

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de la Terre

Département des Mines

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Magister en mines

Option : Valorisation et gestion des ressources minérales

Thème :

**Etude des Propriétés Magnétiques du Minerai de fer de
Sidi Maârouf-Jijel en vue d'un Enrichissement Par
Séparation Magnétique.**

Présenté Par:

BADJOUDJ Salem

Soutenu le 10 Janvier 2011 devant le Jury composé de :

Président: BOUKELLOUL M. L. M. C. A Université Badji Mokhtar – Annaba

Rapporteur : IDRES A. M. C. A Université Badji Mokhtar – Annaba

Examineurs: BOUNOUALA M. Prof. Université Badji Mokhtar - Annaba

CHETTIBI M. M. C. A Université Badji Mokhtar - Annaba

BOUHEDJA A. M. C. A Université Badji Mokhtar - Annaba

Année universitaire 2010 / 2011

RESUME

L'objectif principal de ce travail est le choix d'un procédé de traitement pour la valorisation des minerais de fer pauvres de Sidi Maârouf. Ce minerai n'a pas fait l'objet d'études minéralurgiques. Ce gisement de fer oolithique présente des caractères morphologiques et sédimentologiques qui permettent de penser que la minéralisation s'est mise en place dans des édifices deltaïques pyrogravant.

Les caractères des oolithes montrent que les corps minéralisés résultent de l'accumulation d'oolithes, développés essentiellement par concrétionnement intra-sédimentaire et ayant subi, avant le dépôt définitif, des phases alternantes d'oolithisation et de remise en suspension. Sur l'ensemble du gisement, les teneurs moyennes sont les suivantes :

$$\text{Fe}_{\text{total}} = 44,18\%, \text{SiO}_2 = 13,66\%, \text{CaO} = 5,35\%.$$

La mine de Sidi Maârouf possède des réserves exploitables de l'ordre de 55 millions de tonnes; tous ces paramètres font que ce minerai est destiné aux différentes cimenteries de l'Est Algérien, sous la tutelle de SPA SOMIFER Tébessa utilisé comme d'adjuvant pour la fabrication du ciment (clinker). L'objectif de ce travail est l'étude des propriétés magnétiques en vue d'un enrichissement par séparation magnétique.

Dans ce travail une étude a été menée sur les propriétés magnétique des minéraux composant les minerais de fer de Sidi Maârouf, ceci afin d'optimiser les paramètres principaux influents sur la séparation magnétiques.

Enfin des résultats satisfaisants ont été enregistrés lors de la séparation magnétique du point de vue teneur en fer.

تلخيص:

ان الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إيجاد طريقه مثلى لمعالجة الحديد الخام لسيدى معروف وذلك من اجل رفع نسبته. خصائص هذا الاليتيكي تبين الاجسام المعدنية الناتجة عن التجمع الاليتيكي المتطور واقعيا بداخل الرسوبيات المتأثرة مقارنة بالشوائب الموجودة حوله .علما ان هذا المعدن لم يخضع لأي دراسة معدنية من قبل هذا المنجم للحديد الاليتيكي له خصائص مورفولوجية و رسوبية التى تسمح لنا بالتفكير مليا فى تمعدنه.

بماقبل الترسيب النهائى باطوار متقطعة على مجمل المنجم النسب المتوسطة هى كالتالى :

$$FE_{TOTAL} = 44, 18\%, SiO_2 = 13, 66\%, CAO = 5, 35\%$$

ان منجم سيدى معروف له احتياط متوسطى مقدر ب 55 مليون طن ومن اجل خصائص هذا المعدن فهو موجه لمصانع الاسمنت بشرق البلاد مثل سوميفار تبسة لاستخدامه كمضاف للاسمنت فى مصنع الما الابيض. هذه الدراسة تهدف الى معرفة الخصائص المغناطيسية للحديد و ذلك عن طريق اثرائه بالعزل المغناطيسى ومنه كانت نتائج المعالجة مرضية.

ABSTRACT:

The main objective of this work is the choice of a treatment process for the recovery of iron ore poor Sidi Maârouf. This ore has not been studied mineralurgical. This oolitic iron deposit has morphological and sedimentological evidence suggests that the mineralization was emplaced in buildings deltaic branding.

The characters of oolites show that the ore bodies result from the accumulation of oolites, concretions developed mainly by intra-sedimentary and having suffered before submitting final phases of alternating oolithisation and resuspension. Across the pool, the average grades are as follows: Fe total = 44, 18%, SiO₂ = 13, 66%, CaO = 5, 35%.

Mine Sidi Maârouf has recoverable reserves of around 55 million tonnes; all these parameters are that the ore is intended to cement the various eastern Algeria, under the tutelage of SPA SOMIFER Tebessa used as adjuvant the manufacture of cement (clinker). The objective of this work is the study of magnetic properties to magnetic separation enrichment.

In this work a study was conducted on the magnetic properties of minerals composing the iron ore Sidi Maarouf, to optimize the key parameters influencing the magnetic separation.

Finally, satisfactory results were recorded during the summers of magnetic separation in terms of iron content.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes chers parents qui m'ont notablement encouragé à poursuivre mes études, à ma petite famille telque : ma femme et mes enfants.

Je le dédie aussi à tous les étudiants de post-graduation et les enseignants du département Mines - Université d'Annaba ;

en particulier:

Dr. IDRES A. M. C	Université Badji Mokhtar - Annaba
Dr. BOUNOUALA M. prof	Université Badji Mokhtar - Annaba
Dr. BOUKELLOUL M. L. M. C	Université Badji Mokhtar - Annaba
Dr. CHETTIBI M. M. C	Université Badji Mokhtar - Annaba
Dr. BOUHEDJA A. M. C	Université Badji Mokhtar - Annaba
Mr. ARABI B. Doctorant	Université Badji Mokhtar - Annaba

Aux enseignants et cadres du Centre Universitaires de Souk Ahras :

Dr. SID MADANI., M.C.A.	CU Souk Ahras
Dr. RAHALI N., M.C.A.	CU Souk Ahras
Dr. DJEBAR YACINE M.C.A.	CU Souk Ahras
Dr. BOUACHA N. département G.Civil	CU Souk Ahras
Mr. BEROUK B. Department MIAS.	CU Souk Ahras
Mr. ROUAINIA SAMIR. Cadre MIAS.	CU Souk Ahras

Sans oublier mes amis:

MEZAACHE ZIDANE	OUACEL K
BOUABDALAH SOFIANE	MEHRI Y
BENABDESLAM M	BOUDAR A/GHANI
HAMLAOUI AMEUR	SOUAIA A/F
OUFELLA N	JEBNOUN BRAHIM
KOHIL A/HAMID	HAJJI K
MESSIPSA IDRES ET AL	BOUDCHICHA LAMINE

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord témoigner toute ma reconnaissance à Monsieur, Docteur: IDRES A., directeur du mémoire qui a apporté son soutien, son aide et ses conseils pour ce modeste travail.

Je remercie Messieurs le professeur: BOUNOUALA M., Docteur: BOUHEDJA A, Docteur: CHETTIBI M, Docteur: BOUKELLOUL M. L. et Mr Doctorant: ARABI B. pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée tout au long de la recherche.

Mes remerciements vont tout naturellement à ces derniers, qui ont été disponibles lorsque j'avais besoin de conseils, et dont les corrections de ce mémoire ont contribué à l'étoffer.

Je tiens à remercier l'ensemble des doctorants de l'institut des mines précisément Mezaache Zidane, Bouabdallah Sofiane; Lamia , Leila et Thoraya qui m'ont soutenu tout au long de cette recherche scientifique.

En particulier, merci à Mrs; Dr. SID M; Dr. DJEBAR Y et Mme; Dr. BOUACHA N. pour leur disponibilité, leur soutien qui m'ont offert ; leur bonne humeur, et dont je garderai un très bon souvenir. Je souhaite enfin remercier tous mes enseignants du Département des Mines.

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
<i>1</i>	<i>Production mondiale de minerai de fer</i>	<i>6</i>
<i>2</i>	<i>Production de minerai de fer: Année 2007.....</i>	<i>8</i>
<i>I.1.2.a</i>	<i>Caractéristiques des différents types des minerais de fer</i>	<i>12</i>
<i>I.1.2.b</i>	<i>Caractéristiques des différents types des minerais de fer.....</i>	<i>13</i>
<i>I.2.2.a</i>	<i>Classification des tailles des gisements</i>	<i>18</i>
<i>I.2.2.b</i>	<i>Valeurs des paramètres de la mine de Sidi Maârouf</i>	<i>18</i>
<i>I.4.2.1.a</i>	<i>Constitution minéralogique et chimique des affleurements</i>	<i>30</i>
<i>I.4.2.1.b</i>	<i>Accumulations du minerai en profondeur.....</i>	<i>31</i>
<i>II.2.6</i>	<i>Propriétés magnétiques des minéraux ferromagnétiques.....</i>	<i>37</i>
<i>II.6.2</i>	<i>Caractéristiques des séparateurs pour l'hématite.....</i>	<i>49</i>
<i>III.3</i>	<i>Caractéristiques techniques des principaux types de fer.....</i>	<i>52</i>
<i>III.5</i>	<i>flottation sélective du quartz.....</i>	<i>57</i>
<i>IV.2.4</i>	<i>Les résultats de tamisage</i>	<i>65</i>
<i>IV.3.1</i>	<i>Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf - 2 + 1mm.....</i>	<i>68</i>
<i>IV.3.2</i>	<i>Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de Maarouf - 1 + 0,5mm.....</i>	<i>69</i>
<i>IV.3.3</i>	<i>Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf - 0,5 + 0,25mm.....</i>	<i>70</i>
<i>IV.3.4</i>	<i>Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf -1+ 0,25mm.....</i>	<i>71</i>
<i>IV.3.5</i>	<i>Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf chauffé -1 + 0,25mm</i>	<i>72</i>

Listes des Figures

Figures	Titre	Page
<i>1</i>	<i>Production de minerai de fer pour l'année 2007</i>	<i>9</i>
<i>2</i>	<i>Production de minerai de fer : période 2000/2007.....</i>	<i>9</i>
<i>I.1.a</i>	<i>Vue générale de la mine de Sidi Maârouf.....</i>	<i>17</i>
<i>I.1.b</i>	<i>Vue générale de l'excavation de recherche de la mine de Sidi Maârouf.....</i>	<i>17</i>
<i>II.2</i>	<i>Boucle d'hystérésis</i>	<i>35</i>
<i>II.4.3.3</i>	<i>Schéma de principe de séparation magnétique</i>	<i>41</i>
<i>II.5</i>	<i>Modèle de capture-fibre ferromagnétique</i>	<i>43</i>
<i>II.6.1.2.2</i>	<i>Denture du rotor ou tambour</i>	<i>45</i>
<i>II.6.2.3</i>	<i>Séparateur à haute intensité en voie sèche</i>	<i>46</i>
<i>II.6.2.4</i>	<i>Séparateur à haute intensité en voie sèche à rotor induit</i>	<i>47</i>
<i>III.4.a</i>	<i>Schéma de traitement des minerais du fer (hématite brune) Russie.....</i>	<i>53</i>
<i>III.4.a</i>	<i>Schéma de traitement des minerais de fer oxydés: Russie.....</i>	<i>54</i>
<i>III.4.b</i>	<i>Schéma de traitement des minerais hématitiques : France</i>	<i>55</i>
<i>III.4.c</i>	<i>Schéma de traitement des minerais de magnétite Russie.....</i>	<i>56</i>
<i>IV.1</i>	<i>Échantillon représentatif du minerai de fer</i>	<i>59</i>
<i>IV.2.1</i>	<i>Concasseur à mâchoire étapes de préparation du minerai de fer</i>	<i>59</i>
<i>IV.2</i>	<i>Etapes de préparation du minerai de fer.....</i>	<i>60</i>
<i>IV.2.a</i>	<i>Mécanisme d'écrasement</i>	<i>61</i>
<i>IV.2.2</i>	<i>Broyeur à boulets.....</i>	<i>62</i>
<i>IV.2.3</i>	<i>Procédé de quartage.....</i>	<i>63</i>
<i>IV.2.4.a</i>	<i>Procédure simplifiée de tamisage à sec.....</i>	<i>64</i>
<i>IV.2.4.b</i>	<i>Tamiseuse de laboratoire type Retsch AS200 Basic.....</i>	<i>64</i>
<i>IV.2.4</i>	<i>Courbe granulométrique.....</i>	<i>65</i>
<i>IV.2.5</i>	<i>Lavage des échantillons.....</i>	<i>66</i>
<i>IV.3.a</i>	<i>Vue générale du séparateur magnétique à haute intensité.....</i>	<i>67</i>
<i>IV.3.b</i>	<i>Vue de dessus du séparateur magnétique à haute intensité.....</i>	<i>67</i>
<i>IV.3.C</i>	<i>Observation microscopique après séparation magnétique des Tranches granulométriques - 2 + 1 mm.....</i>	<i>68</i>
<i>IV.3.d</i>	<i>Observation microscopique après séparation magnétique des Tranches granulométriques - 1 + 0,5 mm.....</i>	<i>69</i>
<i>IV.3.e</i>	<i>Observation microscopique après séparation magnétique des Tranches granulométriques - 0,5 + 0,25mm.....</i>	<i>70</i>
<i>IV.3.f</i>	<i>Observation microscopique après séparation magnétique des Tranches granulométriques - 1+ 0,25 mm.....</i>	<i>71</i>
<i>IV.3.g</i>	<i>Observation microscopique après séparation magnétique des Tranches granulométriques - 1+ 0,25 mm.....</i>	<i>72</i>

