

CHAPITRE 3

PROCÉDÉ DE SÉPARATION MAGNÉTIQUE

3.1. HISTORIQUE

La séparation magnétique est une méthode permettant de séparer des éléments selon leur comportement face à un champ magnétique. C'est une technique relativement ancienne qui a été développée au XIX^{ème} siècle et qui n'a cessé d'évoluer conjointement avec les innovations technologiques. Elle est basée sur le phénomène du magnétisme dont la connaissance remonte à la Grèce Ancienne. Socrate observait :

“Cette pierre qu'Euripide appelle aimant n'attire pas simplement les anneaux de fer, elle confère aux anneaux une force leur permettant de faire la même chose que la pierre elle-même.” (Gillet, 2003b; Livingston, 1997).

Ainsi, la croyance commune stipulait que la force exercée sans contact était délivrée par un effluve magnétique circulant entre la pierre et le fer. La signification pratique du magnétisme, et de la séparation magnétique en particulier, n'a été reconnue qu'au milieu du XIX^{ème} siècle. Ball, Norton, Edison et d'autres ont démontré la possibilité de séparer grossièrement les minerais de fer fortement magnétiques de la gangue “non-magnétique” (Svoboda et al., 2003). Les progrès considérables récents dans la compréhension des principes fondamentaux du magnétisme et du développement de matériaux magnétiques permanents ont permis d'appliquer la séparation magnétique à des matériaux allant du grossier au

colloïdal et du fortement magnétique au diamagnétique. En effet, au début du XX^{ème} siècle, la séparation magnétique a connu un développement industriel rapide avec des séparateurs fonctionnant par voie sèche. Puis pendant les années 1960-1970, la séparation dite à haute intensité (du champ magnétique) a connu les premières applications industrielles de fort tonnage. On procède à la séparation par voie humide permettant de traiter des particules plus fines qu'en voie sèche (Gillet, 2003b).

3.2. PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DE LA MATIÈRE

3.2.1. Champ magnétique et magnétisation

Lorsque l'on décrit un champ magnétique, deux entités distinctes sont employées : l'intensité de champ magnétique H et la densité de flux magnétique (ou induction magnétique) B . H et B sont deux grandeurs vectorielles pourvues d'une direction et d'une norme, s'exprimant respectivement dans le système international SI en Ampère par mètre (A/m) et en Tesla (T). Dans le vide, ces deux grandeurs ne sont pas indépendantes et sont reliées par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad 3.1$$

Où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide et est égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$ Henry par mètre (H/m). La perméabilité magnétique de l'air est 0,000037% supérieure à celle du vide (Cullity et al., 2008).

A l'intérieur d'une matière aimantée de magnétisation M , cette relation n'est plus valable. La densité de flux magnétique totale devient alors :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad 3.2$$

La magnétisation M , de même dimension que H , est définie par le rapport du moment magnétique total μ_M des dipôles et du volume V , tel que :

$$M = \frac{\mu_M}{V} \quad 3.3$$

Dans la convention Kennelly, traditionnellement privilégiée par les ingénieurs électriques, la densité de flux magnétique B est donnée par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \vec{J} \quad 3.4$$

Où J est la polarisation magnétique qui est reliée à M par la relation :

$$\vec{J} = \mu_0\vec{M} \quad 3.5$$

La polarisation magnétique J s'exprime en Tesla (1 T = 10000 Gauss). La densité de flux magnétique inclut la contribution de l'aimantation M , qui est définie comme le moment dipolaire magnétique d'un corps par unité de volume ou polarisation J définie par l'équation 3.5.

