

## METHODE DE SEPARATION MAGNETIQUE

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 (Gill, 1991).

La séparation magnétique est accomplie par entraînement des matériaux susceptibles lors de leur passage à travers un champ magnétique (figure01). Ce dernier peut être produit à l'aide d'un aimant permanent ou d'un électroaimant. L'utilisation des électroaimants comporte plusieurs avantages dont la possibilité d'ajuster l'intensité du champ magnétique en variant l'intensité du courant électrique. De plus, le champ magnétique produit par les électroaimants peut atteindre une intensité plus élevée que l'intensité d'un champ engendré par des aimants permanents.

La grosseur et la masse volumique des particules ou morceaux devant être séparés influencent le traitement. La séparation des grosses particules denses requiert un champ magnétique plus intense que la séparation des petites particules légères. Il est essentiel de souligner que l'efficacité du procédé dépend du degré de libération ou de la pureté des matériaux à séparer.

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.

Les séparateurs à haute intensité présentent des coûts d'achat et d'opération très élevés. En effet, la production d'un champ magnétique intense entraîne une consommation élevée d'électricité. La valeur des minerais traités par cette méthode justifie de tels coûts.

### **Aspect théorique de la séparation magnétique**

#### **Notion du champ magnétique**

Le magnétisme des atomes résulte du mouvement des électrons qui induisent un moment magnétique dit orbital, associé à leur révolution autour du noyau ainsi qu'un moment magnétique dit de spin, associé à leur relation sur eux-mêmes.

Le moment magnétique total est la combinaison vectorielle des moments orbitaux et de spin.

La susceptibilité magnétique est caractéristique importante de la matrice, elle fait l'objet d'une séparation

ou non, elle est présentée dans plusieurs relations avec l'intensité ( $I$ ) du champ ( $\vec{I} = \chi \vec{H}$ ), ou l'aimantation,  $M$ ; ( $\vec{M} = \chi \vec{H}$ ), etc. Plusieurs paramètres interviennent dans la caractérisation et la définition du champ magnétique dans une séparation magnétique tel que, l'intensité d'aimantation  $I$ , ( $\vec{I} = \chi \vec{H}$ ), l'induction  $\vec{B}$ ; ( $\vec{B} = \mu \vec{H}$ ), la perméabilité ( $\mu = 1 + 4\pi \chi_0$ ), ainsi que la susceptibilité magnétique.

En outre, d'autres paramètres physiques peuvent régir la variation du champ magnétique et par suite la qualité de séparation, il s'agit de l'agitation thermique ( $k_B T$ ) qui a une tendance de désordonner l'agencement des moments magnétiques, donc les caractéristiques magnétiques de la matière.

### Classification des substances minérales

Selon les propriétés magnétiques de la matière il convient de distinguer le diamagnétisme, attribuable au moment induit dans les atomes par le champ magnétique du paramagnétisme qui du à l'action du champ sur les moments magnétiques permanents des atomes et qui tend à les aligner dans sa propre direction malgré l'agitation thermique.

Quand les actions naturelles entre les moments atomiques sont suffisamment intense pour participer à cet alignement, on est en présence du ferromagnétisme, caractérisé par l'existence d'une aimantation spontanée en l'absence de champ extérieur et par le phénomène d'hystérésis. L'existence de champs moléculaires locaux caractéristiques de chacun des différents sites cristallins permet d'interpréter l'antiferromagnétisme et le ferromagnétisme.

Les substances diamagnétiques et paramagnétiques présentent une aimantation proportionnelle à la valeur du champ magnétique. Ces corps sont donc appelés magnétiques parfaits et ont une valeur de susceptibilité magnétique spécifique.

- K négative pour les éléments diamagnétiques ( $-2 \times 10^{-9}$  à  $-7 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/kg) et  $u < 1$
- K positives pour les éléments paramagnétiques ( $0.1 \times 10^{-6}$  à  $5 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/kg) et  $u > 1$ .

Cette valeur peut varier en fonction des impuretés ou des modifications du réseau cristallin, les substances antiferromagnétiques comme la sidérose  $\text{FeCO}_3$ , ou comme divers oxydes  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{CO}_3$  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, les éléments, comme le fer, le nickel et le cobalt sont caractérisés par une courbe d'aimantation et de désaimantation (cycle d'hystérésis) dont les points principaux sont l'aimantation à saturation  $M_s$  et l'aimantation rémanente  $M_p$  qui subsistent en l'absence du champ magnétique, et le champ magnétique coercitif  $H_0$  qui annule l'aimantation.

#### • Les diamagnétiques

Il a été mentionné que les substances magnétiques étaient caractérisées par une susceptibilité  $k$  négative et ne dépend pas du champ  $H$  et de la température.

Dans un champ non uniforme la force  $\vec{F}$  qui s'exerce sur une particule est dirigée en sens inverse du sens positif du gradient de champ  $\partial \vec{H} / \partial \vec{x}$ , la particule s'éloigne des zones du champ fort pour gagner les zones du champ faible.

