, la force d'entraînement par le fluide est négligeable par rapport aux autres.

2.2.7. Types de séparation magnétique :

On fonction de l'intensité du champ magnétique les séparations sont classées comme suit :

- **Séparation magnétique à basse intensité (SMBI)** : principalement utilisée pour la séparation des matériaux ferromagnétiques ou paramagnétiques de susceptibilité magnétique élevée, et/ou les matériaux de granulométrie plus ou moins grossière. Le dispositif généralement utilisé est un aimant permanent fonctionne normalement à champ magnétique ouvert, c'est-à-dire que les lignes de force magnétique se referment dans un milieu magnétique peu perméable, air ou eau. L'aimant utilisé, a un champ magnétique profond (attire à distance) ou non (épuration ou concentration de minerais) suivant l'objectif de la séparation. L'intensité de champ varié de 80 à 160 KA/m.
- **Séparation magnétique à haute intensité (SMHI)** : utilisée pour le traitement des matériaux faiblement magnétiques, brut ou fin, en modes humides ou secs, le générateur du champ magnétique est un circuit conventionnel (électroaimant composé d'une ou de deux bobines en cuivre résistif entourant un noyau de fer doux ($\mu_r = B/\mu_0 H$ très élevé)) à champ

magnétique fermé d'une intensité allant de 400 kA/m à 1 600 kA/m, ou un aimant permanent à forte énergie spécifique (alliages en céramique).

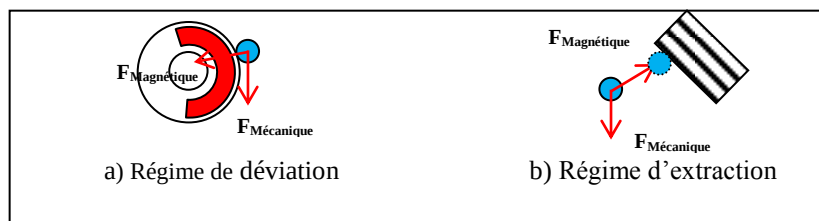
L'alimentation des séparateurs à haute intensité ne doit pas comporter un trop fort pourcentage de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques (< 0,5 %). Il est souvent conseillé de faire passer préalablement l'alimentation dans un séparateur magnétique à basse intensité.

- **Séparation magnétique à haute gradient du champ** : elle utilise des bobines en cuivre ou supraconductrices pour le traitement de particules ultrafines contenues dans une dispersion solide ou un fluide ainsi les matériaux qui ont des propriétés magnétiques très faibles.

D'après le milieu de séparation magnétique on distingue :

Séparation magnétique par voie sèche : réservée en général aux traitements des produits grossiers (granulométrie de l'ordre du millimètre à quelques centimètres) elle s'effectue dans le champ magnétique suivant deux principaux régimes :

Régime d'extraction (retirer les particules magnétiques de la masse par force magnétique) et Régime de déviation ou de maintien (déviation des particules magnétiques de leurs trajectoires par effet du champ magnétique et une force mécanique)



- **Séparation magnétique par voie humide** : On utilise ce type de séparation magnétique lorsque le minerai magnétique est difficilement séparable vu leur granulométrie très fine (- 1mm à 40µm) ou lorsqu'il y a une formation d'agrégats créés par l'attraction électrostatique entre les particules en voie sèche, ou lorsque le produit à traiter est déjà sous forme de pulpe minérale et même lorsque on cherche à éviter les dégagements intenses de poussières.