Table des matières	Pages
<i>Résumé</i>	
<i>Problématique</i>	
<i>Introduction Générale.....</i>	1
<i>Production mondiale des minerais de fer.....</i>	2
<i>Perspectives.....</i>	5
<i>Chapitre I - Caractéristiques du gisement de Sidi Maârouf.....</i>	10
<i>I.1 – Introduction.....</i>	10
<i>I.1.2 - Minerai de fer</i>	10
<i>I.1.3-Géochimie.....</i>	10
<i>I.1.4 – Minéralogie.....</i>	11
<i>I.1.5 - Différents minerais de fer.....</i>	11
<i>I.1.6 – Hématite.....</i>	14
<i>I.2 - Etude du gisement de fer de sidi Maârouf.....</i>	16
<i>I.2.1 - Situation géographique de Jijel</i>	16
<i>I.2.2 - Historique du gisement.....</i>	16
<i>I.3 - Géologie de la région.....</i>	19
<i>I.4 - Géologie du gisement.....</i>	21
<i>I.4.1 - Stratigraphie.....</i>	21
<i>I.4.1.a. Roches granitoïdes.....</i>	22
<i>I.4.1.b. Migmatites.....</i>	23
<i>I.4.1.c. Processus tardifs.....</i>	23
<i>I.4.2 - Pétrographie.....</i>	29
<i>I.4.2.1 Minéralisation.....</i>	29
<i>I.4.2.2 Affleurement.....</i>	29
<i>I.4.3 - Structures de localisation des amas de minerai.....</i>	31
<i>I.5. – Conclusion.....</i>	32
<i>Chapitre II - Analyse des propriétés magnétiques du minerai.....</i>	33
<i>II.1- Propriétés magnétiques.....</i>	33
<i>II.1.1 - Grandeurs et unités magnétiques.....</i>	33
<i>II.1.2 - Comportement des matériaux dans un champ H.....</i>	33
<i>II.1.2.1 – diamagnétisme.....</i>	33

II.1.2.2 – paramagnétisme	34
II.1.2.3 – ferromagnétisme.....	34
II.2 - Boucle d'hystérésis et propriétés magnétiques	34
II.2.1 - Rémanence	36
II.2.2 - Magnétisme résiduel	36
II.2.3 - Force coercitive résiduel	36
II.2.4 – Perméabilité résiduel	36
II.2.5 – Réticence résiduel	36
II.2.6 - Propriétés magnétiques de quelques composés ferromagnétiques.	37
II.3. - Classification des substances minérales en fonction de leur susceptibilité	37
II.3.1 - Minéraux fortement magnétiques.	37
II.3.2 - Minéraux faiblement magnétiques	38
II.3.3 - minéraux médiocrement magnétiques	38
II.3.4 - Minéraux non magnétiques	38
II.4 - Action des forces magnétiques et mécaniques	38
II.4.1 - Introduction	38
II.4.2 - force magnétique	39
II.4.3 - forces antagonistes.....	39
II.4.3.1 - force de gravité	40
II.4.3.2 - force centrifuge.....	40
II.4.3.3 - force d'entraînement par le fluide.....	40
II.5 - Comportement dynamique d'une particule dans un séparateur magnétique..	41
II.6 - Séparation magnétique	43
II.6.1. - Matrice d'extraction	43
II.6.2 - Classification des séparateurs.....	43
II.6.2.1 – Introduction	43
II.6.2.2 - Séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI).....	44
II.6.2.3 - Séparateur de type Boxmag Rapide.....	45
II.6.2.4 - Séparateurs travaillant par déviation.....	47
II.7. – Conclusion	50
Chapitre III – Traitement des minerais de fer	51
III.1 - Enrichissement des minerais hématite brune	51
III.2 - Enrichissement des minerais de fer des quartzites oxydés	51
III.3 - Enrichissement du minerai de magnétite	52
III.4. - Différents types de schémas traitement de minerai de fer	52

III.5. - Flottation d'un minerais oxydé de fer.....	57
III.6. – Conclusion	58
Chapitre IV– Essais de traitement du minerais de fer de Sidi Maârouf.....	59
IV.1 - Prélèvement d'échantillon.....	59
IV.2 - Préparation mécanique	59
IV.2.1 - concassage	59
IV.2.2 – broyage.....	62
IV.2.3 – quartage.....	62
IV.2.4 - Classement dimensionnel	63
IV.2.5 - Lavage et séchage des échantillons.	66
IV.3. Séparation magnétique à haute intensité	67
IV.4. résultats et discussion	73
Conclusion générale	74
Références Bibliographiques Citées	75
Références Bibliographiques Consultées.....	77

PROBLEMATIQUE :

Pour l'industrie extractive, les techniques de traitement constituent un des principaux processus miniers. Surtout pour les gisements dont le minerai est à faible teneur en composant utile.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité, en vue d'exploiter un gisement prospecté et dont les réserves exploitables sont clairement établies, le cout de traitement doit être judicieusement évalué. Dans un projet minier, le cout total d'une tonne de minerai extraite et traitée est un paramètre économique selon lequel l'exploitabilité d'un gisement peut être effective ou annulée.

Dans le cas de la mine de sidi maa rouf, objet de cette étude, les réserves exploitables sont évaluées à 55 millions de tonnes. Les caractéristiques du minerai de fer de la mine suscitée sont conformes pour une utilisation métallurgique. Néanmoins, le minerai de fer en question n'a pas fait l'objet d'études minéralurgiques détaillées. D'autre part, il y a lieu de noter que la teneur moyenne du minerai de fer du gisement de Sidi Maarouf est estimée à 44,18 % en fer.

L'objectif de cette présente étude consiste à analyser les propriétés magnétiques du minerai de fer de la mine susmentionnée et de sa gangue qui est composée essentiellement de SiO_2 et CaO . Et ce, pour procéder à leur enrichissement par séparation magnétique. En outre, les facteurs liés à la minéralogie de la roche et à l'environnement de la région contribuent à mieux cerner la problématique de traitement. La technique de traitement par séparation magnétique permet de valoriser un minerai ferreux en vue d'obtenir une concentration acceptable en minerai.

L'étude qu'on s'est proposée de réaliser va apporter des éléments de réponse aussi bien sur le plan technologique qu'industriel.

i INTRODUCTION GENERALE

Le marché du minerai de fer est durement touché par la récession mondiale, qui devrait se prolonger en 2009 et au début de 2010. L'industrie de l'automobile et de la construction non domiciliaire représentent environ 70 % de l'utilisation d'acier, et la conjoncture dans ce secteur ne devrait pas s'améliorer avant 2010-2011. L'acier est produit à partir du minerai de fer que l'on extrait de la terre. En général, le minerai le plus riche en fer est le plus rentable. Il est considéré comme riche, lorsque sa teneur est supérieure à 54 %, et ne nécessite aucune valorisation à part son calibrage. À une teneur inférieure à 54 %, il est considéré comme pauvre et doit être valorisé pour en permettre la commercialisation. Il existe deux calibres de minerai de fer à forte teneur. Le premier est le minerai d'une granulométrie supérieure à 8 mm, appelé « minerai en morceaux », et le second, celui d'une granulométrie inférieure à 8 mm, appelé « minerai fin ».

Le minerai de fer se compose de roches et de minéraux qui peuvent être extraits de manière rentable. Le minerai extrait est habituellement riche en oxydes et en carbonates de fer et de couleur gris foncé, jaune éclatant, pourpre foncé ou rouille. Le fer lui-même se trouve généralement sous la forme de magnétite (Fe_3O_4), d'hématite (Fe_2O_3), de goethite, de limonite ou de sidérite ; l'hématite est aussi appelée « minerai naturel ». Le minerai de fer est la matière première de la fonte de première fusion, qui est elle-même la matière première principale de l'acier.

Ce sont la quantité de minerai de fer disponible et sa qualité qui influent sur la demande. Puisque le minerai de fer est davantage commercialisé sous la forme d'un minéral plutôt que d'un métal, il présente de nombreuses variantes chimiques et physiques qui servent à fournir le fer nécessaire à l'élaboration de l'acier (98 %) ou, à des fins non métallurgiques, à procurer l'oxyde de fer entrant dans la fabrication de pigments, d'appareils électroniques, de milieux denses, d'abrasifs et de matériaux de construction (2 %).

ii PRODUCTION MONDIALE DES MINERAI DE FER

Les mouvements de consolidation et de restructuration observés dans l'industrie mondiale du minerai de fer au cours des deux dernières années devraient se poursuivre dans les années à venir, ce qui permettra aux producteurs de réaliser des économies d'échelle et de devenir ainsi plus concurrentiels. Cela aidera l'industrie sidérurgique à conserver la part du marché qu'elle occupe à titre de fournisseur de matériaux de premier choix peu coûteux, polyvalents et très performants.

La demande de minerai de fer se présente sous deux aspects : la quantité et la qualité. Le principal produit commercial issu du minerai de fer se présente sous forme minérale plutôt que métallique, si bien que ce minerai comporte de nombreuses variantes chimiques et physiques qui n'ont toutefois qu'une utilité, soit de constituer le composant ferreux de l'acier. La production de l'acier, quant à elle, stimule presque toute la demande de minerai de fer nous pouvons citer les principaux producteurs de minerai de fer dans le monde à savoir :

• République Populaire de Chine

La Chine, qui possède d'énormes réserves de minerai de fer à faible teneur, est le plus grand producteur de minerai de fer à l'échelle mondiale, avant qu'un facteur de conversion ne soit appliqué pour que la teneur en fer du minerai extrait en Chine soit mis au même niveau que celui des autres pays producteurs. Cependant, la décision du gouvernement de la Chine de ne plus subventionner l'exploitation minière a entraîné une hausse des coûts de production et un manque d'investissements requis pour exploiter les mines de manière rentable. Ceci a amené la fermeture des mines non rentables et réduit la production de minerai de fer de la Chine, laquelle est en constante diminution depuis l'an 2000.

En 2004, les importations de minerai de fer de la Chine provenaient surtout de l'Australie (38,4 %), du Brésil (26,7 %), de l'Inde (20,2 %) et de l'Afrique du Sud (9,2 %). Toutefois, l'Inde et le Brésil ont accaparé, en 2002, une partie du marché occupé auparavant par l'Australie. Ceci s'explique par la capacité de production limitée de l'Australie, par le fléchissement, au cours des dernières années, de la demande de minerai de fer du Brésil sur le marché européen et par la réduction des coûts de transport entre le Brésil et l'Asie, ce qui a rendu le minerai de fer à plus forte teneur du Brésil plus abordable pour les utilisateurs qui souhaitent le mélanger à leurs minerais à plus faible teneur /51,39/ .

• Brésil

En 2005, la Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) a travaillé à la restructuration de ses actifs, car elle a acquis, au cours des dernières années, Ferteco Mineração SA, SA Mineração da Trindade (SAMITRI) et 50 % des intérêts de CAEMI. On estime que, depuis ces acquisitions, la CVRD contrôle directement ou indirectement 95 % de l'industrie brésilienne du minerai de fer. À la fin de l'année, la CVRD n'avait toujours pas fusionné Ferteco et CAEMI, ce qui lui permettrait de profiter de la synergie de l'exploitation concertée de Ferteco et de Minerações Brasileiras Reunidas (MBR) – société dont CAEMI détient 85 % des intérêts /25,26/.

• Australie

La production de l'Australie – le plus grand exportateur de minerai de fer au monde s'est chiffrée à 187,2 Mt en 2005, soit une hausse de 3,4 % par rapport à 2001. Le minerai de fer de ce pays est principalement produit par Rio Tinto (47,3 %), BHP Billiton Plc (40,0 %), Mitsui & Co;Ltd. (6,0 %) et Portman Limited. (2,3 %). Le minerai de Rio Tinto provient de sa filiale exclusive Hamersley Iron Pty., Ltd. et de la Robe River Mining Co. Pty Ltd., dont Rio Tinto détient 53 % des intérêts. La production d'Hamersley a diminué de 2,5 % en 2004, et ce, malgré une forte demande en Chine et une demande importante au Japon et en Corée du Sud pour le minerai fin de la mine Yandi. Cependant, cette société a pu accroître ses ventes d'environ 4,8 % (celles-ci atteignant 68,5 Mt), en profitant des intérêts qu'elle détient dans la mine Channar (60 %) et en mettant sur le marché les réserves accumulées de ses exploitations, qui sont notamment les mines Mt. Tom Price, Paraburdoo, Marandoo, Brockman et Yandicodgina. Grâce à la mise en exploitation du gisement West Angelas en juin 2004, la production de Robe River a augmenté de 16,8 % pour atteindre 35,9 Mt et ses expéditions ont fait un bond de 13,8 % pour se situer à 35,4 Mt /27,28/.

• Inde

L'industrie du minerai de fer de l'Inde est en constante croissance depuis les dix dernières années. Elle est en compétition directe avec les producteurs australiens pour s'accaparer d'une plus grande part du marché que représente la Chine.

Présentement, environ 52 % de la production de minerai de fer de l'Inde est contrôlée par des sociétés d'État comme la National Mineral Development Corporation, la Kudremukh Iron Ore Co. Ltd., la Steel Authority of India Limited (SAIL) et l'Orissa Mining Corp., tandis que la Minerals & Metals Trading Corporation of India (MMTC) Ltd., qui est chargée du commerce d'État, administre toutes les exportations de minerai d'une teneur en fer d'au moins 64 % /29,30/.