- **Les paramagnétiques**

Les substances sont caractérisées par une susceptibilité  $k$  positive, elle est indépendante du champ  $\vec{H}$  et placée dans un champ magnétique non uniforme, une substance magnétique est soumise, à une force  $F$  positive, dirigée dans le sens positif du gradient de champ, elle est attirée vers les zones de champ fort.

Les paramagnétismes ont un comportement variable avec la température.

- **Les ferromagnétiques**

Ont les propriétés suivantes

Elles sont fortement attirables dans les zones de champ fort.

Leurs susceptibilités dépendent du champ, des traitements thermiques et mécaniques

Elles possèdent un cycle d'hystérésis. Elles deviennent à certaines températures paramagnétiques variables. Elles ont une saturation absolue qui est la somme des moments des porteurs.

Le fer, le Cobalt, le Nickel appartiennent à cette catégorie ainsi que les phases à liaisons métalliques, des dérivées semi métalliques.

Tandis que les substances minérales en fonction de leur susceptibilité en distinguent quatre groupes suivant leur comportement dans un champ magnétique.

**Minéraux fortement magnétiques**

Ces minéraux peuvent être extraits par des séparateurs offrant un champ magnétique d'intensité un plus égale 1500CE, et pour  $k = \mu_0 (>> 1)$ , la force d'attraction magnétique

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p \text{grad} (H^2) / D \text{ pour } H \leq D \text{ Msat}$$

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p \text{Msat grad} (H) \text{ pour } H > D \text{ Msat.}$$

Sachent que  $\vec{I} = \vec{J} = \mu_0 M$  et  $M = \vec{H} / D$ .

Où

$D$  : est le coefficient de démagnétisation des particules

$\text{Msat}$  : est l'aimantation à la saturation.

Le groupe de ces minéraux comprend la magnétite, la franklinite.

**Minéraux faiblement magnétiques**

C'est le groupe le plus étendu, leur aimantation nécessite ma mise en œuvre des champs dont l'intensité est comprise entre 6000 et 30000 CE, et leurs susceptibilité de l'ordre de 15 à  $600 \cdot 10^{-6}$  CGS.

La force d'attraction magnétique est :

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 k_p V_p \text{grad } (H) \text{ pour } k_p \leq 1 \dots \dots \dots (3).$$

**Minéraux médiocrement magnétiques**

Ce groupe a une susceptibilité magnétique qui s'étale entre 6000 et 3000 .10-6 CGS et l'intensité du champ appliqué doit atteindre 3000 à 6000 CE.

La force d'attraction magnétique ne peut être exprimée que par une aimantation spécifique  $M'/M \rho_P$

$$F_m = \mu_0 m M'_{sat} \text{grad } (H) \dots \dots \dots (4).$$

**Minéraux non magnétiques**

Ces minéraux non récupérables, même avec un séparateur d'intensité de 30 000 CE comprennent les paramagnétiques de susceptibilité magnétique inférieur à 15 .10-6 CGS et la totalité des diamagnétiques : la scheelite, la molybdénite, parce que toujours la cassitérite et les minéraux non métalliques.

**Action des forces magnétiques et mécaniques**

Le phénomène de séparation magnétique s'effectue dans espace de champ m de volume délimité dans un séparateur, ce dernier fait modifier les caractéristiques d'un champ magnétique dont il engendre un champ magnétique agissant de façon sélective sur les corps qui présentant la plus grande aptitude à l'aimantation.

**1. 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.

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 V_p \left( \frac{K_p}{1 + DK_p} \right) \text{Grad } (H^2) \dots \dots \dots (5).$$

$D$ : Coefficient de démagnétisation des particules

$V_p, K_p$  : Volume, et susceptibilité magnétique du corps considéré

$\mu_0$ : Perméabilité de vide.  $(4\pi \cdot 10^{-2} H/m)$

$Grad$  : Gradient du champ magnétique suivant les directions (0x, Oy, Oz)

$\vec{H}$  : Le champ magnétique.

Soit une particule diamagnétique de volume V de susceptible magnétique K est supposée dans le vide, sa force d'attraction s'écrit :

$$\vec{F}_m = \vec{\nabla} \int_V \vec{J} \vec{H} d_v$$

$$J = \frac{K}{1+DK} \mu_0 \vec{H}$$

L'intensité d'aimantation ou la polarisation magnétique.

$\vec{\nabla}$  : Le gradient du champ magnétique suivant les directions 0x, 0y, 0z

$$\vec{\nabla} = Grad = \frac{dH}{dx} \vec{a} + \frac{dH}{dy} \vec{j} + \frac{dH}{dz} \vec{k} \dots\dots\dots(6).$$

$$\vec{F}_m = \frac{m_0 KV}{1 + (K/3)} (\vec{H} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H}$$

Après l'intégration est assimilation de la particule a dipôle, le moment :  $\vec{m}=VM$  et la particule (dipôle) assimilé à une sphère (D=V3) et comme la particule est paramagnétique  $k \leq 1$

$$\vec{F}_m = 1/2 m_0 k V \vec{\nabla} (H^2) = 1/2 \mu_0 V grad (H^2)$$

$$V = \frac{k_p}{1 + D_p K_p}$$

Cette expression peut être simplifiée comme suit :

$$F_m = 1/2 \mu_0 K V \nabla (H^2) \dots\dots\dots(7).$$

**1. Forces antagonistes (mécanique)**

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

La force de graviter :  $\vec{F}_g = 4/3 \pi (\rho_p - \rho_f) R_p^3 \vec{g}$

La force centrifuge :  $\vec{F}_c = \rho_p P_p W^2 R$

La force d'entraînement par le fluide :  $\vec{F} = 6 \pi \eta R_p (\vec{V}_f - \vec{V}_p)$

Avec :

$R$  : Rayon du tambour (ou cylindre) de séparation.