2.2.7.1. Conditions et paramètres de séparation

- La condition nécessaire de la séparation magnétique des substances minérales est d'avoir une différence suffisante de susceptibilités magnétiques entre les minéraux à séparer $k = \frac{\chi_1}{\chi_2} > 1$; Ou χ_1 : Susceptibilité spécifique des minéraux utiles, χ_2 : Susceptibilité spécifique de la gangue (stérile)

- b. Il est essentiel de souligner que l'efficacité du procédé dépend du degré de libération de substance utile ou de la pureté des matériaux à séparer.
- c. La grosseur et la masse volumique des particules à séparés influencent considérablement le traitement. La séparation des grosses particules denses requiert un champ magnétique plus intense que la séparation des petites particules légères.
- d. L'utilisation de fortes intensités pour la séparation des particules ferromagnétiques peut entraîner une contamination du concentré par la présence des mixtes ferromagnétiques, (réduction de la qualité), donc le passage préalable par une SMBI est recommandé.
- e. L'alimentation des séparateurs par une épaisseur exagérée et hétérogène engendre l'entraînement mécanique vers le concentré des particules diamagnétiques prisonnières entre particules ferromagnétiques.
- f. Le phénomène de floculation et agglomération magnétique est due à la présence des particules de la magnétite qui se comportent comme aimants permanents interagissent pour former des agrégats, contenant des particules diamagnétiques et mixtes emportées mécaniquement vers la fraction magnétique.
- g. L'augmentation de diamètre du tambour ainsi que sa vitesse de rotation $> (20 \text{ à } 50 \text{ tr/min})$ réduit la force d'attraction magnétique et augmente la force centrifuge.
- h. Les caractéristiques du produit à traiter (granulométrie, propriétés magnétiques, composition minéralogique, débit, densité,...) doivent répondre aux caractéristiques techniques (capacité de traitement, espace de l'entrefer, le pas entre pôles, intensité du champ, régime et milieu de fonctionnement,...) de l'appareil de séparation (séparateur).

2.2.8. Classification des séparateurs magnétiques

Le classement des séparateurs magnétiques est basé sur plusieurs critères à savoir : 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

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.

Il existe deux catégories d'équipements de séparation magnétique: les séparateurs à haute intensité et les séparateurs à faible intensité. Chaque catégorie peut être divisée en deux, soit les séparateurs humides et les séparateurs à sec. Les séparateurs à faible intensité sont utilisés pour séparer les matériaux ferromagnétiques et certains matériaux paramagnétiques hautement susceptibles.

2.2.8.1. Séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI) en voie sèche

a) Equipements de protection et de déferrailage

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**, 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 1) ou en position transversale au-dessous. Ces trieurs sont principalement utilisés en protection d'autres appareils (concasseurs, broyeurs, cribles, etc.) et pour les scories de la sidérurgie.

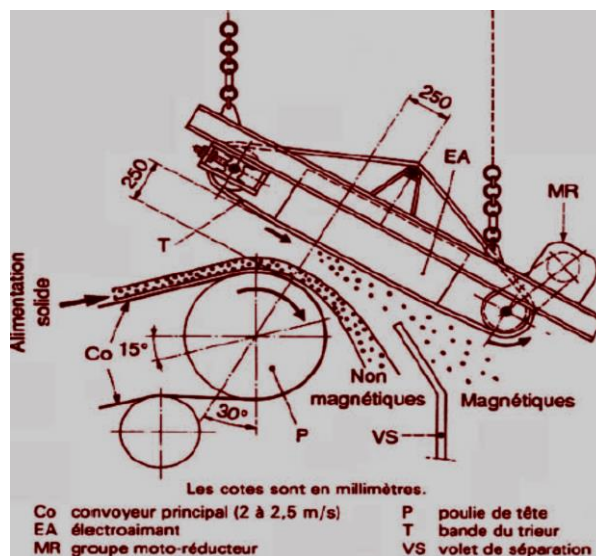


Figure 1. Séparateur suspendus

- Les **Poules 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 (figure 02). 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).