3.2.2. Susceptibilité et perméabilité magnétique

En général, la magnétisation d'un matériau dépend du champ magnétique agissant sur lui. Pour beaucoup de matériaux, l'aimantation M est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique H (quand H n'est pas trop élevée), ainsi leur relation est telle que :

$$\vec{M} = \kappa \vec{H} \quad 3.6$$

Où κ , appelé *susceptibilité magnétique volumique*, est une propriété physique du matériau représentant sa faculté à s'aimanter sous l'action d'une excitation magnétique (Coey, 2010). M et H ont alors la même direction et κ est une variable sans dimension. La susceptibilité magnétique peut être reliée à la perméabilité relative μ_r du matériau, telle que :

$$\mu_r = 1 + \kappa \quad 3.7$$

La perméabilité relative μ_r est définie à partir de la perméabilité magnétique μ . La perméabilité magnétique est une grandeur caractérisant la capacité d'un matériau à modifier la densité de flux magnétique B , c'est-à-dire à modifier les lignes de flux magnétique. La perméabilité magnétique et la perméabilité relative sont reliées par la relation suivante :

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad 3.8$$

Où μ s'exprime en Henry par mètre (H/m) et μ_r est sans dimension.

En combinant, les équations 3.2, 3.6, 3.7 et 3.8, la densité de flux magnétique B devient:

$$\vec{B} = \mu_0(1+\kappa)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \quad 3.9$$

L'équation 3.9 est valide lorsque le matériau est isotrope et linéaire, M et H ont la même direction. Cependant, la relation n'est pas complètement validée dans le cas de matériau ferromagnétiques.

La susceptibilité ou la perméabilité peuvent être utilisées pour caractériser un matériau. La susceptibilité magnétique volumique prend des valeurs proches de 0, positives et négatives, jusqu'à des valeurs supérieures à 1 pour différents matériaux. Pour les matériaux aux faibles susceptibilités, il est beaucoup plus pratique d'utiliser κ que μ ; par exemple, pour $\kappa = 10^{-6}$, il y a $\mu_r = 1,000001$ et pour $\kappa = -10^{-6}$, il y a $\mu_r = 0,999999$. La susceptibilité magnétique peut également s'exprimer par rapport à la densité du matériau ρ :

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho} \quad 3.10$$

Où X est la susceptibilité magnétique massique, ou spécifique, du matériau et s'exprime en m^3/kg . La masse d'un matériau étant généralement mieux connue que son volume, la susceptibilité massique est plus communément employée.

De la même manière, la magnétisation massique σ est plus employée que la magnétisation M , elle s'exprime en A.m²/kg et se définit telle que :

$$\sigma = \frac{M}{\rho} \quad 3.11$$

3.2.3. Classification des matériaux

Tous les matériaux existants présentent des propriétés magnétiques dépendamment de leurs compositions ou de leur état. Selon leurs propriétés magnétiques, les matériaux peuvent être classés selon cinq grands groupes : diamagnétique, paramagnétique, ferromagnétique, antiferromagnétique et ferrimagnétique. Les trois derniers groupes ont généralement de très hautes susceptibilités magnétiques et sont fréquemment appelés "ferromagnétiques" au sens large du terme. La classification des matériaux est attribuable à l'alignement des moments magnétique des atomes lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique indépendamment de l'agitation thermique. La Figure 3.10, extraite du livre *Magnetic techniques for the treatment of materials* (Svoboda, 2004), montre l'alignement des moments magnétiques pour chaque type de matériau.