$R_p$  : Rayon de la particule,

$\vec{g}$  : Accélération due à la pesanteur.

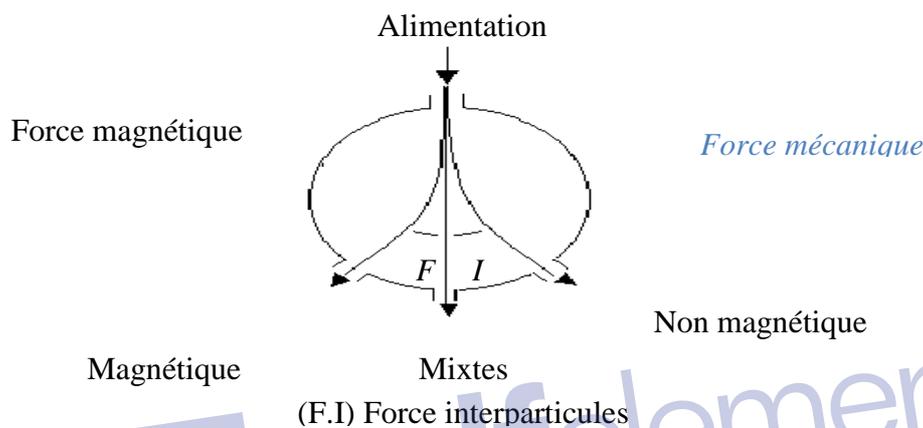
$\vec{V}_P$  et  $\vec{V}_F$  : vitesse angulaire de la particule,

$W$  : Vitesse angulaire de la particule,

$\rho_P$  et  $\rho_F$  : Masse volumiques de la particule et du fluide.

$n$  : Viscosité dynamique du fluide.

Pour que la séparation ait lieu, il est nécessaire que la valeur de la force magnétique (interaction) soit supérieure à la somme des forces antagonistes (mécanique) développées par le système, et des forces interparticules qui peuvent s'apparaître, comme le phénomène électrostatique. L'action de toutes ces forces s'est montrée par la (figure 01).



**Figure 01.** Schéma de principe de séparation magnétique

**Aspect pratique de la séparation magnétique**

**Matrice d'extraction**

La matrice d'extraction est l'organe d'un appareil de séparation magnétique. Elle est la source de champ magnétique d'où l'origine de la force utilisée pour la séparation.

Elle se présente en deux catégories essentielles Aimants permanentes, et des circuits conventionnels (électroaimants), dont chacune a des différentes suivant les propriétés magnétiques présentées par le minerai à traiter.

**Aimants permanents**

L'utilisation d'aimants permanents ont des dispositions transversales, longitudinales ou radiales, fixes ou en mouvement dans un tambour, rotor ou polie inoxydable, ils sont des matériaux caractérisés par une induction rémanente ( $B_r$ ) les rendant aptes à créer un champ magnétique sans dépenses d'énergie, les matériaux sont nombreux (Remulloy, Vicalloy, Alnico, Ferrites), mais les aimants les plus couramment utilisés actuellement sont constitués d'alliage céramique d'énergie spécifique de type  $Co^5RE$  (où RE est

un élément de terres rares : Sm, Sr, Ce, Nd, etc.). Ou Fer-Neodyme-Bore (Fr-Nd-B), dont les intensités de champ magnétique peuvent atteindre,  $1200 \text{ KA/m}$  et la valeur de  $\text{Grad} (H^2) = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ A/m}^3$ .

Les aimants permanents classiques sont utilisés dans les séparateurs magnétiques à basse intensité destinée à la séparation des substances ferromagnétiques.

Les aimants d'énergie spécifique, à base terre rare  $\text{Co}^5\text{RE}$ , peuvent être utilisés dans les séparateurs à haute intensité en voie sèche ou humide.

**Circuits conventionnels (électroaimants)**

Forment une matrice ferromagnétique sous forme d'un bobinage en cuivre ou un supraconducteur, assurant un gradient d'énergie magnétique suffisante à effectué une séparation, ce type de matrice présente un avantage par rapport aux d'aimants permanents dont le fait que le gradient soit réglable ce qui permet de les utilisées dans la séparation des substances de différente susceptibilité magnétique. Une telle matrice trouve une large application dans les séparateurs magnétiques en voie humide que sèche.