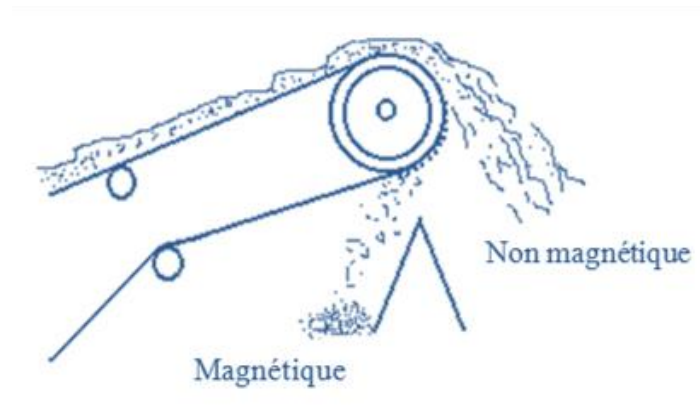


Figure 2. Séparateur à poulie

- Les **tambours déferrailleurs** (figure 3) sont de conception similaire à ceux utilisés pour le traitement des minerais .Ces appareils sont généralement alimentés par le haut, dans les opérations de pré concentration (récupération élevée) ou en dessous de tombour pour des opérations de concentration haut teneur (fonctionnement par extra 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 40kA/m à 175mm). Ces séparateurs peuvent être constitués de tambour en aciers spécieux pour résister à l'usure et sont capables de traiter des produits grossiers (200 mm de dimension) à un débit de l'ordre 200à 300 t/h /m.

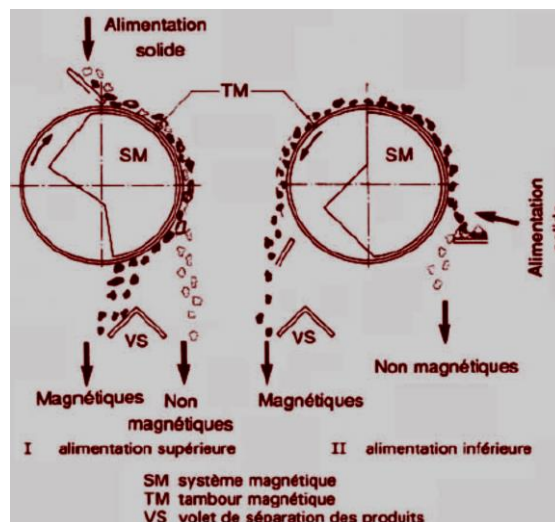


Figure 3. Tambour déferrailleur

b) Séparateurs magnétique à tambour

Ces séparateurs sont équipés d'un tambour (ou virole) à l'intérieur duquel se trouve un système magnétique (aimants permanents) immobile formant un arc de 150 à 180°, dont les éléments actifs de polarité alternée peuvent être transversaux, longitudinaux ou radiaux.

Les particules ferromagnétiques se collent et y adhèrent au tambour 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. 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 (figure 4).

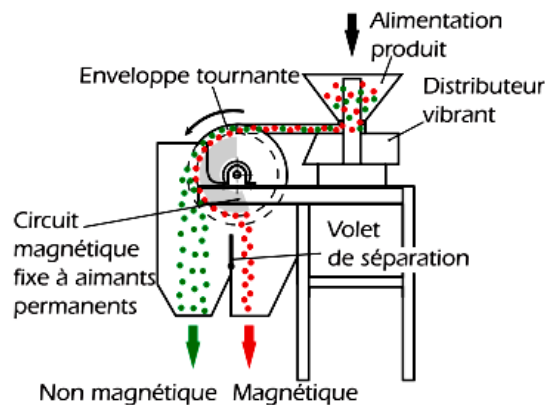


Figure 4. Séparateurs à basse intensité en voie sèche à tambour

2.2.8.2. Séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI) 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 **séparateurs à courant parallèle** (figure 5a) 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.
- Les **séparateurs à contre-rotation** (figure 5b) sont plus spécialement adaptés au traitement des produits de granulométrie inférieure à 0,6 mm. Ils conviennent tout particulièrement à l'épuration de produits non magnétiques et cela à des débits élevés ($\approx 100 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) puisque les particules non magnétiques parcourent la plus grande partie de la zone active, circulant dans le sens contraire de la rotation du tambour.
- Les **séparateurs à contre-courant** (figure 5c) 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.

