

### 3.3. LA SÉPARATION MAGNÉTIQUE

#### 3.3.1. Principe de la séparation

La séparation magnétique est utilisée pour augmenter la concentration d'un élément magnétique ou pour séparer des éléments magnétiques présents dans un mélange monophasique ou multiphasique. Le séparateur magnétique produit un champ magnétique non-homogène dans l'espace de traitement, qui agit sur les particules ayant la plus grande aptitude à l'aimantation.

La force de séparation est la force magnétique. La séparation des particules magnétiques dépend de leurs mouvements en réponse à la force magnétique et aux forces compétitrices telles que : la gravité, l'inertie, la traînée hydrodynamique et les forces centrifuges. Les forces inter-particulaires magnétiques et électrostatiques entrent aussi en compétition avec la force magnétique tel que montré à la Figure 3.13.

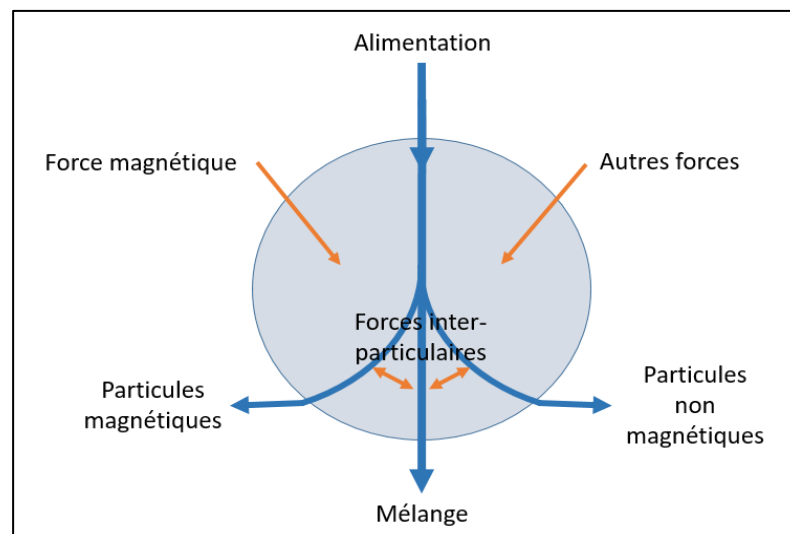


Figure 3.13 - Schéma de principe de la séparation magnétique  
©Yoann Robert

Une condition nécessaire pour une bonne séparation magnétique des composés fortement magnétiques de ceux moins magnétiques est la force magnétique  $F_{\text{mag}}^m$ , agissant sur les composés fortement magnétiques, supérieure à la somme de toutes les forces compétitrices  $F_{\text{comp}}^m$ . Simultanément, la force magnétique  $F_{\text{mag}}^{nm}$ , agissant sur les particules moins magnétiques, doit être plus petite que la somme des forces compétitrices correspondantes  $F_{\text{comp}}^{nm}$ . Ainsi, dans un séparateur magnétique, ces deux conditions doivent être rencontrées (Svoboda et al., 2003):

$$F_{\text{mag}}^m \geq F_{\text{comp}}^m \text{ et } F_{\text{mag}}^{nm} \leq F_{\text{comp}}^{nm} \quad 3.16$$

Pour obtenir un taux de récupération élevé de composés magnétiques, la force magnétique de séparation doit être plus grande que la somme des forces compétitrices, tel que :

$$F_{\text{mag}} \gg F_{\text{comp}} \quad 3.17$$

Cependant, il n'y aura pas de distinction entre les différents composés magnétiques. La sélectivité du processus de séparation est déterminée par les valeurs relatives des forces magnétiques et compétitrices. Ces dernières sont affectées par les conditions d'opérations du séparateur. Par exemple, pour sélectionner un composé magnétisable (1) d'un autre composé magnétisable (2), les conditions doivent être telles que :

$$F_{\text{mag}}^1 > F_{\text{comp}} > F_{\text{mag}}^2 \quad 3.18$$

De manière générale, un mélange de particules introduit dans un séparateur magnétique sera séparé en deux ou plusieurs composés, comme illustré à la Figure 3.13. Des composés magnétiques et non-magnétiques peuvent être retrouvés dans la fraction magnétique, la fraction non-magnétique et dans le produit mixte. L'efficacité d'un processus de séparation magnétique est majoritairement quantifiée par le calcul du taux de récupération du composé magnétique et la pureté du produit magnétique dans la fraction magnétique. Cependant, ces critères ne sont pas les seuls, dépendamment de l'utilisation ultérieure des composés issus du processus de séparation (Svoboda, 2004).