La matrice d'extraction est le matériel qui est placé dans un champ magnétique, s'aimante, concentre les lignes de champ magnétique et de ce fait génère un gradient de champ et une force. Les configurations de matrice les plus couramment utilisées sont représentées sous forme de (plaques dentées, billes, mousse de fer expansé, grilles trapézoïdales, assemblage de barreaux cylindriques ou biseautés, bobines de différentes formes...).

- **Classification des séparateurs**

En séparation magnétique, de nombreux appareils sont disponibles chez le constructeur 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 force magnétique montrent que cette dernière dépend de deux facteurs principaux :

La matière (ou la particule) est caractérisée par sa susceptibilité magnétique et son volume

Le séparateur magnétique, par le produit :  $\mu_0 \text{grad}(H^2)$  c'est à dire par la forme de son champ magnétique. Les séparateurs magnétiques peuvent donc se classer en trois grandes familles :

Les séparateurs à basse intensité (aimant permanent) avec :  $\mu_0 \text{grad} (H^2) = 2 \times 10^4 \text{ à } 10^6 \text{ N/m}^3$

Les séparateurs à haute intensité (électroaimant ou aimant permanent) en céramique avec :  $\mu_0 \text{grad} (H^2) = 2 \times 10^7 \text{ à } 4 \times 10^9 \text{ N/m}^3$

Les séparateurs à haut gradient et/ou ont haut champ (solénoïde) avec :  $\mu_0 \text{grad} (H^2) = 6 \times 10^{10} \text{ à } 10^{12} \text{ N/m}^3$

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, on cuivre ou supra conductrices) Sont mieux adaptés aux traitements d'épuration de particules ultra fines contenues dans une dispersion solide ou un fluide.

Chacune de ces familles est subdivisée en séparateur travaillant en voie sèche ou en voie humide (en pulpe minérale), les premiers étant réservés en générale aux traitements des produits grossiers (granulométrie de l'ordre du centimètre à quelques millimètres), les seconds à ceux de produits plus fins (granulométrie inférieure à 1mm).

### Séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI) en voie sèche

La technologie de la séparation à haute intensité en voie sèche (rotor induit) existe depuis le début du XXeme siècle et les perfectionnements ont essentiellement porté sur la forme des pièces polaires, la conception du rotor (denture et rigidité) afin de diminuer la flèche du rotor due aux forces magnétiques importantes mises en jeu.

Ce n'est que dans les années 1960 à 1970 que la séparation en voie humide s'est véritablement développée pour aboutir à la technologie efficace que les minéralogistes attendaient pour le traitement des produits fins, ces séparateurs à circuits conventionnels sont à champ magnétique fermé d'une intensité allant de 400KA/m à 1600 KA/m pour une consommation d'énergie comprise entre 0,5 et 2,5 KWh par tonne traitée, les débits solides varient quant a eux suivant le mode de séparation et l'opération de traitement (concentration, épuration) 180 t/h.

L'alimentation des particules ne doit pas comporter un trop forte pourcentage de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques (<0,5 %) En effet la rémanence de ces circuits ne permet pas de les éliminer complètement et entre 6 et leur

Présence risque de colmater les appareils. Il est souvent conseillé de faire passer préalablement, l'alimentation dans un séparateur magnétique à basse intensité.

Récemment, l'apparition d'aimants permanents sur le marché, à base de terres rares (Sm-Co, ou Fe-Nd-B) a permis la réalisation de nouveaux séparateurs à haute intensité. Ces derniers substituent dans. Beaucoup de cas aux appareils traditionnels du fait de leurs coûts d'investissement et de fonctionnement nettement inférieur.

Dans le cas des séparateurs magnétiques à haute intensité, les dispositifs générateurs du champ magnétique (matrice d'extraction) sont soit :

Un électroaimant ou circuit conventionnel, qui est composé d'un ou de bobines en cuivre résistif entourant d'un noyau de fer doux ( $\mu_r = \beta / \mu_0$  très élevé). Ces systèmes magnétiques conventionnels sont capables de créer un champ magnétique d'environ 1600KA/m.

- **Séparateurs travaillant par extraction**

Ce sont principalement les séparateurs à bandes transversales et à disques ces séparateurs sont équipés d'une bande convoyeuse passant entre les deux pôles d'un Électroaimant (entrefer) et soit 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 sont attirés par la pièce polaire supérieure et évacuée sur le coté par la bande transversale ou le disque. Ces séparateurs développent des champs variant de 800 à 1600 KA/m et traitent des débits compris entre 0,3 t/h/m à 4 t/h/m (la largeur utile variant entre 100 et 800 mm.)

La granulométrie idéale de l'alimentation est comprise entre  $150\mu\text{m}$  et  $10\text{mm}$ , mais une bonne efficacité est possible jusqu'à  $75\mu\text{m}$  (paramagnétique fort) Ces appareils sont utilisés pour traiter des substances telle que : (l'ilménite, la chromite, la manizite, le wolfromite, les produits pharmaceutiques ou chimiques, les céramiques, etc.).