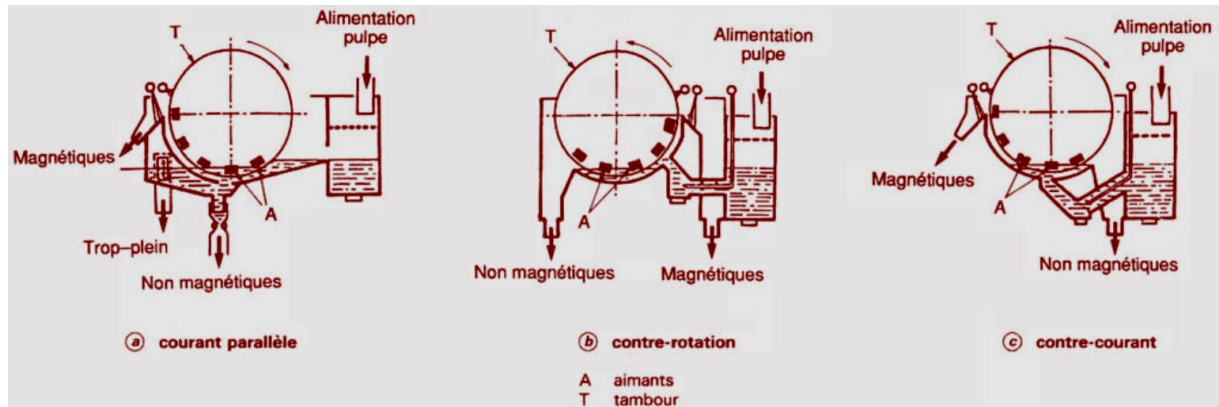


Figure 5. Séparateurs à basse intensité en voie humide

• Conditions d'application

L'utilisation des équipements de séparation magnétique est limitée par l'intervalle granulométrique à l'intérieur duquel ils fonctionnent de façon efficace. Le tableau suivant résume ces conditions d'application et présente la capacité maximale de chaque équipement. De plus, les valeurs de capacité s'appliquent uniquement au traitement de minerai et peuvent varier pour les applications environnementales.

Tableau 1. Application et capacité des appareils de séparation magnétique

Appareil	Limite granulométrique	Capacité maximale
Convoyeur à tête magnétique	> 0,5 cm	130,5 m/min
Séparateur humide à tambour (concourant)	< 6,36 mm	1875 l/min.m
Séparateur humide à tambour (contre-rotation)	< 1,70 mm	1500 l/min.m
Séparateur humide à tambour (contre-courant)	< 0,21 mm	900 l/min.m

2.2.8.3. Séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI) en voie sèche

a) Séparateurs à bandes transversales et à disques : Ces séparateurs travaillent par régime d'extraction, ils sont équipés d'une bande convoyeuse passant entre les deux pôles d'un électroaimant (entrefer) et d'une bande déplaçant sur la pièce polaire supérieure et transversalement à la bande principale, (figure 6) ou un disque denté tournant au-dessus. L'alimentation du minerai se fait en couche mince (1 à 1,5 mm) sur la bande convoyeuse d'alimentation. Les éléments magnétiques passant dans le système sont attirés par la pièce polaire supérieure et évacués vers les côtés par la bande transversale ou les disques. Ces séparateurs développent des champs magnétiques variant de 800 à 1 600 kA/m et traitent des débits compris entre 0,3 à 4 (t/h)/m.