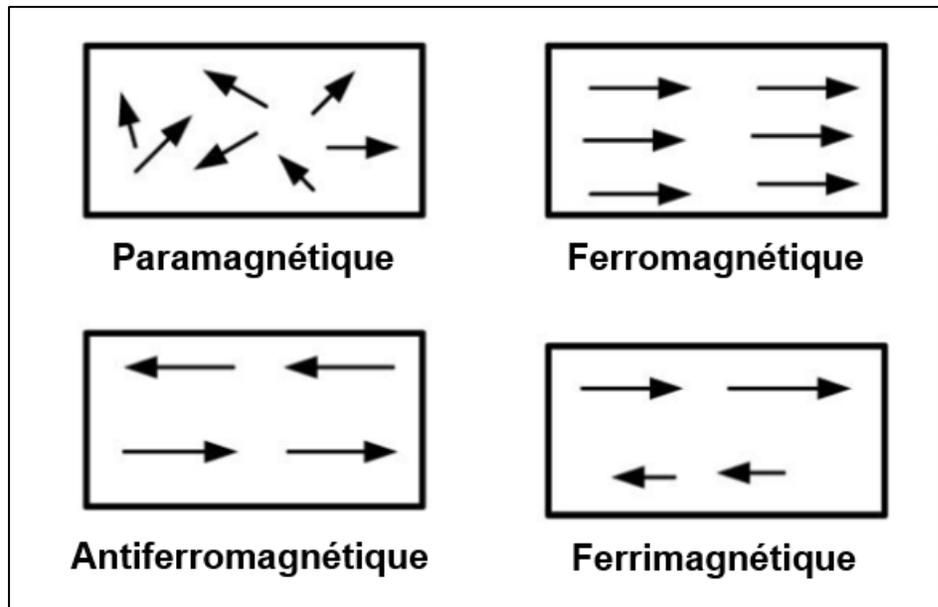


Figure 3.10 - Schématisation de l'alignement des moments magnétiques (Svoboda, 2004)

3.2.3.1. Diamagnétisme

Le phénomène de diamagnétisme se caractérise par la modification du mouvement orbital des électrons autour du noyau atomique par l'application d'un champ magnétique externe. Le courant induit par ce champ magnétique donne lieu à un moment magnétique supplémentaire, autrement dit une faible aimantation est créée. Cependant, cette aimantation crée un champ magnétique opposé au champ magnétique externe. Ainsi à l'approche d'un champ magnétique, un matériau diamagnétique est repoussé.

Pour les matériaux diamagnétiques, la susceptibilité magnétique est totalement indépendante de la température et prend des valeurs faibles et négatives, de l'ordre de -10^{-9} (SI). Beaucoup de matériaux inorganiques et quasiment toutes les molécules organiques sont diamagnétiques.

Dans beaucoup de matériaux, le diamagnétisme est caché par les effets de paramagnétisme et de ferromagnétisme. Ainsi, des métaux de faible susceptibilités négatives sont souvent submergés par les contributions paramagnétique et ferromagnétique. Les Tableau 3.3 et Tableau 3.4, extraits du livre *Magnetic techniques for the treatment of materials* par Svoboda (2004) montrent respectivement les susceptibilités magnétiques massiques de métaux et de composés non-métalliques diamagnétiques et les susceptibilités magnétiques massiques de quelques minéraux diamagnétiques.

Tableau 3.3 - Susceptibilité magnétique de matériaux diamagnétiques (Svoboda, 2004)

Matériaux	X (m ³ /kg) * 10 ⁻⁹
Cuivre	-1,1
Plomb	-1,38
Diamant	-5,6
Eau	-9,0
Alcool Éthylique	-9,3

Tableau 3.4 - Susceptibilité magnétique massique de minéraux diamagnétiques (Svoboda, 2004)

Minéraux	Formules Chimiques	Susceptibilités magnétiques massiques (m ³ /kg) * 10 ⁻⁹
Quartz	SiO ₂	-6,0
Calcite	CaCO ₃	-4,8
Fluorite	CaF ₂	-7,9
Magnésite	MgCO ₃	-6,4
Kaolinite	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	-20

3.2.3.2. Paramagnétisme

Les matériaux paramagnétiques ne possèdent pas d'aimantation spontanée et les moments magnétiques des atomes pointent dans des directions aléatoires. Sous l'effet d'un champ magnétique externe, les atomes acquièrent une faible aimantation qui va s'orienter dans le même sens que le champ magnétique appliqué. L'aimantation disparaît une fois le champ magnétique externe coupé.

Pour les matériaux paramagnétiques, les valeurs des susceptibilités magnétiques sont faibles et positives, de l'ordre de 10^{-6} m³/kg. La susceptibilité magnétique dépend de la température du milieu suivant la relation de Curie telle que :

$$\kappa = \frac{C}{T} \quad 3.12$$

Où T est la température absolue et C est la constante de Curie telle que :

$$C = \frac{c\mu_0 n\mu_M^2}{k} \quad 3.13$$

Où c est une constante, n est le nombre de dipôles magnétiques, μ_M est le moment magnétique, et k est la constante de Boltzmann. Ainsi, la susceptibilité magnétique est inversement proportionnelle à la température et restent positives et faibles de l'ordre de 10^{-6} m³/kg.