### 3.3.2. Force magnétique sur une particule magnétisable

La densité d'énergie magnétique dans un matériau linéaire isotrope est donnée par l'expression :

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B} \quad 3.19$$

Où  $H$  et  $B$  sont, respectivement, l'intensité du champ magnétique et la densité de flux magnétique. De l'équation 3.19, l'énergie magnétique d'une particule magnétisable de volume  $V_p$  placée dans un champ magnétique s'écrit :

$$U_{mp} = \frac{1}{2} \mu_p V_p H^2 \quad 3.20$$

Où  $\mu_p$  est la perméabilité magnétique de la particule.

De même, l'énergie magnétique du fluide de volume identique est donnée par :

$$U_{mf} = \frac{1}{2} \mu_f V_p H^2 \quad 3.21$$

Où  $\mu_f$  est la perméabilité magnétique du fluide. Ainsi l'énergie  $U$  du système « particule + fluide » est donnée par la différence des énergies aux équations 3.20 et 3.21 tel que :

$$U = \frac{1}{2} (\mu_f - \mu_p) V_p H^2 \quad 3.22$$

Une force s'exprime en général de la manière suivante :  $\vec{F} = -\nabla U$ , où  $\nabla$  désigne l'opérateur gradient. En considérant l'expression de la susceptibilité magnétique volumique d'un matériau donné à l'équation 3.7, la force magnétique peut être exprimée telle que :

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 (\kappa_p - \kappa_f) V_p \nabla H^2 \quad 3.23$$

Dans certaines situations pratiques, la densité de flux magnétique  $B$  est d'avantage utilisée que l'intensité du champ magnétique  $H$ , ainsi l'équation 3.23 s'écrit telle que :

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} (\kappa_p - \kappa_f) V_p B \nabla B \quad 3.24$$

En pratique, il est plus facile de mesurer la susceptibilité magnétique massique  $X$  que la susceptibilité volumique, l'équation 3.24 devient :

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} (\chi_p - \chi_f) m_p \nabla B \quad 3.25$$

Où  $m_p$  est la masse de la particule. D'après les équations 3.23 à 3.25, la force magnétique est proportionnelle au produit de la densité de flux magnétique et de son gradient. La force magnétique suit la direction du gradient du champ magnétique et non du champ magnétique lui-même.

### **3.3.3. Forces compétitrices dans un séparateur magnétique**

Dans un séparateur magnétique, la force magnétique est en compétition avec de multiples forces externes comme les forces de gravité et d'inertie, la force centrifuge ou encore la force de traînée hydrodynamique. L'importance de la contribution de chacune de ces forces dépend du séparateur et des conditions d'opérations.

#### **3.3.3.1. Forces compétitrices majeures**

Pour une particule sphérique de masse volumique  $\rho_p$ , la force gravitationnelle s'exprime telle que :

$$\vec{F}_g = (\rho_p - \rho_f) V_p \vec{g} \quad 3.26$$

Où  $\rho_f$  est la masse volumique du fluide et  $g$  est l'accélération gravitationnelle.

La force centrifuge est donnée par l'expression :

$$\vec{F}_c = (\rho_p - \rho_f) \omega V_p \vec{r} \quad 3.27$$

Où  $r$  est la position radiale de la particule et  $\omega$  est sa vitesse angulaire. La force de traînée hydrodynamique est obtenue de l'équation de Stokes telle que :

$$\vec{F}_d = 6 \pi \eta r_p (\vec{v}_f - \vec{v}_p) \quad 3.28$$

Où  $\eta$  est la viscosité dynamique du fluide,  $r_p$  est le rayon de la particule, et  $v_f$  et  $v_p$  sont respectivement les vitesses d'écoulement du fluide et de la particule.