• Russie

La production de la Russie s'est accrue de 1,4 % en 2005, pour être portée à 84,2 Mt de minerai de fer, dont 29,8 Mt de boulettes ; cette légère augmentation découle du redressement de l'industrie russe entraîné par la dévaluation du rouble en 1998 et de l'avantage commercial dont le pays a ainsi bénéficié. Le minerai de fer de la Russie est produit par quelques grandes sociétés, comme Lebedensky GOK (18,4 Mt), Mikhailovsky GOK (15,1 Mt), Stoilensky GOK (12,6 Mt) et Kachkanarsky GOK (7,8 Mt), ainsi que par de nombreuses mines d'une capacité inférieure à 2 Mt. La Russie exporte également des quantités considérables de minerai de fer vers l'Allemagne, la Turquie, la Finlande et la Norvège /31,32/.

• Ukraine

Pour répondre à une demande nationale croissante, l'Ukraine – le deuxième producteur de minerai de fer parmi les pays de l'ex-U.R.S.S. – a accru sa production de 7,7 % jusqu'à 58,9 Mt en 2004. L'industrie ukrainienne du minerai de fer consiste en une douzaine de producteurs, dont les plus importants sont : Inguletsky GOK (12,4 Mt), Yuzhny GOK (7,6 Mt), Severny GOK (7,1 Mt), Novokrivorozhsky GOK (6,7 Mt) et Poltavsky GOK (6,7 Mt). La production de Poltavsky et de Severny – sociétés en voie d'être privatisées – se compose principalement de boulettes de minerai de fer /33,34/.

• États-Unis

En 2004, l'industrie du minerai de fer des États-Unis a dû réorganiser ses actifs en raison, notamment, de l'acquisition par Cleveland-Cliffs Inc. des intérêts (45 %) d'Algoma Steel Inc. dans la mine Tilden, ce qui a fait passer à 85 % les intérêts de Cleveland-Cliffs dans cette exploitation. En 2004, la production de boulettes de minerai de fer provenant des mines gérées par Cleveland-Cliffs (Empire, Tilden, Hibbing, Northshore et Wabush) s'est élevée à 13,3 Mt, et ce, malgré la longue interruption des activités de la mine Empire amorcée au début de l'année. La société s'attend à ce que sa production totale atteigne 29,6 Mt en 2005, ce qui constituerait une hausse de près de 17 %. En mai 2004, la mine de minerai de fer Minntac a terminé un projet de six ans de l'ordre de 75 M\$ qui visait à moderniser son concentrateur et à en améliorer l'efficacité. Cette exploitation, dont la capacité de production s'élève à 16 Mt de boulettes, est la plus grande productrice de minerai de fer aux États-Unis /35,36/.

• République de l'Afrique du sud

Une tendance vers la consolidation s'est peut-être également enclenchée dans l'industrie sud-africaine du minerai de fer, où Anglo American plc (Anglo) a fait l'acquisition, en mars 2004, de 20,1 % des intérêts de Kumba Resources Limited (Kumba) et de 34,9 % des intérêts d'Anglovaal Mining Limited (Avmin). Anglo se lance donc dans l'industrie du minerai de fer grâce aux mines Sishen et Tabazimbi (capacité de 25 Mt), qui appartiennent à Kumba, et aux mines Beeoshhoek (capacité de 6 Mt) d'Assmang Limited, dont Avmin détient 53 % des intérêts. En 2004, la production de l'Afrique du Sud s'est chiffrée à 36,5 Mt, dont environ 21 Mt ont été exportées en Chine (49 %), en Europe (28,5 %) et au Japon (22,5 %) /37/.

• Suède

En 2004, Luossavaara Kiirunavaara AB – le cinquième exportateur de minerai de fer au monde – a produit 20,3 Mt de minerai de fer, y compris 14,0 Mt de boulettes, ce qui représente une augmentation de 4,1 % par rapport à la production de l'année précédente. En profitant de la force du marché en Chine, la société suédoise a pu accroître de 4,4 % ses exportations, qui se sont ainsi chiffrées à 14,2 Mt, dont 0,3 Mt expédiées en Chine. Elle s'attend à pousser ses ventes en Chine afin que celles-ci atteignent 1 Mt en 2005 et une quantité variant entre 1,0 et 1,5 Mt, à moyen terme. La société rapporte avoir réalisé un important programme d'investissement visant à faire passer sa capacité de bouletage à 16,3 Mt et à prolonger la durée de vie de ses deux mines souterraines en effectuant, entre autres, l'ajout d'un autre niveau principal dans la mine Malmberget ainsi que la mise en valeur du corps minéralisé Kiruna, qui repose sous le lac Luossajavari /38/.

• PERSPECTIVES

Les tendances à la consolidation et à la restructuration observées dans l'industrie mondiale du minerai de fer au cours des deux dernières années devraient se maintenir dans un avenir rapproché. Cela permettra aux producteurs de devenir davantage concurrentiels en réalisant des économies d'échelle et aidera l'industrie sidérurgique à conserver la part du marché qu'elle occupe en tant que fournisseur de matériaux de premier choix peu coûteux, polyvalents et très performants.

Tout changement économique en Asie devrait avoir beaucoup d'incidence sur les marchés de l'acier et, par conséquent, sur l'utilisation du minerai de fer. La Chine, dont la croissance économique est l'une des plus fortes au monde, devrait continuer de chercher des fournisseurs étrangers pour répondre à une grande partie de ses besoins en minerai de fer. Les importations de minerai de fer de la Chine sont passées de 14,3 Mt en 1990 à plus de 111,5 Mt en 2005, ce qui représente un taux de

croissance annuel de plus de 18 %. L'ouverture d'une économie de marché plus moderne en Chine et la demande de produits de meilleure qualité devraient pousser ce pays à maintenir ou à accroître ses importations. En se basant sur cette tendance et la demande accrue des producteurs d'acier nord américains, on peut s'attendre à ce que 514 Mt de minerai de fer soient expédiées par voie maritime en 2006 et que la production mondiale de minerai de fer se chiffre à 1013 Mt, soit une hausse d'environ 1 % /51/.

Tableau 1 : Production mondiale de minerai de fer /51/

PRODUCTION MINIÈRE MONDIALE DE MINERAI DE FER, POIDS BRUT (1), PAR PAYS, EN 2006 et 2007				
Pays	2006	2007 (e)	Variation	Rang mondial
	(tonnes)		(%)	
Chine	420 000	588 000	40,00	1
Brésil	281 430	318 000	12,99	2
Australie	261 855	275 042	5,04	3
Inde	140 000	160 000	14,29	4
Russie	96 764	102 000	5,41	5
Ukraine	68 570	74 000	7,92	6
États-Unis	54 300	52 700	-2,95	7
Afrique du Sud	39 542	41 326	4,51	8
Canada	30 387	33 542	10,38	9
Suède	23 300	23 300	—	10
Venezuela	20 000	23 000	15,00	11
Iran	19 000	20 000	5,26	12
Kazakhstan	16 470	18 600	12,93	13
Mauritanie	10 752	11 155	3,75	14
Bosnie-Herzégovine	3 300	3 300	—	19
Égypte	2 600	2 500	-3,85	20
Algérie	1 536	2 339	—	21
Zimbabwe	377	200	-46,95	34
Tunisie	206	200	-2,91	35
Maroc	10	10	—	42
Guatemala	11	7	-36,36	43
Royaume-Uni	1	1	—	44
Total	1 528 167	1 786 862	16,93	

— : néant ; (e) : estimation.

- Selon la disponibilité des sources, le poids brut représente dans ce tableau la somme sans duplication d'expéditions directes de minerais de fer et de concentrés de minerais de fer commercialisables. Les agglomérats de fer produits à partir de minerais de fer importés ont été exclus des calculs en supposant que le minerai ayant servi à produire ces matières a été intégré au calcul des minerais commercialisables dans le pays où il a été extrait /51/.

- **Le minerai de fer :**

La production de minerai de fer pour l'année 2007 a été réalisée à partir de Six (6) mines de fer, dont (5) sont localisées à l'Est et (1) au Centre.

La production totale de minerai de fer pour l'année 2007 s'élève à 1 982 101 tonnes en baisse de - 15.3% par rapport à l'année 2006.

Au cours de l'année 2007 la société Arcelor-Mittal, qui exploite les deux principaux gisements de fer d'Ouenza et Boukhadra dans la wilaya de Tébessa a produit 1 687 000 tonnes de fer en diminution de -12.27% par rapport à l'année 2006. Cette baisse de la production est due à des problèmes techniques rencontrés dans la préparation mécanique du minerai. Toute la production de fer d'Arcelor Mittal est destinée à alimenter le complexe sidérurgique d'El-Hadjjar (W. Annaba).

La filiale SPA SOMIFER du groupe FERPHOS a produit 295 101 tonnes en 2007 en diminution de - 29.23% par rapport à 2006 à travers ses mines de Khanguet (W. Tébessa), de Sidi Maarouf (W. Jijel), de Djebel Anini (W. Sétif), et de Rouina (W. Ain Defla) comme indiqué dans la tableau 2).

Tableau 2 Production de minerai de fer pour l'Année 2007.

N°	Opérateur	Gisement	Commune	Wilaya	Production 2006 (ml T)	Production 2007 (ml T)	Evolution (%)
1	Arcelor- Mittal	Ouenza	Ouenza	Tébessa	1 456	1 290	- 11,4
2		Boukhadra	Boukhara	Tébessa	467	397	- 14,99
S/Total					1 923	1 687	- 12,27
3	SPA SOMIFER	Khanguet	Bekkaria	Tébessa	120	61.005	-49,16
4		Chaabet El Ballout	Ouled Driss	Souk Ahras	24.549	0	- 100
5		Sidi Maarouf	Chekfa	Jijel	44,457	11,202	- 74,80
6		Djebel Anini	Djebel Anini	Sétif	149,236	143,126	-4.09
7		Rouina	Rouina	Ain Defla	78,51	79,768	+ 1.6
S/Tot					4117	295,101	- 29.23
Total					2 340	1 982,101	- 15.3

La mine de fer de Chaabet El Balout située dans la wilaya de Souk Ahras, n'a pas produit de minerai de fer au cours de cet exercice. L'essentiel de la production du minerai de fer est destiné pour la fabrication du ciment.

MT

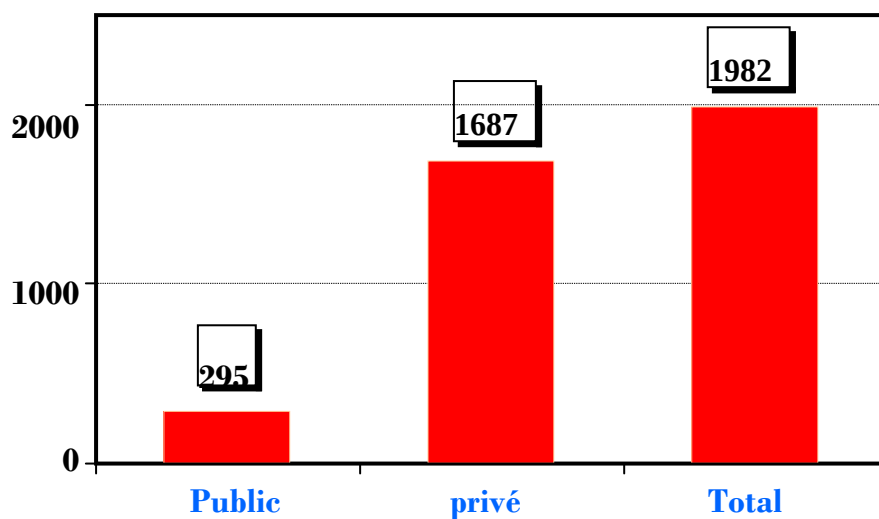


Figure 1 production de minerai de fer pour l'année 2007.

La production de minerai de fer du privé représente plus de 85% de la Production totale de l'année 2007 et celle du public 15%.

ml T

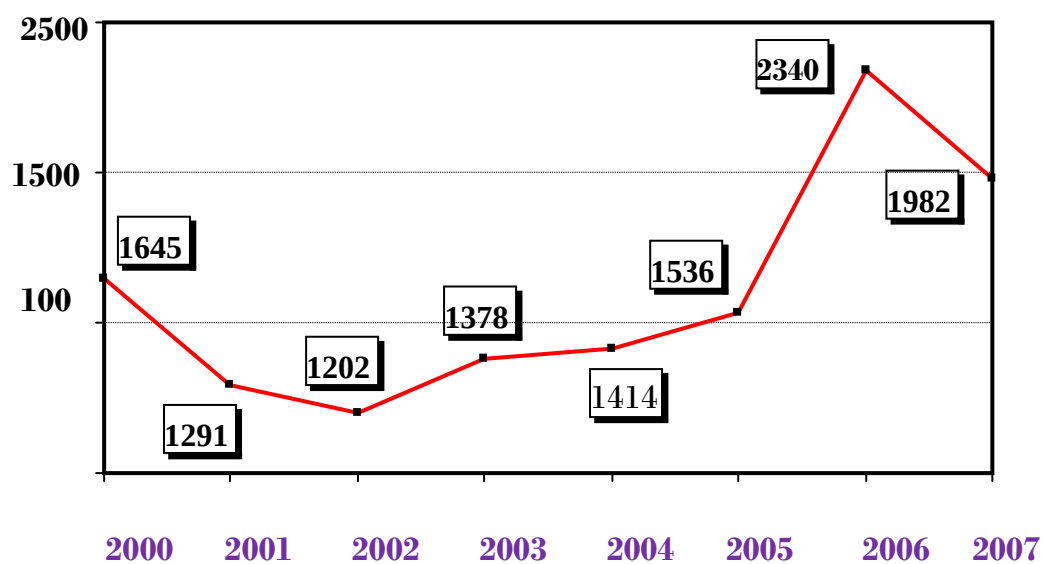


Figure : 2 Production de minerai de fer (période 2000-2007).