Les Tableau 3.5 et Tableau 3.6, extraits du livre *Magnetic techniques for the treatment of materials* (Svoboda, 2004), montrent respectivement les susceptibilités magnétiques massiques de quelques matériaux et minéraux paramagnétiques.

Tableau 3.5 - Susceptibilité magnétique massique de matériaux paramagnétiques (Svoboda, 2004)

Matériaux	Susceptibilité magnétique massique (m³/kg) * 10⁻⁹
Aluminium	7,67
Titane	42,2
Platine	12,3
Zirconium	16,7
Magnésium	6,9
Sodium	8,8

Tableau 3.6 - Susceptibilité magnétique massique de minéraux paramagnétiques (Svoboda, 2004)

Minéraux	Formule Chimique	Susceptibilité magnétique massique (m³/kg) * 10⁻⁹
Hématite	Fe₂O₃	250-3800
Goethite	FeOOH	250-400
Rutile	TiO₂	10-50
Pyrite	FeS₂	3-200
Dolomite	CaMg(CO₃)	5-20

3.2.3.3. Ferromagnétisme

Le phénomène de ferromagnétisme est le phénomène à l'origine des champs magnétiques les plus importants et est responsable du phénomène bien connu du magnétisme. Dans les matériaux ferromagnétiques, les interactions entre atomes voisins sont tellement fortes que les moments magnétiques de tous les atomes sont alignés parallèlement les uns aux autres malgré l'agitation thermique. Sous l'effet d'un champ magnétique, les moments magnétiques interagissent, s'alignent et produisent une aimantation dans le même sens; un matériau ferromagnétique est attiré par un champ magnétique.

Les matériaux ferromagnétiques possèdent une aimantation naturelle existante sans l'application d'un champ magnétique, elle est appelée aimantation spontanée. Cette propriété est due à l'alignement des moments magnétiques des atomes et permet l'existence des aimants permanents. Contrairement aux matériaux diamagnétiques et paramagnétiques, la magnétisation des matériaux ferromagnétiques ne dépend pas seulement de l'intensité du champ magnétique mais aussi de la forme et de l'historique magnétique de l'échantillon. En effet, un matériau ferromagnétique peut rester magnétique après la suppression du champ externe. Ce phénomène est caractérisé par la courbe d'hystérésis présentée à la Figure 3.11.

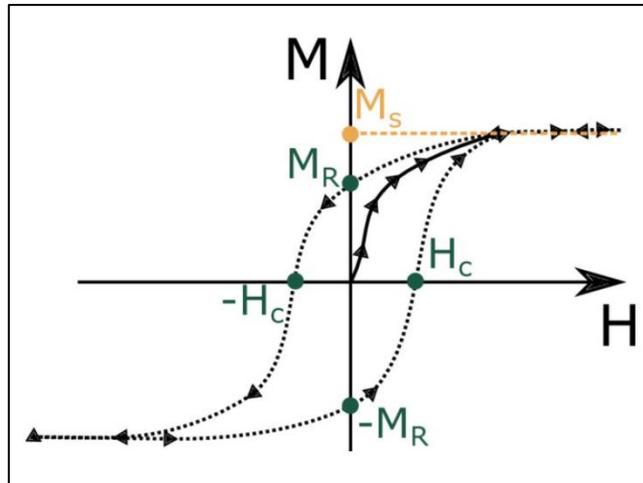


Figure 3.11 - Courbe d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique (Schott, 2017)

Lorsqu'on augmente l'intensité du champ magnétique sur un matériau désaimanté ($H = M = 0$), M augmente en suivant la courbe d'aimantation. M subit une rapide augmentation jusqu'à atteindre une asymptote appelée saturation magnétique (M_s). Lorsque le champ est réduit, l'aimantation M suit une courbe différente. Quand le champ est nul, l'aimantation est décalée de l'origine d'une valeur M_r appelée rémanence. Puis l'aimantation diminue progressivement et passe par zéro au moment du champ coercitif. Ensuite, l'aimantation s'inverse puis arrive à un minimum obtenu pour des valeurs de champ négatives.