### **3.3.3.2. Impact de la distribution granulométrique**

Les différentes forces citées précédemment présentent des dépendances au rayon de la particule, pouvant être exprimées telles que :

$$F_g \approx r_p^3, \quad F_c \approx r_p^3 \quad \text{et} \quad F_d \approx r_p^1 \quad 3.29$$

Ainsi, d'après l'équation 3.29, la force de gravité et la force centrifuge sont dépendantes du rayon de la particule au cube; et leurs influences deviennent significatives pour de grosses particules. Dans le cas contraire, la force de traînée hydrodynamique, dans le régime d'écoulement de Stokes, devient plus importante pour des particules fines. Par exemple, pour des particules telle que l'hématite en mouvement dans de l'eau, la force de gravité est dominante lorsque la granulométrie est supérieure à 500  $\mu\text{m}$ , mais lorsque la granulométrie est inférieure à 50  $\mu\text{m}$ , c'est la force de traînée hydrodynamique qui est la force compétitrice dominante. D'après

les équations 3.23 à 3.25, la force magnétique dépend du rayon de la particule au cube, son influence dans le séparateur dépend des propriétés magnétiques des particules et des paramètres d'opération du séparateur comme le champ magnétique et son gradient. Cependant, la distribution granulométrique est d'avantage discriminante que la susceptibilité magnétique (Svoboda, 2004). Étant donné que  $F_m \approx \lambda r_p^3$ , même une grande différence de susceptibilité magnétique ne permettrait pas d'obtenir une séparation sélective. Ainsi, le Tableau 3.9 montre qu'une particule caractérisée par une susceptibilité magnétique de 1 u.a. (unité arbitraire) et d'une taille de 10 u.a. pourrait être soumise à la même force magnétique qu'une particule avec une susceptibilité de 1000 u.a. et une taille de 1 u.a. La sélectivité du processus de séparation est déterminée par l'équilibre entre la force magnétique et les forces compétitrices agissant sur les particules.

**Tableau 3.9 - Granulométrie et force magnétique (Svoboda, 2004)**

<b>Granulométrie (u.a.)</b>	<b>Susceptibilité magnétique (u.a.)</b>	<b>Force magnétique (u.a.)</b>
10	1	1000
1	1000	1000

Afin de rendre la force magnétique dominante face aux forces compétitrices, notamment pour la séparation des particules fines ( $< 100 \mu\text{m}$ ), la croyance serait d'augmenter le champ magnétique dans le séparateur. Cependant, de nombreuses études ont montré que l'augmentation du champ magnétique, particulièrement dans la séparation magnétique à haut gradient (SMHG), a un effet néfaste sur la sélectivité de la séparation, réduisant son efficacité. En effet, l'augmentation du champ magnétique peut entraîner une augmentation de l'attraction magnétique pour toutes les particules d'une suspension diminuant ainsi la sélectivité du processus (Zheng et al., 2015). De plus, la plupart des minéraux traités par SMHG possèdent une susceptibilité magnétique dépendante du champ magnétique environnant telle que (Hollingworth et al., 1984; Svoboda, 1994):

$$\kappa = \kappa_{\infty} + \frac{M}{H} \quad 3.30$$

Où  $\kappa_{\infty}$  est la susceptibilité magnétique dans un champ magnétique infini,  $M$  est la magnétisation spontanée et  $H$  est le champ magnétique appliqué. L'augmentation du champ magnétique s'accompagne d'une diminution de la susceptibilité magnétique pouvant résulter d'une stagnation ou d'une diminution du taux de récupération dans la fraction magnétique.



### 3.4. ÉQUIPEMENTS DE SÉPARATION MAGNÉTIQUE

Dans le domaine de la séparation magnétique, il existe de nombreux équipements pouvant être classés selon le milieu de séparation (air ou liquide), l'intensité du champ magnétique, le générateur du champ magnétique, etc. On distingue trois grands groupes de séparateurs : basses intensités, haute intensité et séparateur à haut gradient et/ou haut champ. Le Tableau 3.10, extrait de *Séparation magnétique Théorie et modélisation* (Gillet, 2003b), montre les caractéristiques principales.