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

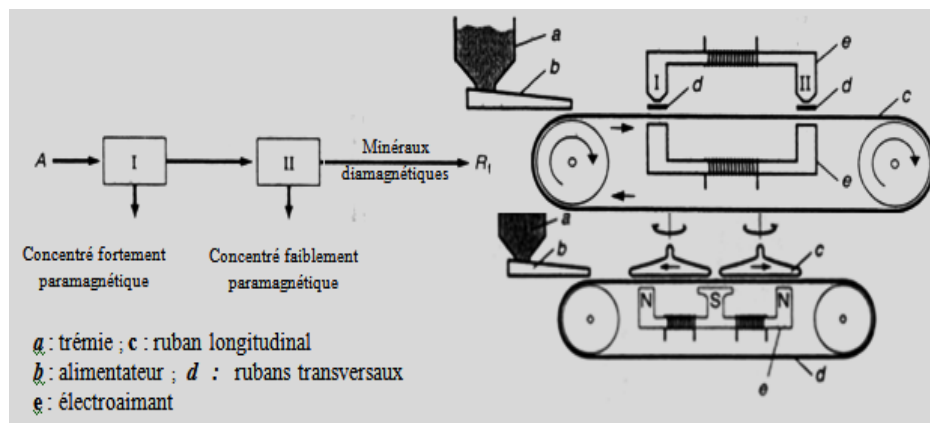


Figure 6. Séparateur à rubans croisés et disques

b) Séparateur à haute intensité en voie sèche à rotor

Séparateurs à rotor : Ces appareils sont des séparateurs dits à rotor ou rouleaux induits, suivant la conception du circuit magnétique, ils peuvent travailler par déviation ou par extraction. Ils comportent (figure 7) un rotor denté tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique.

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 rouleaux ferromagnétiques et diamagnétiques alternés qui forment à sa surface des nervures, dents ou des filets afin d'augmenter le gradient de champ magnétique.

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. Suivant les applications, la granulométrie et la composition minéralogique, les débits admissibles sur des séparateurs à rotor induit sont de l'ordre de 1,5 à 6 t/h/m, ils peuvent atteindre dans certains cas 8 t/h/m 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 sont légers de 2,5 à 12 t, peuvent développer des champs allant de 1 à 2,5 KWh par tonne, exemple de ces séparateurs dont la partie génératrice du champ magnétique est un rotor composé d'un assemblage d'aimants permanents est représenté dans là c'est le séparateur à bande.

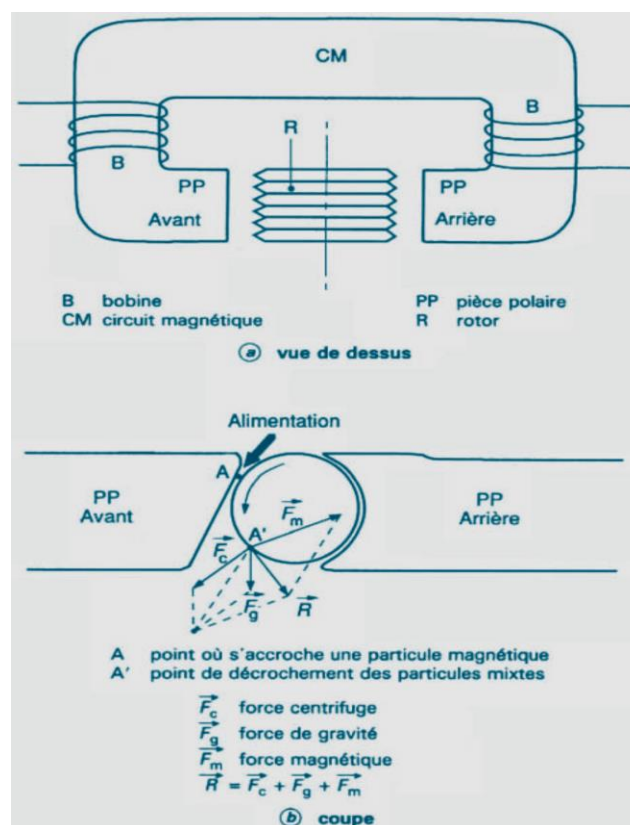


Figure 7. Séparateur à haute intensité en voie sèche à rotor

2.2.8.4. Séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI) en voie humide

a) Séparateurs Jones : Dans ce genre de séparateur, l'alimentation (pulpe) circule à travers un matériel ferromagnétique (matrice d'extraction) aimanté par un champ magnétique extérieur et placé dans une enceinte annulaire (carrousel) tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique à entrefer. 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.