CHAPITRE I

CARACTERISTIQUES DU GISEMENT DE SIDI MAAROUF

I.1 - INTRODUCTION

Le fer appartient à une série d'éléments dont les numéros atomiques vont de 22 à 28 et qui comprend, en outre, le titane, le vanadium, le chrome, le manganèse, le cobalt et le nickel. Cette série d'éléments a été dénommée "ferrides".

Les modifications subies par le matériau ferrugineux, dans la biosphère, les caractéristiques des produits obtenus, sont essentiellement dues aux propriétés particulières du métal et de ses ions, et, tout spécialement la facilité avec laquelle il change de valence et forme des complexes avec un nombre élevé de produits organiques et minéraux.

I.1.2 - Minerais de Fer

Le fer est le 4^e élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Proche de l'aluminium par ses propriétés, c'est le plus abondant des métaux. Le principal minéral de fer est l'hématite, dont il existe deux variétés : l'hématite rouge ou oligiste et l'hématite brune ou limonite. Les autres minerais importants sont la goethite, la magnétite, la sidérite. La pyrite, minéral de fer sous forme de sulfure, n'est pas traitée comme les autres minerais de fer, le fer étant difficile à séparer du soufre (*voir* sidérurgie). De petites quantités de fer sont présentes sous forme combinée dans les eaux naturelles, les plantes et le sang. Il a une dureté entre 4 et 5 sur l'échelle de Mohs /17, 18,19/.

I.1.3 Géochimie

Par ordre d'abondance dans l'écorce terrestre, le fer occupe la 4^{ème} place avec 5 à 6 %. En fait, ce pourcentage varie fortement selon la nature de la roche support : 29% dans les météorites, 9% dans les roches ultrabasiques et les basaltes, 3% dans les granodiorites, 1,4% dans les granites. Dans les roches sédimentaires, on relève : 4,7% dans les schistes, 1% dans les grès, 0,4% dans les carbonates. Des roches basiques aux roches acides, la diminution des teneurs en fer s'accompagne du passage de la valence 2 à la valence 3 (Robert Lettole, 1970) /14,15/.

I.1.4 Minéralogie

Compte tenu de son abondance dans la nature, le fer se présente en un très grand nombre de minéraux. Cependant, les minerais utilisés dans la sidérurgie sont plus limités, avec :

- Magnétite (Fe_3O_4), 72% de fer
- Oligiste (ou hématite, Fe_2O_3), 70% de fer
- Goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$), 63% de fer
- Sidérose (FeCO_3), 48%

A ces minéraux sont souvent associés, dans les gisements économiques, des silicates et des silico-aluminates qui ne seraient pas exploitables seuls et des composés hydroxydes comme la limonite. Actuellement, les gisements mis en exploitation appartiennent surtout au type hématitique, formés par lessivage de la silice des quartzites ferrières précambriens. Inversement, les gîtes à sidérose ou de **skarns** perdent de leur importance, étant donné leur faible teneur ou leur tonnage limités et erratique /16/.

I.1.5 Différents minerais de fer

Il existe à travers le monde un nombre important de roches contenant du minerai de fer. Elles sont en général réparties en plusieurs catégories : les minerais oxydés, carbonatés, silicatés, et sulfurés. /17, 18,19/.

Tableau I.1.2.a Caractéristiques des différents types des minerais de fer /17, 18,19/

Type	Teneurs	Couleur	Observations
OXYDES			
Magnétite Fe_3O_4	72,36% fer 27,64 % oxygène	Gris foncé à noir	C'est une roche très magnétique. Elle a pris de plus en plus d'importance avec le développement des techniques de concentration magnétique et l'utilisation accrue de produits de haute qualité.
Hématite Fe_2O_3	69,94% fer 30,06% oxygène	Gris acier à rouge vif	L'hématite est l'un des principaux minerais de fer. Cette roche possède une dureté qui peut aller de 5,5 à 6,5 selon la famille à laquelle elle appartient. C'est la forme de roche la plus répandue à la surface de la terre et c'est également celle qui est le plus souvent employée dans l'industrie.
Limonite (ou Hématite brune) $\text{Fe}(\text{OH})_n$ H_2O	62,85% fer 27,01% oxygène 10,14% eau	Jaune ou marron, parfois noir	Les limonites sont également une source importante de minerais à travers le monde. Elles sont à la fois oxyde et hydroxyde de fer. La goëthite qui est une sorte de limonite se rencontre souvent en association avec de l'hématite.
Ilménite FeTiO_3	36,80% fer 31,57% titane 31,63% oxygène	noir	On la rencontre parfois en association avec de petites quantités de magnétite. Elle est généralement exploitée pour le titane qu'elle contient. Le minerai de fer peut être alors extrait en tant que sous-produit au cours du traitement de la roche. Contrairement à l'hématite ou à la magnétite, cette roche n'est pas magnétique.

Tableau I.1.2.b Caractéristiques des différents types des minerais de fer /17, 18,19/

Type	Teneurs	Couleur	Observations
CARBONATES			
Sidérite FeCO_3	48,20% fer 37,99% CO_2 13,81% oxygène	Blanc à gris vert, elle peut virer au brun, en présence d'humidité	Les sidérites contiennent en général une proportion assez variable de calcium, magnésium ou manganèse.
SILICATES			
Chamosite, Stilpnomélane Greenalite, Garniérite.			La formulation chimique est difficile car nous sommes en présence d'un groupe très complexe d'aluminosilicates alcalins de magnésium, aluminium, manganèse, baryum et fer. Les minerais de ce type, bien que d'une importance assez limitée en tant que tels pour la production de minerai de fer, présentent un certain intérêt en tant que source de minerais oxydés.
SULFURES			
Pyrite FeS_2	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivré	Cette roche est souvent connue sous le nom d'or des fous du fait de sa grande ressemblance avec l'or. Elle est la roche contendante du minerai de fer la plus répandue. Comme l'ilménite, elle n'est souvent pas exploitée pour le fer qu'elle contient mais pour sa teneur en soufre. Le fer en est le sous-produit le plus communément extrait.
Marcassite FeS_2	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivré	Très proche de la pyrite, de même composition chimique mais de forme cristalline différente.

I.1.6 HEMATITE

Origine du nom : Du latin *hématites* qui signifie "sang" en allusion à la couleur de sa poussière. Le mot latin dérivant du grec *aima* - *aimatos* "sang, du sang".

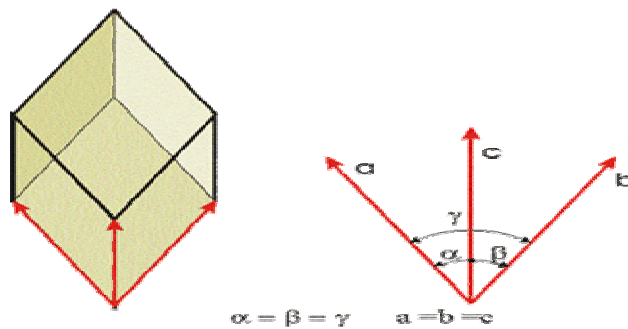
Classe chimique : IV Oxydes.

Groupe d'appartenance : Hématite

Sous-classe chimique : Oxydes avec rapport métal/oxygène = 2/3

Formule chimique : α Fe₂O₃

Système cristallin : Trigonale (Rhomboédrique)



Réseau de Bravais : Hexagonal rhomboédrique R

Dureté Mohs : de 5 à 6

Densité : 5,26 g/cm³

Clivages : non observé, plans de séparation 0001 et 10-11.

Cassures : Irrégulière, subconchoïdale ; minéral fragile, cassant. Flexible, élastique.

Dans la classification actuelle des minéraux, hématite est également le nom d'un groupe de quatre oxydes trigonaux : corindon, eskolaïte, hématite, et karélianite.

Propriétés optiques et autres : Opaque, translucide. Flexible, élastique. Sa légère solubilité dans l'acide chloridrique permet de la distinguer de l'ilménite. Elle est infusible au chalumeau et, en flamme réductrice, donne un globule Magnétique. Magnétique ou paramagnétique.

Couleur : gris acier, noir de fer, irisé, brunâtre, brun rouge, gris noir, bleuté, rouge.

Éclat du minéral : métallique, mat. Pouvoir réflecteur ~26%

Trace : rouge, rouge brunâtre, rouge brun.

Morphologie des cristaux : Tabulaire, rhomboédrique, pyramidal, prismatique, hexagonal, pseudocubique. Faces de {0001} avec stries formant des triangles.

Macles : possibles selon {10-11} et {0001}, souvent lamellaires.

Utilisation : L'hématite est plus important minerais de fer (fontes, aciers, alliages).

Variétés, désignations non reconnues par l'I.M.A. : Spécularite, en amas de feuillets fragiles ; Oligiste, désignait les cristaux bien développés (hématite était alors réservé aux faciès terreux ou microcristallins) ; Ocre rouge, hématite terreuse rouge

/17, 18,19/.

L'hématite est un minéral commun dans les roches effusives, dans les pegmatites et dans les filons hydrothermaux qui se sont constitués par la consolidation des magmas résiduels (ceux qui restent après les formations, par exemple, des granites et des pegmatites).

Elle est très lourde, privée de clivage et fragile. Elle est infusible et chauffée, devient magnétique. L'hématite est un oxyde de fer ; elle contient donc du fer et de l'oxygène dans un rapport de 2 à 3.

La genèse sédimentaire est très fréquente, par recristallisation partielle de la limonite ; comme cette dernière, l'hématite peut avoir un aspect oolithique ou concrétionné. Elle peut aussi, à la suite de métamorphisme, substituer la magnétite en prenant la forme externe, dans ce cas, elle prend le nom de martite. Les dépôts les plus importants du point de vue industriel sont d'origine sédimentaire, formés par diagénèse ou faible métamorphisme de roches de type granitique : les principaux sont ceux du lac Supérieur aux Etats Unis, du Québec, du Venezuela et de l'Angola.

Des dépôts de type oolithique existent au Canada, aux Etats-Unis, et en Ukraine. De beaux cristaux de fer oligiste sont présents en Italie à Rio Marina à l'île d'Elbe, au Brésil dans le Minas Gerais et en Angleterre dans le Cumberland. Les plus célèbres roses de fer proviennent du St Gothard et de la vallée de Binn en Suisse ; alors que les plus grandes, qui peuvent atteindre 15 cm de diamètre, sont originaires du Minas Gerais au Brésil.

L'Hématite est le minerais de fer le plus répandu et, pour cette raison, le plus important industriellement. L'ocre rouge, à son tour, est employée comme pigment ; elle est aussi utilisée pour le polissage /13, 20, 21, 22, 23, 24/.

I.2 ETUDE DU GISEMENT DE FER DE SIDI- MAAROUF

I.2.1 Situation géographique de Jijel

La région appartient au domaine Nord atlasique connu localement sous le nom de la chaîne des Bâbords, elle est limitée par :

- mer méditerranée au Nord.
- wilaya de Skikda à l'Est.
- wilaya de Bejaia à l'Ouest.
- wilaya de Sétif et de Mila au Sud.

I.2.2 Historique du gisement

Le secteur Sidi Maârouf comprend les structures Sidi Maârouf, Tissimiran et Mcid Aicha est située dans le NE de l'Algérie, plus exactement au Nord de Constantine dans les territoires des communes de Sidi Maârouf et de Grarem. IL est traversé par la route nationale Constantine -El Milia – Jijel à 85 km de Constantine, 15 km d'El Milia et à 75 km de Jijel. La galerie supérieure de l'ancienne mine de Tissimiran et la colonie minière est liée à la chaussée nationale par une route asphaltée de 4 km de longueur et au village de Sidi Maarouf par une autre route vers le sud de 2 km, également asphaltée /40,41/.

Au total le périmètre de recherches de Tissimiran commence à 6 km au Nord de Sidi Maarouf, le périmètre Mcid Aicha se trouve sur le territoire du village Hamala à 15 km au Nord de Grarem par une piste asphaltée en mauvais état et à 45 km vers le Sud-Est de Sidi Maarouf par la Route Nationale.

Les périmètres recherches se trouvent dans le Tell Nord Constantinois sur la chaîne Nord Numidique de part et d'autre de l'Oued El Kébir. Quatre amas de minerai ont été exploités partiellement (Kef El Hadid, Akern, Oum Sellet), contenant l'hématite (Fe_2O_3) avec d'importantes zones d'oxydation formées par la goëthite fibroradiale.

Les amas sont groupés dans la partie centrale et supérieure de la crête montagneuse du Djebel Sidi Maârouf. Leur potentiel est présenté dans le diagramme d'évaluation à 4.566.000 tonnes de minerai avec une teneur de 48,2 - 52,5% fer et des éléments nuisibles dans les limites acceptables.