Tableau 3.10 - Équipements de séparation magnétique (Gillet, 2003b)

Type d'équipement	Générateur	$\mu_0 \text{grad}(H^2)$ (N.m <sup>-3</sup> )
Basse intensité	Aimant permanent	$2 \cdot 10^4$ à $2 \cdot 10^6$
Haute intensité	Aimant permanent ou électroaimant	$2 \cdot 10^7$ à $4 \cdot 10^9$
Haut gradient ou haut champ	Solénoïde	$6 \cdot 10^{10}$ à $6 \cdot 10^{12}$

#### 3.4.1. Séparation à basse intensité

En pratique, les séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI) sont utilisés pour la séparation de produits fortement magnétiques tels que la magnétite, le titanomagnétite, le titanomagnétite vanadique, ainsi que pour la récupération de débris de fer et d'impuretés ferromagnétiques (Chen et al., 2015). Les SMBI sont généralement constitués d'aimants permanents.

Ces matériaux sont caractérisés par une induction magnétique rémanente  $B_r$ , leur permettant de créer un champ magnétique sans dépense énergétique. Les aimants permanent sont constitués d'alliages de céramique de type  $Co_5RE$  (où le RE désigne un élément de terres rares) ou de fer-néodyme-bore (Fe-Nd-B) pouvant créer un champ magnétique d'intensité atteignant les 1,5 T (Gillet, 2003a).

### 3.4.1.1. Séparateurs à bande

Les séparateurs à bande sont des équipements utilisés généralement pour la protection et le déferrailage. Ils permettent la récupération d'éléments ferreux contenus dans les déchets; ils sont aussi utilisés pour enrichir des minerais ferrimagnétiques en gros morceaux. Ils peuvent être placés à la jetée d'un convoyeur, au-dessus (overband) ou même dans la poulie de tête d'un convoyeur à bande (poulie magnétique). Ces équipements fonctionnent en voie sèche. La Figure 3.14 et la Figure 3.15, extraites de Séparation magnétique à basse et haute intensité (Gillet, 2003a), illustrent ces équipements.

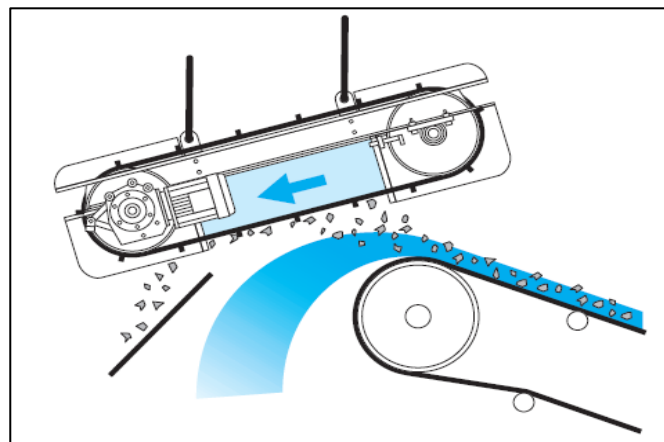


Figure 3.14 - Séparateur magnétique de type overband(Gillet, 2003a)