Le principe de ces appareils (figures 8) 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.

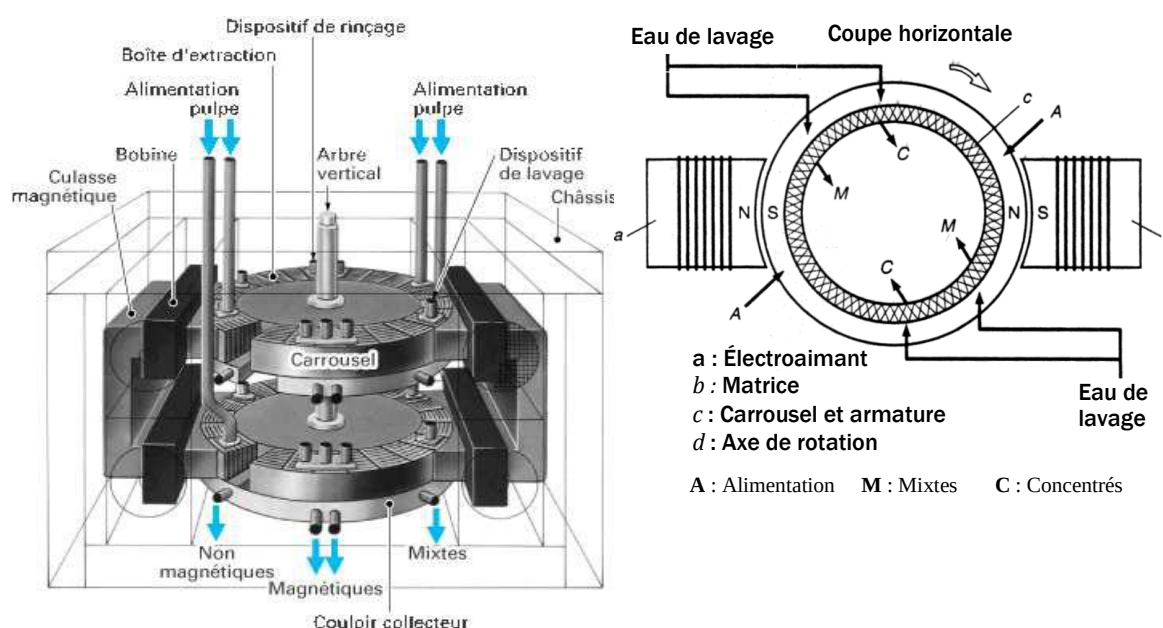


Figure 8. Séparateur à haute intensité en voie humide type Jones

Les particules restées piégées sont entraînées par la rotation du carrousel vers une zone de champ magnétique faible et sont éliminées par lavage avec un jet d'eau sous pression. Ces séparateurs développent des champs magnétiques allant de 400 à 1200 kA/m pour une granulométrie en général inférieure à 1 mm, mais aussi de 4 à 5 mm pour un entrefer large et un % solide de l'alimentation de 55 %. Leur capacité varie, suivant le type d'appareil, de 10 à 300 t/h. La vitesse de rotation du rotor est de 3,5 tr/min, l'intensité du champ magnétique est au maximum de 1 200 kA/m entre les plaques.

b) Séparateur Boxmag Rapid : 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 9), 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.