Photo I.1.a Vue générale de la mine de Sidi Maârouf

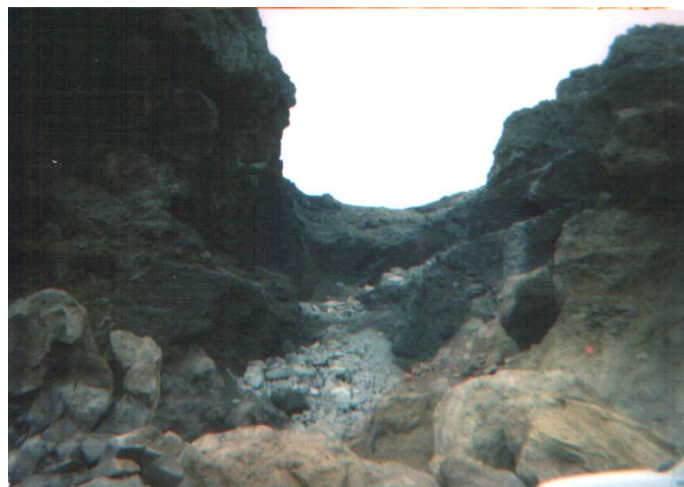


Photo I.1.b Vue générale de l'excavation de recherche de la mine de Sidi Maârouf

En 1923, Berthier rédigea une coupe géologique, évalue les réserves à 650 000 tonnes et présente deux analyses chimiques avec la teneur en fer de 53,66 - 53,83 % et des éléments nuisibles en proportions négligeables.

En 1968, l'industriel EXPORT-ROUMANIA a effectué une étude technico-économique pour plusieurs gisements de fer Algériens. Pour Sidi Maârouf on avait considéré à 1.500.000 tonnes les réserves probables.

Dans ces conditions l'indice de rentabilité a été insatisfaisant : 10,8 %. Il faut noter que d'après ce rapport, la classification des tailles des gisements est la suivante : /40,41/

Tableau I.2.2.a Classification des tailles des gisements / 40,41 /

N°	Taille	Million de tonnes de minerai de fer
1	Petite	0,5 - 5
2	Moyenne	5 - 50
3	Grande	> 50

Mais, aujourd'hui la classification des tailles des gisements de fer est beaucoup différente. Dans l'économie minière que nous allons Prendre en considération sont présentés d'autres limites orientatives plus actuelles.

Tableau I.2.2.b Valeurs des paramètres de la mine de Sidi Maârouf / 40,41 /

N°	Paramètres	U/M	TAILLE		
			Petite	Moyenne	Grande
1	Teneur	% Fer	35 - 70	30 - 70	25 - 70
2	Degré de minéralisation	% Minéraux de Fer	55 - 95	50 - 95	40 - 95
3	Réserves	Million de Tonnes	10 - 30	50 - 200	> 200
4	Réserves en métal	Million de Tonnes	3,0 - 20	15 - 140	50-500

C'est à dire, d'après les évaluations préexistences et la dernière classification des gisements de fer, les accumulations de Sidi Maârouf ne représentent même pas un gisement de taille minime.

Par le rapport de recherche aéromagnétique et radiométrique sont mises en évidence, d'importantes anomalies magnétiques en bordure méridionale du massif ancien de la petite Kabylie signifiant soit des massifs éruptifs cachés soit même des accumulations de minerai de fer.

I.3 GEOLOGIE DE LA REGION

Pour aborder les problèmes concrets de la genèse et des perspectives des gisements il faut utiliser l'histoire géologique d'une région plus large sur la base d'une étude monographique comme celle de Michel Durant Delga /46, 47, 48,49 /.

Cette étude commence avec l'observation que les zones paléogéographiques et structurales essentielles d'Algérie sont allongées parallèlement à la côte méditerranéenne. Dans la région de Constantine on rencontre du Nord au Sud la zone de Kabylie représentée par le massif paléozoïque métamorphique de la petite Kabylie, charrié vers le Sud sur :

- La zone sous Kabylie où affleurent surtout des sédiments mésozoïques violemment disloqués où se trouvent les structures favorables pour l'accumulation des minerais de fer Sidi Maârouf, Tissimiran, M'cid Aicha.
- La zone tellienne, séparée de la précédente par un alignement d'accidents plus ou moins continus.
- Le cristallophyllien Combro-Ordovicien constitué par des roches d'un métamorphisme, généralement de faible profondeur est recouvert par le Gotlendien moins développé non métamorphique remaniant le cristallophyllien sur lequel il repose en discordance.

Les principaux caractères résident dans une puissante intercalation de cipolin au sein des gneiss et par l'existence dans les micaschistes d'anciennes roches éruptives en filons, certains acides (porphyroïdes, leptynides d'autre basiques (diabase) et enfin les ultrabasiques (serpentes)

Autres phénomènes importants dans l'histoire géologique de la région sont aussi essentiels pour la formation des gisements de fer. Le charriage du massif ancien de la petite Kabylie vers le Sud 20-30 Km dans la phase orogénique alpine qui a produit des formations sédimentaires, commençant avec le Trias.

Il a produit également un front de migmatites d'intense transformation qui démontrent un réchauffage supérieur à 100°, avec une implication probable sur la formation et la migration des fluides. La mise en place du massif granitique Post-Burdigalien d'El Milia et ensuite le cortège des corps et des phénomènes associés, parmi lesquels la minéralisation avec des sulfures et peut être la minéralisation en oxydes et carbonates de fer.

Dans la phase orogénique alpine tardive, les rigides formations Jurassiques tectoniquement compétents par rapport avec les formations du Trias et du Crétacé ont percé la couverture Crétacé comme :

- Écaille (Tissimiran)
- Klype (Sidi Maârouf)
- Horst (M'cid Aicha).

Si la minéralisation était antérieure à ces mouvements, les accumulations monteraient vers la surface. Cette tectonique, d'après les caractères minéralogiques du minerai a déterminé de profondes transformations et même des mobilisations. Si la minéralisation était postérieure à ces mouvements la formation des accumulations aurait été facilitée par la multiplication des voies d'accès et des surfaces actives pour les réactions chimiques.

A la fin du Pliocène quaternaire un fort enlèvement est manifesté. Comme effet quelques parties des gisements sont arrivées à affleurer et une forte oxydation jusqu'à une profondeur importante sur la liaison magmatique de minerai de fer dans les structures Sidi Maârouf, Tissimiran, M'cid Aicha.

Dans la région seulement les moyens indirects peuvent établir quelques liaisons. Les apophyses du massif granitique d'El Milia s'étendent vers le Sud près de la structure Tissimiran mais de dimensions de plus en plus réduites, ce qui démontre l'approfondissement du massif au Sud vers la structure minéralisée.

Cependant d'après les anomalies ferromagnétiques, le massif d'El Milia n'est pas seul, il arrive à la surface, mais il en existe d'autres massifs granitiques qui demeurent toujours à une profondeur plus ou moins importante /46, 47, 48,49/.

I. 4 GEOLOGIE DU GISEMENT

1. Stratigraphie :

Dans la région de recherche se présente des formations des cycles structogéniques du calédonien jusqu'à l'Alpin /40,41/.

Toutes ces formations ont peut être des différentes implications sur la genèse de minéralisation de fer. Le cristallophyllien est constitué de :

- micaschistes (série inférieure) avec les intercalations de Hess vertes d'âge infracambrienne attribué par : M, D, Delga, mais qui n'affleurent pas dans notre région.
- Gneiss fins avec de grosses masses cipolins dans leur partie moyenne ou supérieures et parfois avec une barre de gneiss oeillés à leur base, d'âge géorgien Acadien.
- Gneiss oeillés attribués au cambrien supérieur ordovicien inférieur.
- Micaschiste (série supérieure) avec porphyroïdes inter stratifiés vers le haut surtout, d'âge ordovicien et niveau lenticulaires de calcaires dolomitiques ou de cipolins.

En relation avec notre but, il y a deux éléments que nous considérons dignes d'être mentionnés : (les calcaires cipoliniques, les roches granitoïdes, les migmatites et les processus tardifs) Les calcaires cipoliniques.

Le bloc tectonique de l'ouest de la structure Sidi Maârouf est éloigné de Quelques Dizaines de mètres des blocs cristallophyllien de la petite Kabylie celui ci est constitué par des oeillés mais dans la bordure Sud un niveau de micaschiste Aires cipoliniques gris compacts est disposé. Une analyse chimique de ces calcaires montre :

CaO = 46,27 % MgO = 0,59 % ; SiO₂ = 9,00 % ; Al₂O₃ = 1,95 % ; FeO = <0,1 % ;
S = <0,1 % ; P = 0,03 %.

Du point de vue géochimique la forte teneur en silice est constituée par les processus de minéralisations en fer. L'épaisseur des calcaires est de 20 m environ et contiennent des minéralisations de limonite de 2 m environ d'épaisseur.

Les minéralisations avaient eu des possibilités génétiques par la suite des processus tardifs qui ont affecté le cristallin.

I.4.1.a. Roches granitoïdes

Dans la région à la limite de cristallin à 300 m de la structure Sidi Maarouf nous avons trouvé une roche en bloc parabolique caractéristiques aux découpages du granite qui paraît être face juste à la limite du cristallin gneissique.

Une analyse microscopique démontre la présence d'une granite sont altéré à texture massive et structure grenue subautomorphes bien définis.

La carte apparaît sous forme de grains xéno morphe à contours réguliers et à extinction roulante. Dans les grains on trouve des pulsions très fines disposées sur les plans parallèles (plans Böhme) ou on observe très rarement des inclusions de biotite.

Les feldspaths plagioclases comme cristaux subautomorphes ou xéno-morphes à forme cristallographiques propres aux contacts du quartz, sont toujours presque uniformément parsemés par des minéraux argileux et en paillettes fines de séricine.

Plus, rarement on observe des paillettes de séricites à tendance d'orientation parallèle envers les. Plans de clivage. Les maclés sont notamment polysynthétique et très fins. Les maclés complexes albitekarlsbad sont rarement visibles les plans des maclés sont parfois plans et courbes de torsion né mettant en évidence des tensions tectonique ultérieures.

Les feldspaths potassiques sont toujours xénomorphes et hétérogonement parsemés par des minéraux argileux sous formes de nids. Ceux-ci sont parfois traversés par des fins filonnets de sericite /40,41/.

La muscovite se présente sous deux aspects :

- Cristaux xénomorphes bien développés parmi les feldspaths plagioclases. Ceux-ci sont parfois évidemment courbés. Cristaux tabulaires fortement pigmentés à hydroxydes de fer lui forment dans certains cas, des nids compacts associés à ces sortes de muscovite. Il s'agit probablement d'un remplacement de la biotite.

- L'apatite sous forme de petits grains subautomorphes qui se trouve comme minéral accessoire, Cette description minéralogique assez détaillée a été faite à cause de l'importance du problème. Les roches granitoïdes se trouvent au Cristallin à l'Ouest et à l'Est de l'Oued el Kebîr.

La roche décrite est semblable avec des roches granitoïdes à Feldspaths potassiques et plagioclases dans les quelles toujours le quartz est très abondant. Les plagioclases sont partiellement séricitisés, parfois avec des antipertites de feldspath potassique et où le mica est une biotite excédant parfois le fer arrivant aussi du mica blanc.

La muscovite forme parfois avec le plagioclase des associations micro pagmatitiques. Parmi les feldspaths c'est un microclin à macles nettes et parmi les minéraux accessoires on remarque la présence de l'apatite .

Dans cette situation il faut conclure qu'à proximité de la structure sidi Maârouf, des roches granitoïdes ont pu avoir un rôle de source en élément fer par l'exsudation la migration /40,41/.

I.4.1.b Migmatites

Le développement des ambrechites ocellées la mise en place de roches granitoïdes et l'apparition d'un métamorphisme de contact au bord Sud du Cristallin proche de la structure sidi Maârouf est démontrés par : M, D, Delga comme des processus migmatisation.

Les phénomènes sont présentés dans la zone frontale de chevauchement du Cristallin sur les dépôts mésozoïques et démontrent aussi un réchauffage de 100 C environ. Le front de migrratisation est accompagné par une concentration feldspathiques Un enrichissement ferro-magnésien manifesté par la formation de la biotite et une migration du bore qu'à comme résultat d'apparition de minces niveaux de tourmalinites.

Les processus peuvent être impliqués plus du moins dans la minéralisation en fer des calcaires du Lias inférieur-moyen, par intermédiaire des solutions ferromagnésiennes et la migration du bore.

I.4.1.c Des Processus tardifs

On constate que dans un grand nombre de roches la biotite a perdu son fer résultant des micas blancs secondaires, comme dans l'analyse présentée plus haut. Toutes les roches du complexe gnoisique sont souvent traversées par des filonnets d'albite, ce qui démontre une poussée de solution sodiques. De toute façon par en ces processus, des grandes quantités de fer on pu migrer plus ou moins loin, mais particulièrement dans les alentours du front de migmatisation.

Le Trias (épaisseur 2000 m Environ) sur la base des études antérieures et des observations partielles que nous avons faites en a pu reconstituer avec quelques incertitudes la colonne litho-stratigraphique du Trias pour la région recherchée.

La dolomite est le minéral le plus important de la roche ayant deux aspects :
A- cristaux automorphes, rhombique contours faiblement arrondis ayant on sur les bordures des hydroxydes de fer.