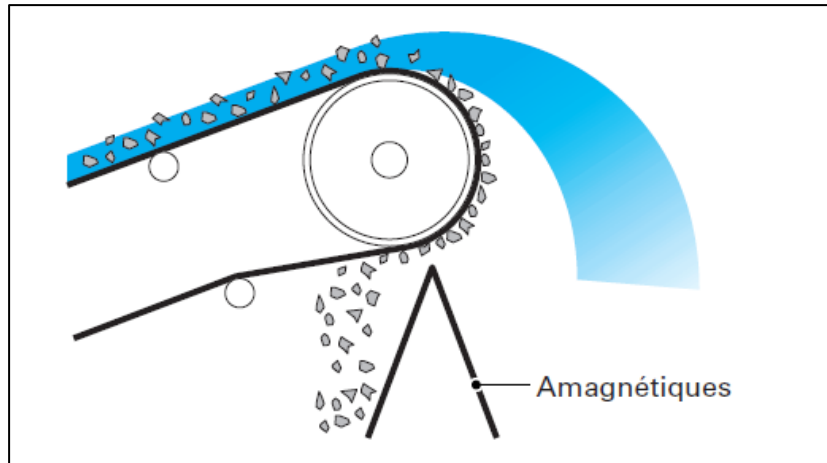


Figure 3.15 - Séparateur magnétique de type poulie magnétique (Gillet, 2003a)

### 3.4.1.2. Séparateurs magnétiques à tambour

Les séparateurs à tambour font partie des équipements les plus utilisés dans la séparation magnétique. Ils fonctionnent autant en voie sèche qu'en voie humide dépendamment de la granulométrie des particules. Les séparateurs à tambour sont disposés selon une structure axiale avec le système d'aimants situé à l'intérieur du tambour. En voie sèche, les particules sont alimentées sur le tambour au niveau de la couronne aimantée. Les particules magnétiques se collent sur le tambour par attraction magnétique et suivent la rotation de ce dernier. Puis, elles se détachent lorsqu'elles atteignent une zone non aimantée et sont récupérées. Les particules non-magnétique sont éjectées du tambour sous l'action de la vitesse de rotation de celui-ci. En voie humide, le tambour est partiellement immergé dans un réservoir, dans lequel la suspension est alimentée. La suspension est injectée au niveau de la surface inférieure du tambour.

Comme pour la voie sèche, les particules magnétiques sont attirées sur le tambour par le champ magnétique et suivent sa rotation jusqu'à une zone de décharge où elles sont rincées avec de l'eau afin de faciliter le décollement et la récupération. En voie humide, on distingue trois fonctionnements : séparation à courant parallèle, séparation à contre-rotation et séparation à contre-courant. La Figure 3.16, extraite de Séparation magnétique à basse et haute intensité (Gillet, 2003a), illustre les trois fonctionnements.