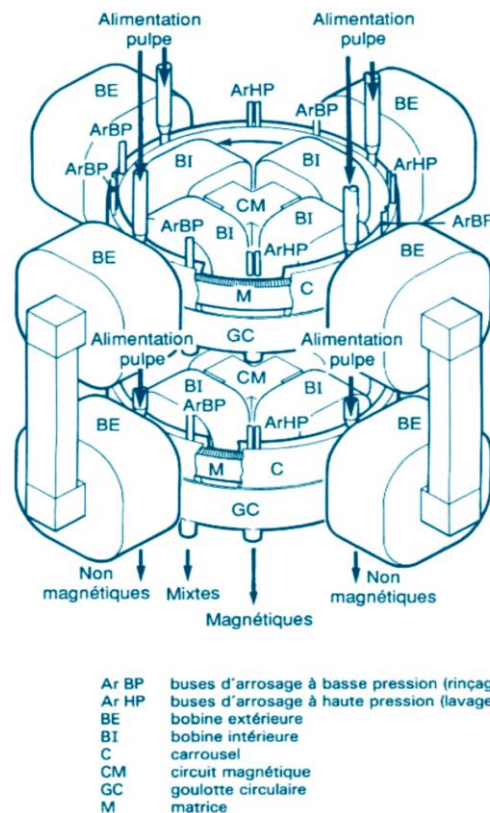


Figure 9. Séparateur à haute intensité en voie humide (Boxmag Rapid)

Chapitre 3. La séparation électrostatique

3.1. Principes

La séparation électrostatique tire profit de la différence de conductivité électrique qui existe entre les matériaux afin d'accomplir leur séparation. Cette technique s'applique à un nombre relativement restreint de minéraux tels que le rutile, l'ilménite, le zircon, l'étain, les phosphates et certains sels. Elle peut aussi s'appliquer à la séparation de particules métalliques dans le sable.

3.2. Définition du champ électrique

Un champ électrique est une région de l'espace où une charge électrique est soumise à une force électrique. La quantité de ligne des forces électriques sur l'unité de surface ou leurs densités caractérisent l'intensité du champ électrique.

$$E = \frac{F}{Q} \text{ (v/m)} \quad (1)$$

F : force agissante sur la charge.

Q : valeur de la charge.

3.3. Forces agissant sur les particules

• **Force du champ électrostatique** : Le champ électrique et la force électrostatique sont liés et si l'on connaît le champ qui règne en un point de l'espace alors il est possible de déterminer la valeur de la force exercée sur une charge q :

$$F_e = QE \quad (2)$$

Q : Valeur de la charge.

E : Intensité du champ électrique

• **Forces mécaniques**

• **Force centrifuge** : elle arrache aussi la particule de la surface du tambour

$$F_c = \frac{2m v^2}{D} \quad (3)$$

• **Force de pesanteur**

$$F_g = mg \quad (4)$$

Avec:

m : masse de la particule ;

v : vitesse du tambour ;

D : diamètre du tambour ;

g : gravitation universelle.

3.4. Propriétés électriques des minéraux

Pour la séparation électrique on utilise la différence en conductivité électrique, en perméabilité diélectrique.

Les minéraux sont divisés en trois groupes selon leur valeur en conductivité électrique

➤ **Conducteur** : la conductivité électrique est égale à $10^2 - 10^3 \text{ Sm/m}$, la résistance électrique spécifique à 10^9 Ohm/m .

Les minéraux conducteurs se rapportent : Titano-magnétite, Ilménite, Pyrite, Rutile.

➤ **Semi-conducteur** : la conductivité électrique est égale à $10 \cdot 10^{-3} \text{ Sm/m}$. Les minéraux semi-conducteur se rapportent : Bauxite, Zircon, Wolframite.

Le semi-conducteur change sa conductivité électrique sous l'action de la température et sous l'irradiation par les particules vides, ces propriétés sont utilisées lors de la séparation électrique.

➤ **Non conducteur** : la conductivité électrique est égale à 10^{-8} Sm/m . la résistance électrique spécifique à 10^{12} Ohm/m . Les minéraux non conducteur se rapportent : Quartz, Tourmaline, Argile.

La conductivité électrique apparaît dans les non conducteurs uniquement lors des hautes températures.