B- masses compactes formées par des cristaux subautomorphe généralement plus clairs que les autres Les calcites apparaissent sous forme de grains xéno morphes en nids du filon net sans savoir s'il s'agit des restes d'un calcaire ou d'une calcite ultérieure au processus de dolomitisation.

A M'cid Aïcha par deux analyses des dolomies metasomatiques à texture massive Ou compacte et à Structure grenue hétérogène faiblement bréchiques sont déifiantes.

Rarement on observe des petits nids de calcite microcristalline ayant les aspects des restes d'un calcaire qui a été remplacé mettasomatiquement par la dolomite. Sur les fissures se trouvent des grands cristaux fréquemment avec des zonages intérieurs où a bordures Formées par les hydroxydes de fer /40,41/.

Les hydroxydes de fer se forment aussi sur les fissures qui paraissent resautées par La suite d'un faible Broyage. Cette roche peut être formée par l'effet des solutions Associées aux processus de régénération tectonique et l'affectation tardive par les Solutions associées au magmatisme tertiaire caché, tout proche au dessous des Structures concernées. Morphologiquement ces formations constituent les terrasses Nord du Djebel Sidi Maârouf aux pieds des Hautes falaises constitués.

Par les calcaires du lotharingien et pliensbachien. Quelques fois ils présentent ces Phénomènes Karstique plus ou moins développe mais particulièrement aux Alentours des accumulations du minerai de fer. Les calcaires dolomitiques et dolomitisés de l'hettangien-sinemurien son hôtes pour plusieurs amas, apophyse, Filons, et nids de minerai d'oxyde de fer.

Aussi, de fréquent filon nets et nids de barytine sulfures de fer et de Cu et de quartz même sont répondu en liaison avec le développement des brèches tectoniques et Des systèmes de clivages /40,41/.

A Tissimiran l'Hettangien-Sinemurien est réduit à la surface. Ils affleurent au pied de la grande escarpe de Tissimiran mais en profondeur sûrement ils sont bien développé, le fait étant démontrée par l'existence dans l'extrémité Sud Ouest de l'écaille d'un important amas de minerai qui descend dans ces formations Bien développe ils affleurent à Mcid Aïcha lotharingien de 120 m d'épaisseurs Moyenne à Sidi Maârouf 250 m à Tissimiran et > 200 m a M'cid Aïcha.

Il est toujours présent et bien représenté dans toutes les structures recherchées. Les formations sont les plus homogènes constituant les crêtes des djebels à Sidi Maârouf et M'cid-Aïcha les roches sont des calcaires grisatre-jaunâtres avec une patine blanche souvent distinctement lités. Les bancs sont une épaisseur de 0,5- 2 m.

Il y a des calcaires finement oolithiques ou grosse oolithes mais qui sont souvent des faux oolithes dans un ciment calcaires finement cristallisé.

Ces calcaires subissent parfois un début de dolomitisation au niveau du ciment ne pénètre que très peu dans les oolithes le résultat est la néoformation d'une Dolomie en gros rhomboèdres.

Les analyses microscopiques réalisées dans le cadre de notre prospection sont édifiantes. Sur le rapport entre la roche encaissante et la minéralisation de fer. Deux Échantillons de calcaires situés à 1 m et respectivement 10 m au nord de l'amas dans la structure de sidi Maârouf ont été analysés.

Le premier c'est un calcaire à texture massive et structure micro granulaire, très Finement cristallin Traversé par des dia classes. La roche est entièrement constituée Par la calcite qui généralement se présente en petits cristaux. Par endroits, la Calcite forme des nids ou des petites veines quand elle est bien cristallisée.

Le deuxième c'est un calcaire à texture compacte et à structure bréchiques. L'aspect bréchiques de la roche est déterminé par les débris de calcaire gris foncé, Renfermé dans un agrégat de calcite plus largement cristallisé. Même les débris de calcaire ont de différents degrés de cristallinité.

Le résultat peut être interprété dans le sens que la roche est dolomitisée devienne Plus bréchiques et plus cristallisée vers l'amas et envisage le contrôle tectonique et Géochimique dans l'accumulation du minerai. A Mcid Aicha un échantillon a été Prélevé à quelques centaines de mètres à l'est de l'ancienne mine de Zinc /40,41/.

La roche est un calcaire de texture compacte et structure oolithique avec des oolithes à dimensions allant jusqu'à 2,5 mm, cimentées à une calcite relativement bien cristallisée. Les oolithes sont formées par un carbonate microcristalline, parfois zonées et par endroit elles sont aplaties, et ont rarement des noyaux de calcite plus largement cristallisée.

Certains agrégats microcristallins peuvent être d'origine organique.

Le ciment est constitué par une calcite bien cristallisée xénomorphe et à nombreuses macles polysynthétique. Le caractère organogène du lotharingien prouve tant sur la pureté à l'égard des particules péritique que sur le caractère plus permutable aux solutions minéralisatrices de faible température.

Aussi ces roches sont facilement touchées par les phénomènes karstiques. Partout dans les structures recherches la minéralisation de fer la plus importante se trouvent le plus souvent dans les formations lotharingienne.

Le plienbachien de 140 m d'épaisseur moyenne à Sidi Maârouf, 100 m à Tissimiran et > 100 m à Mcid Aicha. Omniprésent dans toutes les structures recherches il est en continuité de sédimentation sur le lotharingien, comme celui qui est sur l'hettangien-sinemurien il est formé par des calcaires grisâtres ou rougeâtres

en bancs faiblement lité a Sidi Maârouf, mais mieux lités à Tissimiran finement oolithiques ou à grosse oolithe, calcaires à algues, quelques fois des lentilles de calcaires à encrine, particulièrement à Sidi Maârouf.

Généralement des nodules à Silice se trouvent sur les limites des bancs et dans les affleurements elles sortent en relief. Le caractère est plus évident dans les structures du Nord, la structure de Tissimiran.

Un échantillon prélevé à quelque dizaine de mètre à l'Est de la carrière de Tissimiran, près du plan de chevauchement, montre aussi des caractères appropriés à la métallogénèse.

A l'Est un calcaire partiellement dolomitisé à texture massive et à structure grenue subautomorphe, est bien développé. La calcite qui constitue la plus grande partie de la roche est relativement bien cristallisée en grains très irréguliers, dentelés et présente de fréquente macles polysynthétique.

Le quartz (moins de 15%) apparaît, toujours sous forme de grains faiblement arrondis et parfois à Extension roulante. Certains grains, présentent de rares inclusions de cristaux prismatiques apatites.

La dolomite hétérogonement éparpillée dans la roche forme des cristaux automorphe à contours Rhombiques et faiblement arrondis. Leur intérieur est intensivement pigmenté par des hydroxydes de Fer /40,41/.

▪ **calcédoine :**

Comme accident à contours très irréguliers dans les calcaires contient par endroits des cristaux automorphe de dolomite. Les hydroxydes de fer apparaissent sporadiquement formant des pellicules parmi les grains des Carbonates ou pigments les noyaux des cristaux de dolomites. Sur le rapport avec la minéralisation Sidi Maarouf, plusieurs amas de minerai se trouvent vers la limite.

▪ **Pliensbachien :**

Avec le lotharingien et parfois même dans plienschbachien prouvant ses aptitudes comme **métallotecte**. Il y a aussi des aptitudes pour les phénomènes karstiques, qui se trouvent un peu partout. Puisque plus haut dans l'échelle stratigraphique, aucune autres formations n'est intéressante comme métallotecte dans notre région, quelques observations sur le lias inférieurs moyen est partiellement supérieurs (hettangien, sinémurien, lotharingien, plienschbachien) s'imposent. Les limites entre hettangien sinémurien lotharingien plienschbachien ne sont pas nettes.

Comme suite les limites établies sur les cartes géologiques et les coupes sur la base des aspects Lithologiques macroscopique et géomorphologique doivent être considérées comme des zones de passage, ayant en vue que nous n'avons pas des analyses paléontologique. Même sur la base des analyses chimiques prélevés sur trois profils transversaux on ne peut pas tirer de limite géologique nettes.

Les études géologiques antérieures ainsi que nos recherches ne peuvent pas apporter des preuves directes sur l'existence des accumulations des oolithes ferrugineuses, cependant ces entretexistes peuvent être relativement répandues dans le lias inférieur-moyen, mais la minéralisation en fer a été probablement remobilisée.

Les principaux phénomènes qui ont subis les formations calcairefères sont la brichification, la cristallisation, la dolomitisation partielle et la minéralisation en oxyde de fer, barytine, sulfure.

La puissance du Trias et sa richesse en élément fer, le renfort diapirisme qui l'a bouleversé favorable aux émigration des éléments à des basses températures, la métasomatose qui l'a apporté aux formations percées, sont des arguments directs et indirects pour l'origine par régénération tectonique au moins partielle pour les accumulations de fer de Sidi Maârouf Tissimiran et Mcid Aicha.

On observe même que le plus fort diapirisme du trias situé au bord de la klippe liasique de sidi Maârouf et accompagnées dans les calcaires de l'hettangien – plienschbachien par des affleurements de minerais les plus importants et les plus nombreux.

Sur la base de cette corrélation on peut déduire que le degré de minéralisation le plus important se trouve à sidi Maârouf pour désordre à Tissimiran et se réduire encore à M'cid Aicha.

Puisque toutes les formations jurassique sont liées du point de vue structurelle il faut représenter jusqu'au bout. Le dorien de 50m d'épaisseur moyenne à Sidi Marouf, 100 m à Tissimiran manque à M'cid Aicha.

Comme conséquences du changement de l'hydro climat on passe l'alternance de calcaire gris noir finement lité où apparaissent la silice noire et les calcaires durs à cassure claire. Les calcaires Greneu qui font suite fréquemment disharmonique à cause de leur compétence tectonique par rapport avec l'incompétence des gros guets rigides calcaireux, manifestés avec l'occasion des grands mouvements tectoniques.

▪ **Toarcien :**

Est de 20 m à Sidi Maârouf n'est pas délimité sur les cartes étant compris dans le jurassique moyen il est constitué par des argilites gréseuses verdâtre ou noirâtre avec des lites micro conglomératiques.

▪ **Dogger :**

Le terme compréhensif de 200 m d'épaisseur moyenne à Sidi Maârouf, 200m à Tissimiran. En dehors de toarcien décrie il comprend aussi l'Aalénien.

A Sidi- Maârouf en général il est constitué par des marno-calcaire bien lité ; avec des intercalations marneuses.

A Tissimiran en bas il est formé par des calcaires marneux (Domerien supérieur- Toarcien), des marnes schisteuses jaunes micacées et gréseuses, avec des lits calcairifères intercalés. Vers la partie supérieure le faciès est un peu changé et calcaires oolithiques compacts à patine blanche En une ou plusieurs masses séparés par des marnes jaunes prennent place. Le Malmö d'une épaisseur moyenne de 900 m à Sidi Marouf et de 250-300 m à Tissimiran.

A Sidi Maârouf le Malm inférieur et moyen est représenté par des calcaires en gros bancs à silex blond et souvent en lits. Le kimméridgien est constitué par calcaires et oolithiques compacts en très gros bancs. La tectonique est constituée par marno-calcaires et marnes avec des intercalations très variées.

La forte prédominance du faciès calcareux dans le Jurassique a destiné pour tous les termes, la même histoire structurale. Ils ont constitué un ensemble des sous-unité tectonique comme la klippe de Sidi Maârouf, ou l'écaille de Tissimiran.

En réalité, le karst de Mcid Aïcha paléographiquement provient d'une ; région où ces formations n'ont pas été sédimentées, ou bien elles ont été érodées, parce que la région a subi une forte érosion au temps anténéoconien /45/.

▪ **Crétacé :**

Il est important par notre point de vue comme couverture percée par le jurassique avec son métallotect (dolomitisé et minéralisé et encore comme couverture qui cache actuellement la plus grande partie du Jurassique, avec ses possibles accumulations des minerais).

Il est constitué par deux faciès dominants. Le faciès de flysch schisto-gréseux qui commence dans le Néocomien et s'étend de plus en plus réduit jusqu'à Senomien en différents niveaux stratigraphiques. Son épaisseur est de quelques dizaines -De mètres sur le socle cristallin et de 500-1000 m en bordure [Sud de celui-ci. Généralement il est considéré sur les cartes, comme Crétacé Inférieur-moyen. Le faciès marneux, marno-calcaireux dans le Crétacé inférieur et aussi dans le crétacé supérieur ». A cause de la situation structurale mentionnée les formations du **Crétacé** contournent toujours en ensemble avec les formations du Trias, les structures minéralisées du Jurassique /45/.

En rapport avec ces structures, les autres formations n'ont aucune importance jusqu'au Quaternaire. Et ce niveau présente seule à Sidi-Marouf une implication notable Quaternaires. L'implication mentionnée concerne les zones des éboulis situées au Sud de la crête du Djebel.Sidi Maârouf.

Le bloc tectonique médiane de la structure, séparé des blocs marginaux par les plus importantes failles transversales au contact avec les autres blocs présentent des zones dans lesquelles les roches sont les plus tectonisées.

En relief ces zones sont des chenaux de passage transversal. Il est probable que le matériel tombé, calcaires et minéralisations, ou simplement mouvementé. En gros bloc ou même en rochers entiers est accumulé en très grandes quantités.

Dans le versant Sud de déblayement des calcaires liasiques, est facilité par leur position structural ce qui explique le développement des zones des éboulis par comparaison avec les zones similaires situées dans le versant Nord, Quelques exemples sont édifiants sur l'ampleur du phénomène.