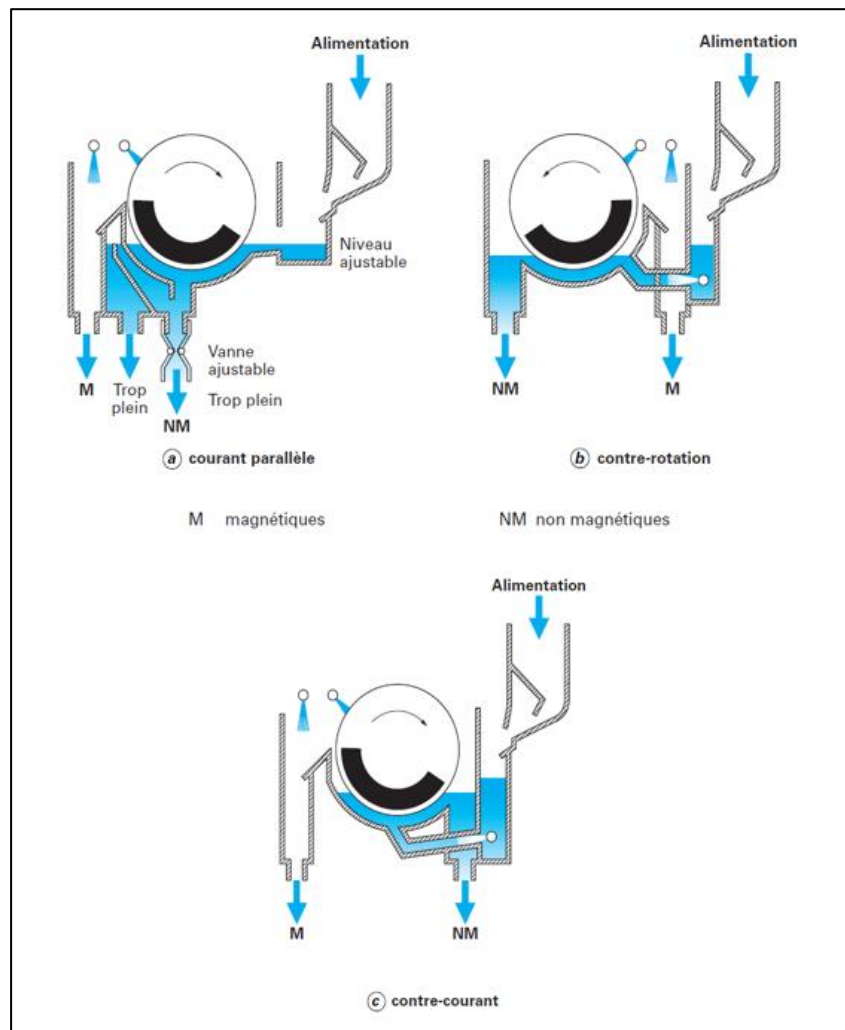


Figure 3.16 - Séparateurs magnétiques à tambour en voie humide (Gillet, 2003a)

### **3.4.2. Séparateurs magnétiques à haute intensité**

Les séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI) sont utilisés pour la séparation de particules plus fines et plus faiblement magnétiques. Tout comme les SMBI, les SMHI peuvent fonctionner en voie sèche et en voie humide. Cependant pour la séparation des particules très fines, c'est la voie humide qui est requise. Les générateurs du champ magnétique sont soit :

- Un électro-aimant ou circuit magnétique conventionnel, constitué d'une ou plusieurs bobines de cuivre autour d'un noyau d'acier doux, créant un champ magnétique d'environ 2 T.
- Un aimant permanent à forte énergie spécifique et faible démagnétisation.

#### ***3.4.2.1. Séparateurs magnétiques à bande et à tambour***

Dans la séparation à haute intensité, on retrouve des séparateurs à bande et à tambour, ils fonctionnent de la même manière que pour la séparation à basse intensité, mais le générateur de champ magnétique est différent. Au lieu de comporter de grands blocs magnétiques, il est composé de petits blocs aimantés dont la direction de magnétisation varie selon un angle. Pour les séparateurs à bande, la poulie est constituée de petites aimants permanent séparés par des éléments de fer permettant de canaliser les lignes de champ. Le gradient du champ est plus élevé et maintenu sur la surface de la bobine. De même, pour les séparateurs à tambour, une multitude de petits

aimants permanents (Fe-Nd-B) sont disposés à l'intérieur du tambour de façon à ce que les différentes orientations de magnétisation couvrent des angles utiles entre 90 et 120° de la circonférence totale, comme illustré ci-dessous à la Figure 3.17 (Wasmuth, 1995) L'intensité de champ magnétique peut atteindre 0,70 à 1,2 T à la surface du tambour, avec des forces tangentielles minimales et un champ d'action important à l'extérieur du tambour.