Le ferromagnétisme est présent dans 9 éléments : trois métaux de transition que sont le fer, le cobalt et le nickel; et 6 métaux de terres rares que sont le gadolinium, le terbium, le dysprosium, l'holmium, l'erbium et le thulium. Les alliages composés d'un des métaux de transition deviennent ferromagnétiques.

La susceptibilité magnétique d'un matériau ferromagnétique est dépendante de la température, diminuant d'un maximum à la température $T = 0$ K, jusqu'à un point critique à la température de Curie T_c . Au-delà de T_c , un matériau ferromagnétique se comporte comme un matériau paramagnétique. La susceptibilité magnétique ne suit pas la relation de Curie (voir équation 3.12) mais la relation de Curie-Weiss telle que:

$$\kappa = \frac{C}{T - T_c} \quad 3.14$$

La Figure 3.12, extraite du livre *Magnetic techniques for the treatment of materials* (Svoboda, 2004), représente le comportement des matériaux magnétiques selon la température du milieu. Les susceptibilités magnétiques des matériaux ferromagnétiques sont positives et supérieures à 1. Le Tableau 3.7 extrait de Gillet (2003b) montrent les susceptibilités magnétiques maximales de quelques matériaux ferromagnétiques.

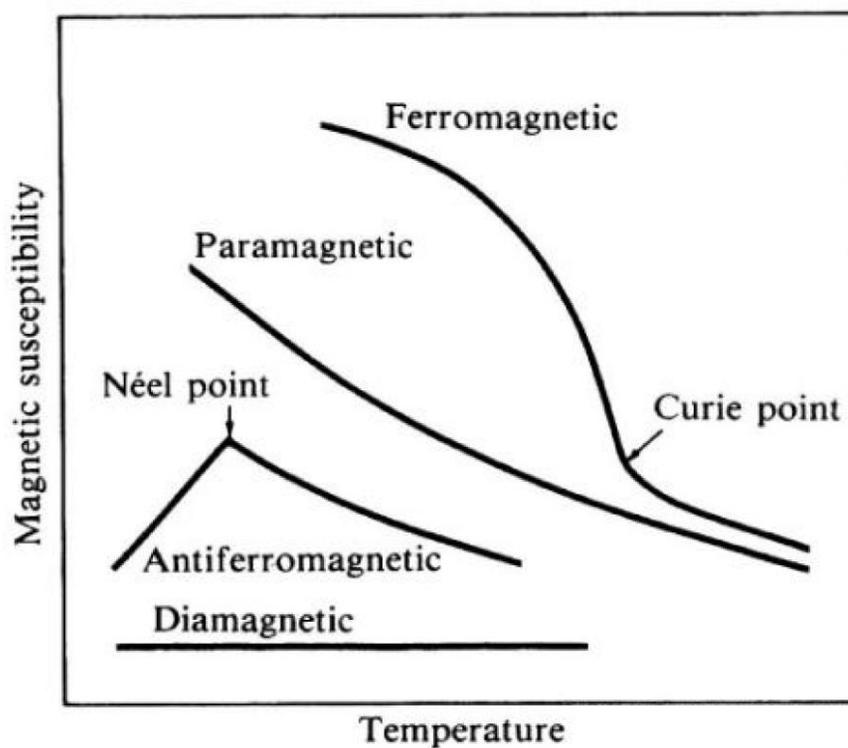


Figure 3.12 - Comportement des différents matériaux magnétiques selon la température (Svoboda, 2004)

Tableau 3.7 - Susceptibilité magnétique maximale de quelques corps ferromagnétiques (Gillet, 2003)