L'apophyse filonienne du minerai de versant Sud se trouve sur une faille longitudinale sur laquelle est en déplacement une zone de calcaires pliensbachien de longueur de 100 m environ, d'épaisseur de 20-40 m et de hauteur de 20-50 m. Vers le haut la faille a une largeur à vide de 3 m environ et vers la bas de 1m. Une situation similaire avec des dimensions aussi semblables se trouve à 400 m à l'Ouest de l'affleurement /45/.

I.4.2 Pétrographie

I.4.2.1 Minéralisation

Premièrement on présentera la situation des affleurements puis celle des structures des localisations des amas de minerai.

I.4.2.2 Affleurement

Dans le secteur sidi Maârouf et extension à peu-près partout où affleurent les formations de lias inférieurs-moyen, il y a des affleurements de minerai. Sur la première place se trouve la structure sidi Maarouf avec les plus puissantes et les plus nombreux affleurements de minerai de fer puis la structure Tissimiran avec 18 affleurements de minéralisation en fer ou des zones d'hydrothermalisme et la structure Mcid aïcha avec 7 minéralisations de fer et 8 plus importantes pour les structures mais les minéralisations en fer représentent plutôt de concentration super-gènes de la goethite dans les chapeaux de fer des minéralisation plus profondes.

Toutefois il faut mentionner quelques affleurements de minerai de fer sur les petits massifs du lias Inférieur moyen situés entre sidi Maârouf et Tissimiran toujours près de la bordure du cristallin et en Contact direct avec le trias diapirique

le long de la faille profonde de chevauchement du massif cristallin Sur les formations mésozoïques.

Quand la minéralisation affleure sous forme de calcaire bréchique dolomitisé, fortement limonites, généralement avec des nids et filonnets de barytine et de calcite, on considère que l'accumulation de minerai se trouve à quelques dizaines de mètres de profondeur ou même plus.

A Tissimiran tous les affleurements font partie de cette catégorie une autre catégorie d'affleurements est le minerai de fer proprement dit qui a une teneur élevée en fer, toujours avec des nids filonnets de barytine et de calcite parfois contournés par des calcaires bréchiques fortement limonitisés et aussi par d'importants vides karstique particulièrement dans la partie supérieure des affleurements.

Dans ces affleurements la barytine atteint de grandes teneurs. Pour les apophyses filoniennes la surface moyenne d'affleurement est de 75 m² et pour les apophyses –colonnes est de 82 m² coupole d'amas de minerai qui éjecte vers le haut des apophyses de minerai et qui sont contournés par des importants vide karstique dans lesquels il y a des stalactites, des stalagmites et des idéaux, la calcite en croute etc. ... /40,41/.

Synthétiquement la fréquence et la puissance des affleurements par types morphologiques sont présentées dans le tableau I.4.2.1.a :

Tableau I.4.2.1.a Constitution minéralogique et chimique des affleurements /40,41/

Caractère morphologique	Nombre d'affleurements	Surface totale m ²	Surface moyenne m ²
Coupole d'amas	8	16530	2066
Apophyse colonne	38	3229	≈ 82
Apophyse filonienne	27	2036	≈ 75
Filon	7	226	≈ 32
Nids	60	113	≈ 2
Zone d'hydro thermalisation	16		
Total		22,134	

La constitution minéralogique et chimique des affleurements comporte des variations sensibles entre les types morphologiques.

Les calcaires limonitisés sont des brèches tectoniques partiellement cristallisées et minéralisées par des oxydes de fer, la teneur en fer atteint 17-22 % ,

dans les nids la minéralisation est plus forte et probablement la teneur en fer arrive à 30 % environ .A l'ancienne carrière a Tissimiran dans les apophyses proche de l'amas les teneurs en fer sont de :17,14 % - 56,36 % avec la moyenne de 37 % environ.

A sidi Maârouf au niveau des analyses reçues on peut suivre la variation chimique sur la verticale des coupoles comme le montre le tableau.

Tableau I.4.2.1.b Accumulations du minerai en profondeur /40,41/

Prof- écha	Cu	Fe	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	S	H ₂ O	PO	As
≈ 5 m au dessous de la coupole de l'amas	0,55	44,19	4,61	0,49	5,48	0,65	2,51	0,07	0,56	0,35	0,12
≈ 10 m au dessous de l'amas	0,37	51,45	4,12	0,78	2,15	0,51	2,57	T	0,92	0,24	0,10

Les données au niveau des affleurements supérieures démontrent la tendance générale de concentration du fer vers les grandes accumulations du minerai en profondeur.

Cependant il faut considérer l'implication de profonde zone d'oxydation super gène sur la concentration en fer qui généralement ne peut avoir une grande importance pour les minerais d'oxyde de fer. Mais ce problème sera analysé lors de la présentation minéralogique des amas.

I.4.3 Structures de localisation des amas de minerai

Parmi les 08 coupoles d'amas de minerai qui affleurent, 04 seulement sont plus ou moins connus en profondeur par l'intermédiaire des anciens travaux miniers d'exploitation de sidi Maârouf.

A Tissimiran un amas connu à profondeur est trahi à la surface par des zones d'hydrothermalisation. Sur la base de cette connaissance directe des facteurs de contrôle géologique et des affleurements de minerai ou des zones d'hydrothermalisme, d'autres amas, n en extension des anciennes exploitations ont été interprétées. Puisque les données acquises ne sont gère homogénéément réparties, l'analyse géologique des amas sera faite pour les aspects morphologiques, minéralogiques, chimiques au même temps /42, 43,44 / .

I.5.Conclusion :

Les études géologiques antérieures ne peuvent pas apporter des preuves directes sur l'existence des accumulations des oolithes ferrugineuses, cependant ces entretissées peuvent être relativement répandues dans le lias inférieur- moyen, mais la minéralisation en fer a été probablement remobilisée.

Les principaux phénomènes que les formations calcairefères ont subis, sont la brichification, la cristallisation, la dolomitisation partielle et la minéralisation en oxyde de fer, barytine, sulfure.

La puissance du Trias et sa richesse en élément fer, le renfort diapirisme qui l'a bouleversé favorable aux émigration des éléments à des basses températures, la métasomatose qui l'a apporté aux formations percées, sont des arguments directs et indirects pour l'origine par régénération tectonique au moins partielle pour les accumulations de fer de Sidi Maârouf. La constitution minéralogique et chimique des affleurements comporte des variations sensibles entre les types morphologiques.

La constitution minéralogique et chimique des affleurements comporte des variations sensibles entre les types morphologiques.

Les calcaires limonitisés sont des brèches tectoniques partiellement cristallisées et minéralisées par des oxydes de fer, la teneur en fer atteint 17-22 %, dans les nids la minéralisation est plus forte et probablement la teneur en fer arrive à 30 % environ. A l'ancienne carrière à Tissimiran dans les apophyses proche de l'amas les teneurs en fer sont de : 17,14 % - 56,36 % avec la moyenne de 37 % environ.

CHAPITRE II

ANALYSE ET ETUDE DES PROPRIETES MAGNETIQUES

DU MINERAL DE FER

II.1 PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES

II.1.1 Grandeurs et unités magnétiques

Les grandeurs magnétiques fondamentales sont le champ appliqué H ($A.m^{-1}$), l'induction magnétique B (T), le moment magnétique m ($A.m^2$). Par définition, l'aimantation M ($A.m^{-1}$) est le moment magnétique par unité de volume. Dans le système international (SI), ces grandeurs vectorielles sont reliées par la relation / 50 /

$$B = \mu_0 (H + M) \dots\dots\dots(1)$$

Avec

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

Le vecteur aimantation M s'exprime en fonction du champ appliqué par la relation

$$K = M / H \dots\dots\dots(3)$$

Où K , nombre sans dimension, est la susceptibilité magnétique volumique du matériau considéré. La susceptibilité peut également être spécifiée en fonction de la masse. Dans ce cas la susceptibilité spécifique s'exprime en $m^3.kg^{-1}$.

La susceptibilité est généralement mesurée en champ faible, c'est à dire d'intensité de l'ordre de celle du champ magnétique terrestre.

II.1.2 Comportement des matériaux dans un champ H

Tous les matériaux peuvent être classés à l'intérieur de trois groupes définissant leurs propriétés magnétiques : diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme au sens large / 50 /.

II.1.2.1 diamagnétisme

Si $K < 0$, on parle de diamagnétisme. 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.

II.1.2.2 paramagnétisme

Par définition, tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont paramagnétiques, c'est à dire $K > 0$. Dans un matériau paramagnétique, les atomes ont un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, ces moments magnétiques s'orientent et augmentent le champ H appliqué. Comme pour le diamagnétisme, il s'agit d'un phénomène faible et temporaire.

Contrairement au diamagnétisme, la réponse d'un matériau paramagnétique vise à renforcer l'action du champ H extérieur. Notons que ce phénomène diminue avec l'augmentation de la température puisque l'agitation thermique désoriente les dipôles magnétiques élémentaires. Les argiles contenant du fer sont paramagnétiques.

II.1.2.3 ferromagnétisme *s.l.*

Dans un matériau ferromagnétique coexistent trois types d'interactions : les interactions d'échange, les interactions avec le réseau et les interactions dipolaires magnétiques. L'impossibilité de satisfaire à la fois les exigences associées à toutes les interactions conduit à l'établissement d'une structure en domaines des moments magnétiques : la configuration ainsi obtenue résulte d'un compromis, et peut, de ce fait, être aisément perturbée (Du Tremolet de Lacheisserie, 1999). L'état auquel aboutit le compromis dans le cas des systèmes de grande taille est celui qui a été suggéré par P. Weiss : la matière ferromagnétique se décompose en domaines élémentaires au sein desquels l'aimantation est orientée selon une direction de facile aimantation.

L'aimantation d'un matériau ferromagnétique correspond à l'orientation des dipôles élémentaires dans une même direction. A la différence des paramagnétiques, cette orientation peut se faire spontanément, en l'absence d'un champ H extérieur. En général, le moment magnétique total est nul parce que les différents domaines ont des orientations différentes et leurs effets s'annulent/50/.

II.2 Boucle d'hystérésis et propriétés magnétiques

Un grand nombre d'informations peuvent être tirées sur les propriétés magnétiques d'un matériau en étudiant sa boucle d'hystérésis. Une boucle d'hystérésis montre la relation entre la densité de flux magnétique induit (B) et la force d'aimantation (H). Il est souvent désigné comme la boucle BH . Une boucle d'hystérésis exemple est montrée ci-dessous.

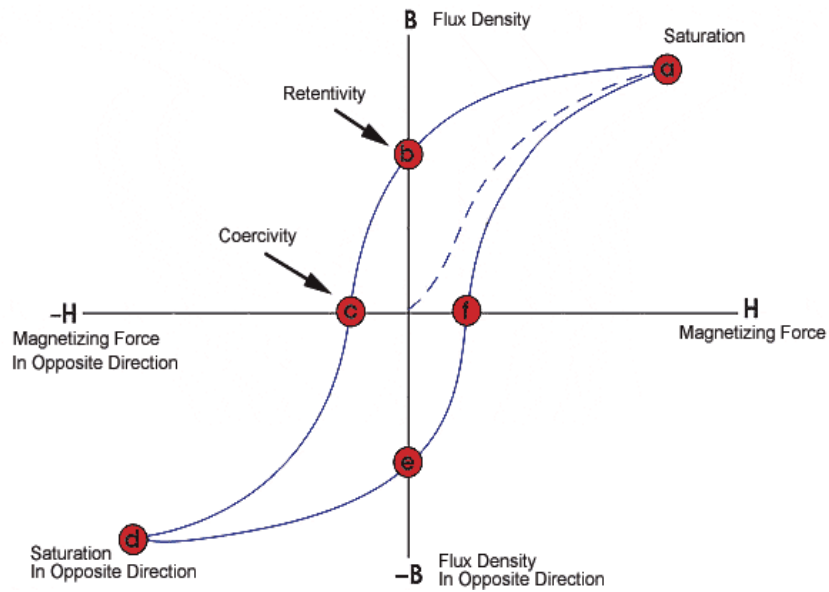


Figure II.2 boucle d'hystérésis /50/

La boucle est générée par la mesure du flux magnétique d'un matériau ferromagnétique tandis que la force d'aimantation est modifiée. Un matériau ferromagnétique qui n'a jamais été préalablement aimanté ou a été complètement démagnétiser suivra la ligne en pointillés sous forme de H est augmenté. Comme la ligne met en évidence, plus la quantité de courant appliquée ($H +$), plus le champ magnétique dans le composant ($B +$). Au point "a" presque tous les domaines magnétiques sont alignés et une augmentation supplémentaire de la force d'aimantation sera produisent qu'une très faible augmentation du flux magnétique. Le matériau a atteint le point de saturation magnétique.

Lorsque H est ramené à zéro, la courbe va passer de "point A" à point "B." À ce stade, on peut constater que certains flux magnétique reste dans le matériel, même si la force d'aimantation est nulle. On parle alors de point de rétention sur le graphique et indique la rémanence ou le niveau de magnétisme résiduel dans le matériau. Certains des domaines magnétiques restent alignés, mais certains ont perdu leur alignement.) Comme la force d'aimantation est inversée, la courbe se déplace à point "c", où le flux a été réduit à zéro. C'est ce qu'on appelle le point de coercivité sur la courbe. (La force d'aimantation inversée a renversé assez des domaines pour que le flux net de l'intérieur du matériau est nulle.) La force requise pour enlever le magnétisme de la matière résiduelle est appelée force coercitive ou coercivité du matériau.