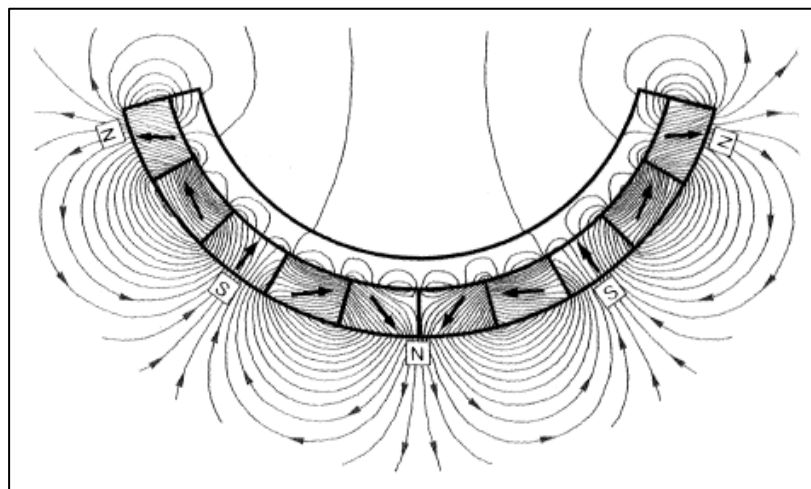
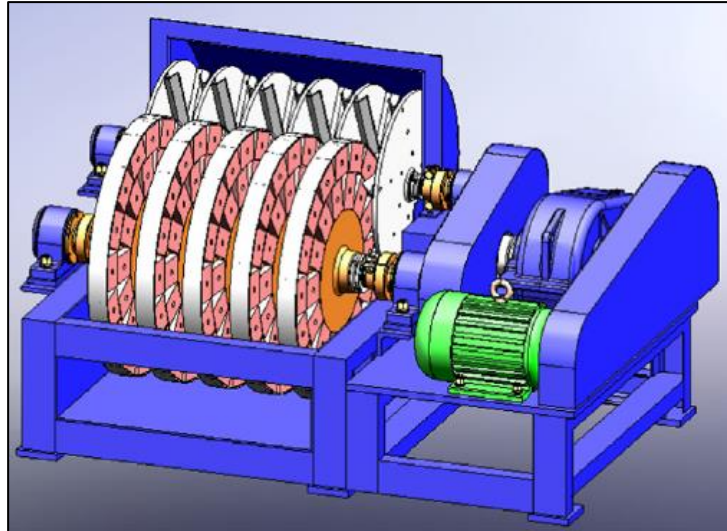


Figure 3.17 – Représentation des différentes orientations de magnétisation (Wasmuth, 1995)

### 3.4.2.2. Séparateurs magnétiques à disques

Cet équipement reprend le principe de fonctionnement du séparateur à tambour mais le tambour magnétique est remplacé par un système de disques magnétiques. Il fonctionne en voie humide, où il est partiellement immergé dans un réservoir. La Figure 3.18, extraite de *Progress in Filtration and Separation* (Chen et al., 2015), illustre un séparateur magnétique à disques.



**Figure 3.18 - Séparateur magnétique à disques (Chen et al., 2015)**

Les disques tournent verticalement dans le réservoir, la suspension est alimentée à la partie inférieure. Les particules magnétiques sont attirées à la surface des disques, suivent la rotation et sont récupérées par un système de racloirs situé à la partie supérieure des disques.

### **3.4.3. Séparation magnétique à haut gradient et/ou haut champ**

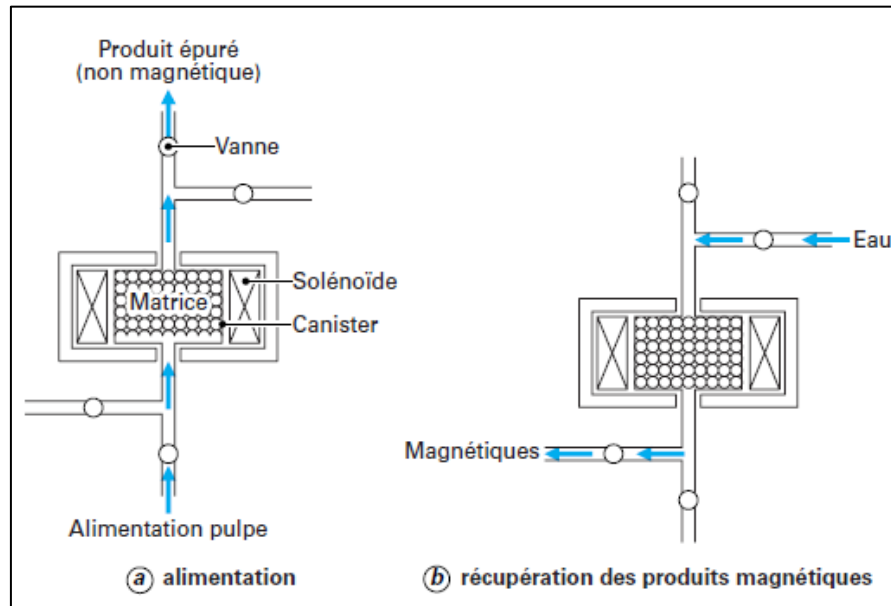
Les séparateurs à haute intensité sont capables de produire des champs magnétiques élevés. Cependant, la séparation magnétique ne peut se faire que s'il existe une discontinuité servant d'espace de séparation dans la culasse magnétique qui assure la fermeture des lignes de champ. Cette discontinuité diminue le champ magnétique dans le séparateur et influence l'efficacité de la séparation. Les séparateurs à haut gradient (SMHG) sont des séparateurs utilisant des solénoïdes (en cuivre ou supraconducteurs) permettant de faire la séparation à l'intérieur même