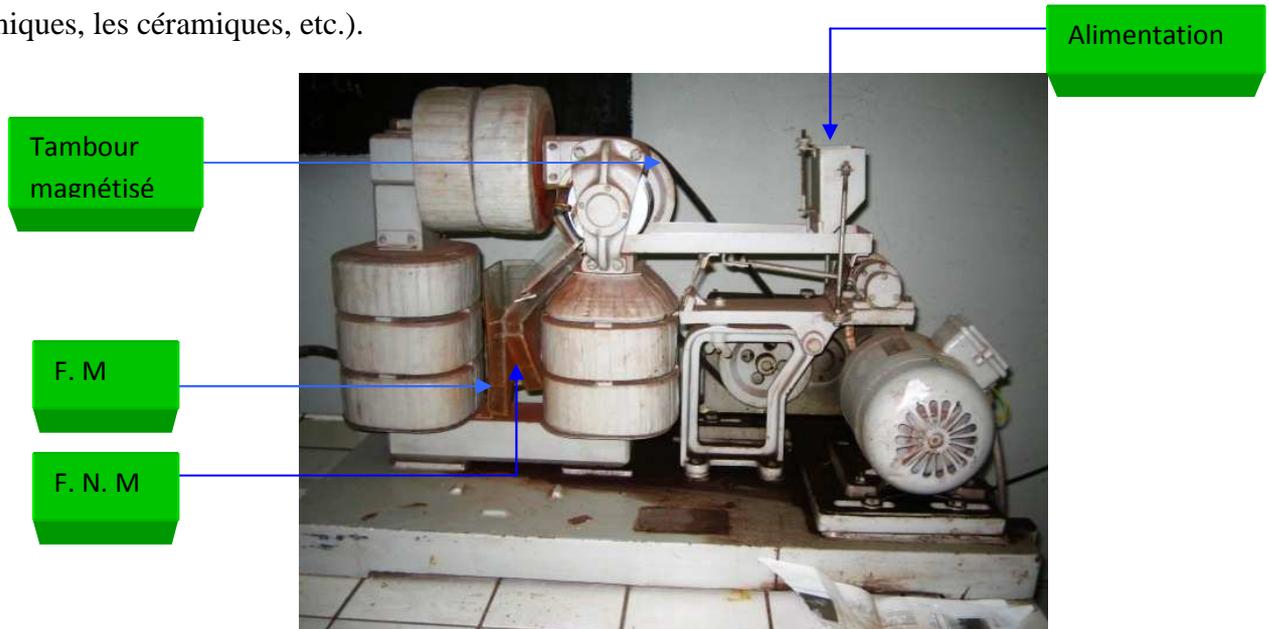


Figure 02. Séparation magnétique à H. I

• **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 (collage)

Ils comportent (figure 03), 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).

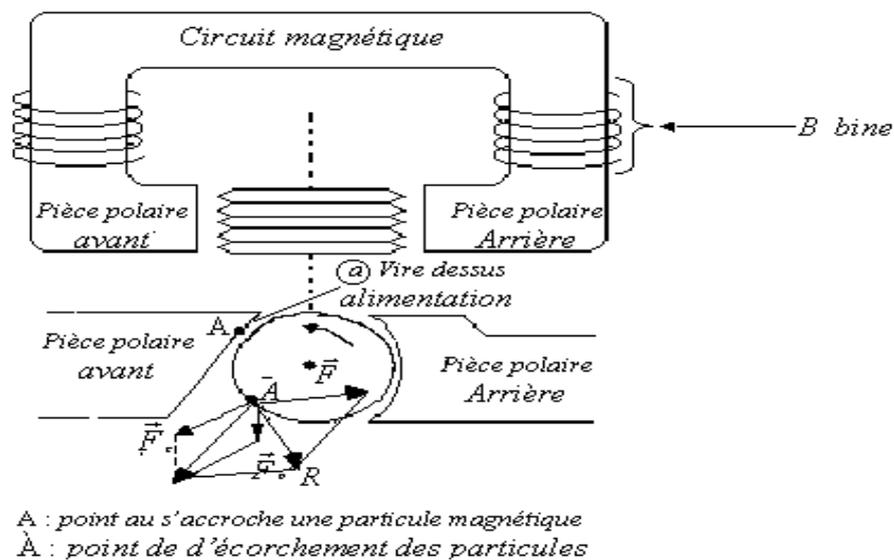


Figure 03. Séparateur magnétique à aimants céramique haut champ.

La séparation a lieu dans un intervalle (entrefer) réglable, situé entre la pièce polaire avant 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, des dents ou des 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 ou elles sont décollées par une brosse, les particules non magnétiques quittent le système sous l'action combinée de la force centrifuge et la force de gravité, l'entrefer ( $\ell$ ) et le pas ( $s$ ) de denture sont adaptés à la granulométrie ( $d$ ) du produit à traiter ( $s = 2\ell \geq 4d$ ).

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 la c'est le séparateur à bande

Il est obtenu par empilage alterné de rondelles en aimants permanents Nd-Fe-B et de rondelle en acier doux la somme des épaisseurs des rondelles d'aciers et d'aimants définit le pas polaire de l'assemblage. 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, chrome, wolframite, ilménite, oxydes de manganèse, etc.