Substance ferromagnétique	Formule	Susceptibilité magnétique maximale χ_m
Acier doux	Fe	5330
Acier extra-doux	Fe	15 000
Acier dur	Fe avec 1% C	100
Fer (suivant origine)	Fe	$2,5 \cdot 10^3$ à $1,43 \cdot 10^6$
Cobalt	Co	42
Nickel	Ni	70 à 1200

3.2.3.4. Antiferromagnétisme

Dans les matériaux antiferromagnétiques, les interactions d'échange entre atomes voisins conduisent à un alignement antiparallèle des moments magnétiques, illustré à la Figure 3.10. Ainsi, l'aimantation totale d'un matériau antiferromagnétique est nulle. La susceptibilité magnétique dépend aussi de la température du milieu, cependant elle n'augmente pas lorsque la température diminue. À très haute température, la susceptibilité magnétique suit la relation suivante :

$$\kappa = \frac{C}{T + T_N} \quad 3.15$$

Où, T_N est appelée la température de Néel, température au-delà de laquelle un matériau antiferromagnétique se comporte comme un paramagnétique, comme le montre la Figure 3.12. Ainsi, lorsqu'un champ magnétique est appliqué à un matériau antiferromagnétique, il présente un comportement spécial dépendant de la température. Aux très basses températures, le solide ne présente aucune réponse au champ extérieur, car l'ordre antiparallèle des aimants atomiques est maintenu de manière rigide. À des températures plus élevées, certains moments magnétiques se libèrent de l'arrangement ordonné et s'alignent avec le champ externe. Cet alignement et le faible magnétisme qu'il produit dans le solide atteignent leur pic à la température de Néel. Au-dessus de cette température, l'agitation thermique empêche progressivement l'alignement des atomes avec le champ magnétique, de sorte que le faible magnétisme produit dans le solide par l'alignement de ses atomes diminue continuellement à mesure que la température augmente, on retrouve un comportement paramagnétique. A l'origine, les matériaux antiferromagnétiques

étaient classifiés comme matériaux paramagnétiques anormaux car possédant une faible susceptibilité magnétique.

Dans le tableau périodique, le chrome est le seul élément possédant des propriétés paramagnétiques à température ambiante avec une susceptibilité magnétique massique de $54 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$. En général, les matériaux antiferromagnétiques sont des céramiques composées de métaux de transition et de l'oxygène ou du soufre.

3.2.3.5. Ferrimagnétisme

Dans les matériaux ferrimagnétiques, la structure cristalline présente des sous-réseaux de moments magnétiques ordonnés dans une orientation antiparallèle. La somme des moments magnétiques pointant dans une direction est supérieure à celle des moments pointant dans la direction opposée, la situation est illustrée à la Figure 3.10. En l'absence d'un champ magnétique, un matériau ferrimagnétique se comporte comme un antiferromagnétique où les moments magnétiques sont alignés antiparallèlement. Les matériaux ferrimagnétiques ont des propriétés magnétiques similaires aux matériaux ferromagnétiques. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué, les moments magnétiques s'alignent dans la direction du champ magnétique.

À une température inférieure à la température de Curie, un matériau ferrimagnétique se comporte comme un ferromagnétique, au-delà de la température de Curie, il adopte un comportement similaire à un paramagnétique.

Le ferrimagnétisme apparaît en majorité dans les ferrites, qui sont des céramiques à base d'oxydes de fer mélangés avec d'autres éléments, et dans deux oxydes de fer que sont la magnétite Fe_3O_4 et la maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Le Tableau 3.8, extrait de *Séparation magnétique Théorie et modélisation* (Gillet, 2003b), montre les susceptibilités magnétiques maximales de quelques corps ferrimagnétiques.

Tableau 3.8 - Susceptibilité magnétique maximale de quelques corps ferrimagnétiques (Gillet, 2003)

Nom	Formule	Susceptibilité maximale κ_M
Magnétite	Fe_3O_4	1 à 6
Maghémite	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,6 à 1,8
Pyrrhotite	Fe_8S_9	0,09 à 0,4