de la bobine d'induction. L'ajout d'une matrice en laine de fer ou en métal expansé permet de retenir les fines particules magnétiques. Les SMHG sont utilisés pour les très fines particules et en voie humide.

Le SMHG va produire au moyen d'élément ferromagnétique de fortes hétérogénéités dans un champ magnétique d'origine homogène. Des centres de forces magnétiques de faibles portées apparaissent et piègent les particules paramagnétiques. La bobine d'induction entoure une matrice et un système de tuyauterie dans lesquels la suspension va circuler.

La Figure 3.19, extraite de *Séparation magnétique haut gradient (SMHG) et haut champ* (Gillet, 2004), illustre le principe de fonctionnement d'un SMHG. Quand le champ magnétique est appliqué, la suspension passe au travers de la matrice ; les particules magnétiques sont attirées sur les fibres de la matrice, et les particules non magnétiques quittent le système. 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 stoppé afin d'expulser, par de l'eau sous pression, les particules magnétiques





**Figure 3.19 - Schéma de principe d'un séparateur à haut gradient (Gillet, 2004)**

Il existe deux types de séparateurs à haut gradient :

- Séparateur cyclique (solénoïde en cuivre ou supraconducteur) fonctionnant par lots suivant trois phases : alimentation, rinçage sous champ puis expulsion des produits magnétiques.
- Séparateur à fonctionnement continu, constitué d'un double bobinage (solénoïde dipôle en cuivre) entre lequel passe un carrousel. Le carrousel est muni de plusieurs compartiments renfermant la matrice. Lorsqu'un compartiment a atteint sa capacité maximale, le carrousel fait une légère rotation pour passer au compartiment suivant tandis que le premier compartiment est rincé. La Figure 3.20, extraite de Séparation magnétique haut gradient (SMHG) et haut champ (Gillet, 2004), montre le principe d'un SMHG à fonctionnement continu.

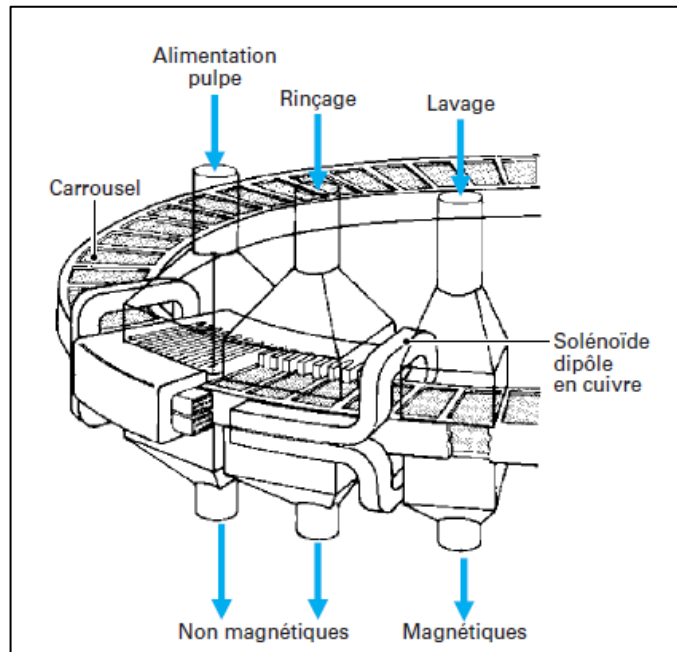


Figure 3.20 - Schéma de principe d'un séparateur à haut gradient continu (Gillet, 2004)