L'épuration de minéraux industriels : feldspaths, sables andalousites, ...etc.

La séparation entre eux de minéraux paramagnétiques (minéraux des sables) à condition qu'ils possèdent une différence de susceptibilité magnétique suffisante (ilménite et monazite, xénotime et tourmaline, hématite, etc.)

Les séparateurs à haute intensité en voie sèche 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 faible, 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 40 m et que le choix de cette méthode conduit à des installations plus complexes et plus onéreuses (insalubrité des installations séchage indispensable des produits avant traitement, faible capacité des séparateurs).

### Séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI) en voie sèche

- **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 continue (*over band*) ou discontinue, sont des séparateurs très efficaces pour enlever des éléments ferreux indésirables retrouvant pris, dans des décharges transportées par des convoyeurs à courroie. Ils peuvent se placer en position longitudinale au-dessus. Ces trieurs sont principalement utilisés en protection, d'autres appareils (concasseurs, brayeurs, cribles, ...). Et pour les scories de la sidérurgie.

## 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 (figure 04).

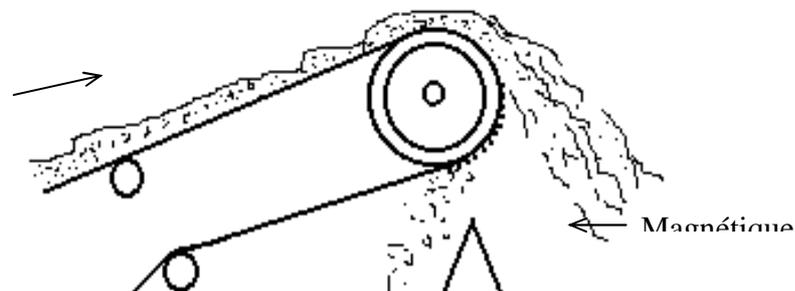


Figure04 : Séparateur à poulie

## Tambours déferrailleurs :

Ces appareils sont généralement alimentés par le haut, dans les opérations de pré concentration (récupération élevée) ou en dessous de tombeur 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 spéciaux pour résister à l'usure et sont capables de traiter des produits grossiers (200mm de dimension) à un débit de l'ordre 200 à 300 t/h /m.

## Séparateur tombeur et centrifuge

Ces séparateurs sont équipés d'un tombeur (ou virole) à l'intérieur duquel se trouve une couronne d'aimant permanent fixe les aimants sont généralement disposés selon une structure axiale et sont espacés régulièrement avec une polarité alternée, de manière à ce que le flux magnétique soit utilisé au maximum pour la séparation. La matière est alimentée sur le tambour au niveau de la couronne aimantée. Les particules ferromagnétiques attirées dans les champs magnétiques se collent au tombeur et y adhèrent sous l'action de la force magnétique. La rotation du tombeur les amène à l'arrière de celui-ci dans une zone de champs magnétique plus faible où ils ont décollé. 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 la force de gravité et centrifuge qui tendent à détacher et éjecter les particules.

Les performances de ces séparateurs varient avec les types d'appareils, mais également avec la vitesse de rotation du tambour les dispositions de montages, la conception du circuit magnétique, les débits, la