3.5. Les appareils

Il existe deux types de séparateurs électrostatiques: les séparateurs électrostatiques et les séparateurs électrodynamiques (aussi appelés séparateurs à haute tension). Seuls les séparateurs électrodynamiques sont abordés dans ce document car il s'agit des équipements les plus utilisés actuellement. Cependant, le principe de séparation est sensiblement le même pour les deux équipements.

Le séparateur électrodynamique est composé d'un cylindre mis à la terre et de charge positive, d'une électrode ionique de charge négative et d'une électrode statique de charge négative (figure 1). Les particules constituant l'alimentation tombent sur le cylindre et passent à travers un faisceau d'ions mobiles en provenance de l'électrode ionique. Les particules qui présentent une faible conductivité électrique acquièrent une forte charge de surface négative et restent collées à la surface du cylindre. Pour leur part, les particules conductrices n'acquièrent pas de charge et suivent une trajectoire normale. Cette trajectoire les mène dans le champ d'attraction de la seconde électrode (l'électrode statique). Elle a pour fonction d'attirer les particules conductrices loin du cylindre afin d'augmenter la sélectivité de la séparation. Ces dernières tombent ensuite par gravité à une bonne distance du cylindre. Les particules non-

conductrices restent collées au cylindre tout au long du processus. Un balai qui est disposé à l'opposé des électrodes permet de détacher ces particules afin de les récupérer.

La capacité maximale de ces équipements est de 1,5 tonne métrique de solides secs par heure et par mètre de largeur du cylindre. Les séparateurs électrodynamiques ne disposent donc pas d'une capacité élevée. De plus, la valeur de la capacité s'applique uniquement au traitement de minerai et peut varier pour les applications environnementales.

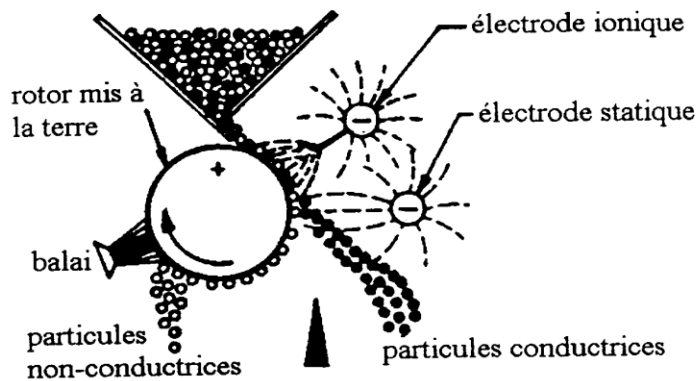


Figure 1 séparateur électrodynamique

3.6. Conditions d'application

L'utilisation des équipements de séparation électrostatique est appropriée pour les particules dont la taille est comprise entre 60 et 500 μm . Cependant, la capacité diminue considérablement pour les particules de 75 μm et moins. Il est essentiel de souligner que l'application de la séparation électrostatique nécessite une condition primordiale: le matériel à traiter doit être parfaitement sec car la présence d'humidité altère le comportement des particules. Pour terminer, la séparation de particules métalliques dans le sable est probablement l'application environnementale la plus avantageuse de la séparation électrostatique.

Références :

1. Serge Bouchard, Traitement du minéral, édition le Criffon d'argile, 2001, Canada.
2. Barry A. Wills, Tim Napier-Munn .Mineral processing technology, Elsevier Science & Technology Books 2006
3. Gill, C. B. Materials Beneficiation. New York: Springer-Verlag; 1991;
4. Gosselin A., Blackburn D., Bergeron M., 1999. Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques, Direction de la Protection de l'Environnement, Sainte-Foy, Canada.
5. Nakai Y., Mishima F., Akiyama Y., Nishijima S., 2011. Development of high gradient magnetic separation system under dry condition, Physica C 470, 1812-1817.
6. Gérard GILLET. Séparation magnétique. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, A 5 220.