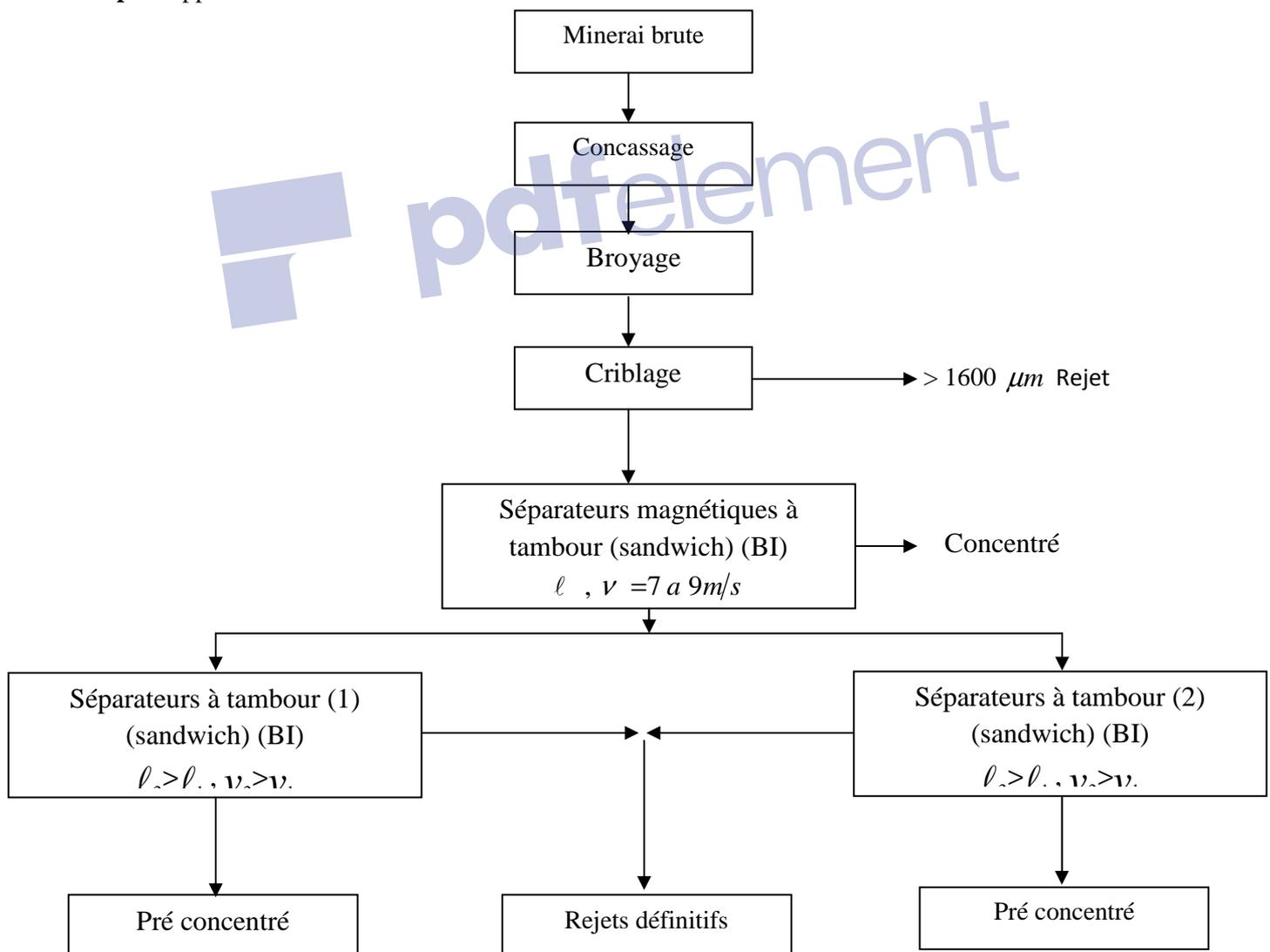
granulométrie et la composition minéralogique du produit à traiter, ils sont constitués d'un tambour renfermant un système magnétique immobile formant un arc de 150 à 180°, dont les éléments actifs peuvent être transversaux, longitudinaux au radio, les débits sont de l'ordre de 200 à 300 t/h/m et les vitesses périphériques varient de 0,6 à 2,2 m/s.

L'évolution technologique à donner des séparateurs à aimants permanents en céramique et à grande vitesse périphérique permettant de traiter des produits de granulométrie plus fines, ces séparateurs centrifuge sont des appareils à tambour ayant une vitesse périphérique de l'ordre de 1 à 12 m/s, la partie active (matrice extraction) du séparateur comprenant une série aimant en céramique à polarité alternée et à pas polaire relativement faible un arc magnétique.

Les séparateurs magnétiques à basse intensité, de type classique n'agissent de façon efficace que sur les corps ferromagnétique qui sont le siège de forces importantes même dans des champs magnétique faibles et peu convergent ( $H=300 \text{ ka/m}$  et  $\text{grad}(H^2) = 2 \times 10^{11} \text{ A}^2/\text{m}^3$ ).

Les séparateurs sont principalement utilisés pour la concentration du minerai de fer (magnétite) ou de minéraux ferromagnétiques, mais également pour l'épuration de substance utile (céramique, sable, etc....)

**Exemple :** application à la concentration en voie sèche d'un minerai de fer



Exemple d'application de concentration du minerai de fer en voie sèche

**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 trois principales forces mises en œuvre sont : la force d'attraction magnétique, la force d'entraînement fluide et la force centrifuge de la virole (rotor, tambour), mis a part *MITSUBISHI*, qui commercialise les séparateurs est a tambour.

Le tambour en acier inoxydable tourne autour d'un assemblage magnétique ; recouvert d'un revêtement anti-usure en caoutchouc.

Charges d'évacuées les produits magnétiques attirés par le système magnétique, il tourne à faible vitesse (0,6 à 1,3 m/s). Les débits spécifiques de produits à traiter en pulpe se situent entre 100 et 200 m<sup>2</sup>/h<sup>-1</sup>. ce qui donne en fonction de la concentration solide (25 à 50% ), de la vitesse périphérique du tambour (de diamètre 600 à 1500 mm) et du type de traitement des capacités du produit sec varient de 1 à 120t/h/m<sup>-1</sup>.

Ces appareils à champs magnétiques profond et à pole alterné longitudinaux permettent d'obtenir soit des concentrés à haute teneur, soit des stériles parfaitement apurés, 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 a une application bien spécifique.

**Les séparateurs a courant parallèle : (Figure-6-a)**

Sont surtout adaptés aux traitements de produits grenus et pour 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 les champs 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.

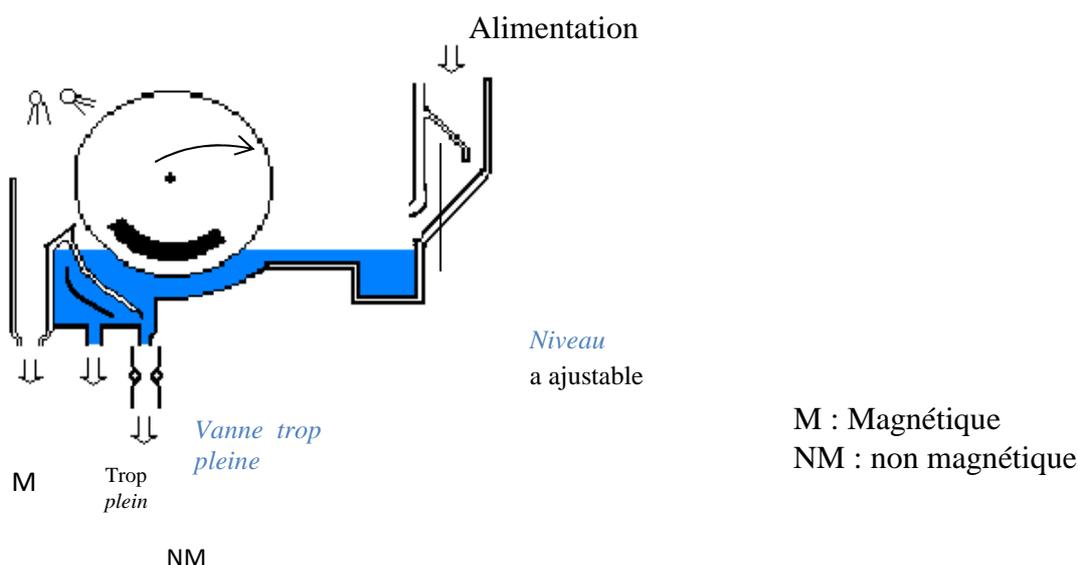
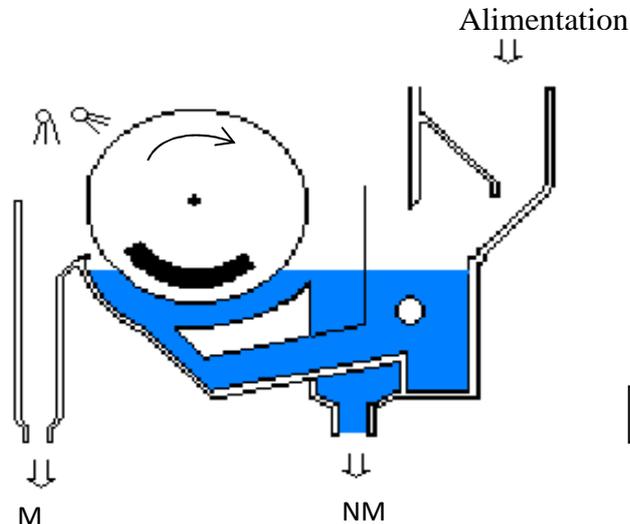


Figure-6-a- Courant parallèle

**Les séparateurs à contre rotation :** (figure 6-b-)

Sont plus spécialement adaptés au traitement des produits de granulométrie inférieure à 0,6mm.ils convient tout particulièrement à l'épuration de produits non magnétique et cela à des débits parcourant de la rotation du tambour.

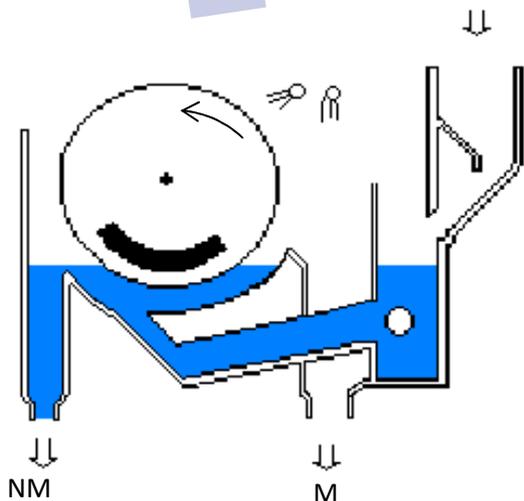


M : Magnétique

Figure 06-b- : Contre rotation

**Les séparateurs à contre courant :** (figure 06-c-)

Sont bien adaptés au traitement des produits de granulométrie inférieure à 1 mm ou très fine (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 de produit concentré ou épuré demandée. Un agencement de ces différents types est souvent réalisé.



M : Magnétique

Figure 06-c- : Contre - rotation

### 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 01** : Application et capacité des appareils de séparation magnétique

Appareil	Limite granulométrique	Capacité maximale
Convoyeur à tête magnétique (aimant permanent)	> 0,5 cm	130,5 m/min *
Convoyeur à tête magnétique (électro-aimant)	> 0,5 cm	150 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

\* La capacité réelle doit être déduite à l'aide de l'épaisseur de matériel qui circule sur la courroie et de la largeur de la courroie.