Comme la force d'aimantation est augmentée dans le sens négatif, le matériel sera redevenu magnétiquement saturé mais dans la direction opposée (le point "d"). Il aura un niveau de magnétisme résiduel égal à celui obtenu dans l'autre sens. L'augmentation de H dans la direction positive B sera de retour à zéro. Notez que la courbe ne revient pas à l'origine du graphique, car une certaine force est nécessaire pour éliminer le magnétisme résiduel. La courbe prendra un chemin différent du point "f" revenir au point de saturation, où il complète avec la boucle.

De la boucle d'hystérésis, un certain nombre de propriétés primaires magnétique d'un matériau peut être déterminée.

II.2.1 Rémanence - Une mesure de la densité de flux résiduels correspondant à l'induction de saturation d'un matériau magnétique. En d'autres termes, c'est la capacité d'un matériau à conserver une certaine quantité de champ magnétique résiduel lorsque la force d'aimantation est retirée après avoir atteint la saturation. (La valeur de B au point b sur la courbe d'hystérésis).

II.2.2 Magnétisme résiduel ou flux résiduelle - la densité du flux magnétique qui demeure dans un matériau lorsque la force d'aimantation est nulle. Notez que le magnétisme résiduel et de rétention sont les mêmes lorsque le matériau a été aimanté au point de saturation. Cependant, le niveau du magnétisme résiduel mai être inférieure à la valeur de la rémanence lorsque la force d'aimantation n'a pas atteint le niveau de saturation.

II.2.3 Force coercitive - Le montant du champ magnétique à rebours qui doit être appliqué à un matériau magnétique pour que le retour du flux magnétique à zéro. (La valeur de H au point C sur la courbe d'hystérésis) .

II.2.4 Perméabilité, μ - Une propriété d'un matériau qui décrit la facilité avec laquelle un flux magnétique est créé dans le composant.

II.2.5 Réticence - c'est l'opposition qui montre un matériau ferromagnétique à l'établissement d'un champ magnétique. La réticence est analogue à la résistance dans un circuit électrique /50/.

II.2.6 Propriétés magnétiques de quelques composés ferromagnétiques s.l.

Le tableau II.2.6 synthétise les valeurs de quelques propriétés magnétiques des composés mis en évidence lors de l'étude /50 /.

Tableau II.2.6 Propriétés magnétiques des minéraux ferromagnétiques /50/

Minéral	Formule	Densité	K, 10 ⁻³ SI	Js, A.m ² .kg ⁻¹	Coercivité Max. T	Tc ou Tn °C	Tb Max. °C
Ferrimagnétiques							
Magnétite	Fe ₃ O ₄	5,18	1000-5700	90-92	0,3	580	575
Maghémite	α-Fe ₂ O ₃	4,90	2000-2500	70-80	0,3	600	350
Greigite	Fe ₃ S ₄	-	-	25	0,3	333	330
Pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	4,62	3200	20	0,5-1	320	325
Antiferromagnétique							
Hématite	αFe ₂ O ₃	5,26	0,5-40	0.4	1,5-5	675	675
Goethite	α-FeOOH	4,27	1,1-12	<1	>5	120	60-120

Rq: Tableau II.2.6 Propriétés magnétiques des minéraux ferromagnétiques mis en évidence au cours de l'étude. Susceptibilité volumique en champ faible (K), aimantation à saturation à température ambiante (Js), champ coercitif maximum, température de Curie (Tc) ou de Néel (Tn), température maximum de blocage (Tb). Tb correspond à la température en dessous de laquelle l'état fondamental est stable /50/.

II.3 Classification des substances minérales en fonction de leur susceptibilité

En minéralurgie, les substances minérales ont été classées en quatre groupes suivant leur comportement dans un champ magnétique.

II.3.1 Minéraux fortement magnétiques : Ces minéraux peuvent être extraits par des séparateurs offrant un champ magnétique d'intensité un plus égale 1500CE, et $k = \mu_0 (>> 1)$,

la force d'attraction magnétique est

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p \text{grad} (H^2) / D \text{ pour } H \leq D_{sat} \dots\dots\dots (3)$$

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p M_{sat} \text{grad} (H) \text{ pour } H > D M_{sat} \dots\dots\dots (4)$$

Sachant que :

$$\vec{I} = \vec{J} = \mu_0 M \text{ et } M = \vec{H} / D \dots\dots\dots(5)$$

Où, M_{sat} : est l'aimantation à la saturation.

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

II.3.2 Minéraux faiblement magnétiques : C'est le groupe le plus étendu, leur aimantation nécessite la mise en œuvre des champs dont l'intensité est comprise entre 6000 et 30000 CE, et leurs susceptibilités de l'ordre de 15 à 600 .10⁻⁶ CGS.

La force d'attraction magnétique est :

$$\vec{F}_m = 1/2 \mu_0 k_p \nabla p \text{ grad } (H) \text{ pour } k_p \leq 1 \dots\dots\dots(6)$$

II.3.3 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 $M'/M \rho_P$

$$F_m = \mu_0 m M'_{sat} \text{ grad } (H) \dots\dots\dots(7)$$

Généralement, on trouve la martite, correspondant à la magnétite composée.

II.3.4 Minéraux non magnétiques : Ces minéraux non récupérables, même avec un séparateur d'intensité de 30 000 CE comprennent les paramagnétiques de susceptibilité magnétique inférieure à 15.10⁻⁶ CGS et la totalité des diamagnétiques : la scheelite, la molybdénite, parce que toujours la cassitérite et les minéraux non métalliques /10,12/.

II.4 Action des forces magnétiques et mécaniques :

II.4.1 Introduction :

Le phénomène de séparation magnétique s'effectue dans l'espace de champ 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 présentent la plus grande aptitude à l'aimantation.

II.4.2 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.

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 V_p \left(\frac{K_p}{1 + DK_p} \right) \text{Grad} (H^2) \dots\dots\dots(8)$$

D : Coefficient de démagnétisation des particules

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

μ_0 : Perméabilité de vide.

Grad : Gradient du champ magnétique suivant les directions ($0_x, 0_y, 0_z$)

$\vec{H}$: 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 :

$$\vec{F}_m = \vec{\nabla} \int_V \vec{J} \cdot \vec{H} d_v \dots\dots\dots(9)$$

L'intensité d'aimantation ou la polarisation magnétique est :

$$J = \frac{K}{1 + DK} \mu_0 \vec{H} \dots\dots\dots(10)$$

$\vec{\nabla}$: le gradient du champ magnétique suivant les directions $0_x, 0_y, 0_z$

$$\vec{\nabla} = \text{Grad} = \frac{dH}{dx} \vec{a} + \frac{dH}{dy} \vec{j} + \frac{dH}{dz} \vec{k} \dots\dots\dots(11)$$

$$\vec{F}_m = \frac{m_0 KV}{1 + (K/3)} (\vec{H} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} \dots\dots\dots(12)$$

Après l'intégration est assimilation de la particule a dipôle, le moment : $\vec{m} = V\vec{M}$, et la particule (dipôle) assimilé à une sphère ($D=V/3$) et comme la particule est paramagnétique $k \leq 1$

$$\vec{F}_m = 1/2 m_0 k V \vec{\nabla} (H^2) = 1/2 \mu_0 V \text{grad} (H^2) \dots\dots\dots(13)$$

Ou
$$V = \frac{k_p}{1 + D_p K_p} \dots\dots\dots(14)$$

Cette expression peut être simplifiée comme suit :

$$F_m = 1/2 \mu_0 K V \nabla (H^2) \dots\dots\dots(15)$$

II.4.3 forces antagonistes :

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 :

II.4.3.1 force de gravité :

$$\vec{F}_g = \frac{4}{3} \pi (\rho_p - \rho_f) R_p^3 \vec{g} \dots\dots\dots(16)$$

II.4.3.2 force centrifuge :

$$\vec{F}_c = \rho_p P_p W^2 R \dots\dots\dots(17)$$

II.4.3.3 force d'entraînement par le fluide :

$$\vec{F} = 6 \pi \eta R_p (\vec{V}_f - \vec{V}_p) \dots\dots\dots(18)$$

Avec :

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

R_p : Rayon de la particule.

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

$\vec{V}_f$: vitesse angulaire de la particule.

W : Vitesse angulaire de la particule.

ρ_p et ρ_f : Masse volumiques de la particule et du fluide.

η : Viscosité dynamique du fluide.

Pour que la séparation ait lieu, il est nécessaire que la valeur de la force magnétique (interaction) soit supérieure à la somme des forces antagonistes (mécanique) développées par le système, et des forces inter particules qui peuvent s'apparaîtraient, comme le phénomène électrostatique, l'action des toutes ces forces sont montrés dans la figure II.4.3.3 qui suit : /6,3 /

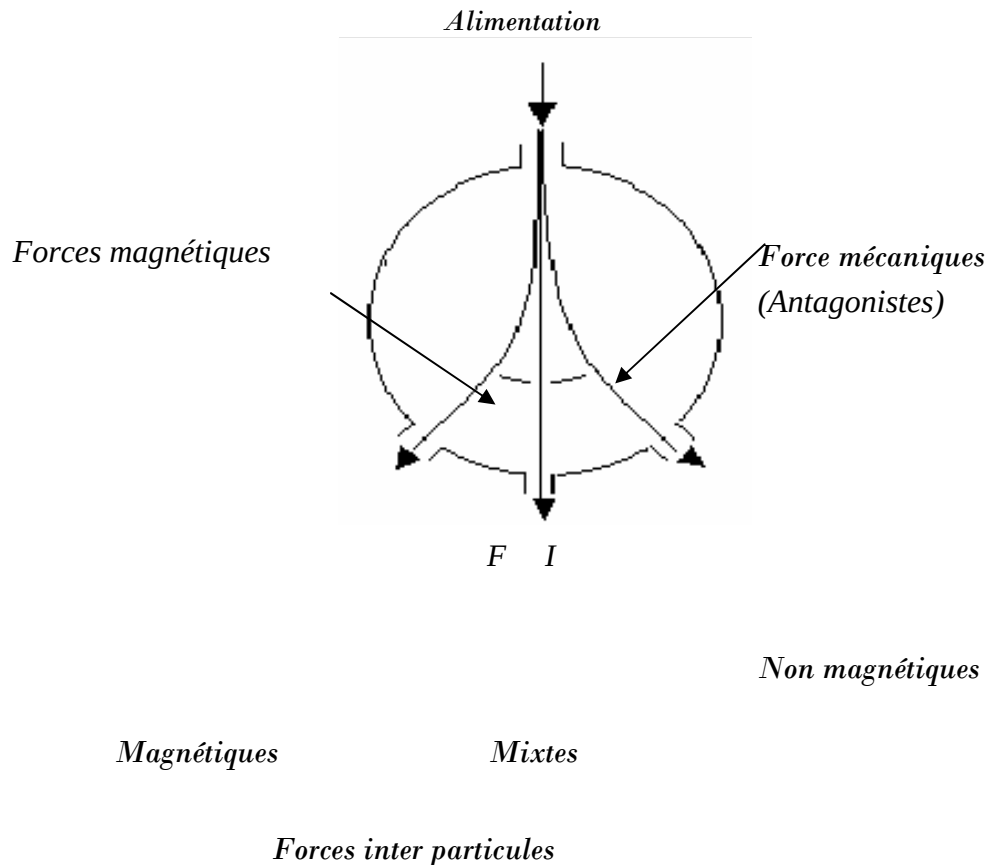


Figure II.4.3.3 Schéma de principe de séparation magnétique

II.5 Comportement dynamique d'une particule dans un séparateur magnétique :

L'étude du mouvement des particules dans un système magnétique à matrice d'extraction est complexe, mais peut être simplifiée, on prenant le plus simple, on ne considère que l'interaction entre un élément de la matrice et une particule de petite dimension dans un champ magnétique uniforme donné. Considérant une fibre ferromagnétique de rayon a , placée suivant l'axe Z Dans un fluide diamagnétique.

Un champ magnétique de rayon H ($\vec{H}_0 = B_0/\vec{u}_0$) suffisamment élevé pour saturer la fibre, est appliqué suivant la direction x , une particule sphérique paramagnétique de rayon R_p ($R_p \leq a$) de volume $V_p = (4/3)\pi R_p^3$ de masse volumique ρ et de susceptibilité moyenne K_p .

Est portée par un fluide de viscosité dynamique η de susceptibilité K_p qui circule avec une vitesse V_p de direction négative, /2/.

Pour calculer la trajectoire de la particule, on considère qu'elle est soumise à une force de magnétique F_m , force d'entraînement pour le fluide F_R , et de force de gravité F_g , dans la direction de l'accélération due à la pesanteur $\vec{g}$ (figure-2-). Les équations traduisant le mouvement de la particule, peuvent être directe en terme de coordonnées polaires en fonction de r et Q , celles-ci étant en relation avec x et y par :

$$x/a = \sqrt{a} \cos Q \text{ et } y/a = \sqrt{a} \sin Q \text{ ou : } \sqrt{a} = r/a \dots\dots\dots(19)$$

L'équation du mouvement est la somme vectorielle des forces :

$m \vec{a}_p = \vec{F}_F + \vec{F}_n + \vec{F}_g$ (21) soit $\vec{a}_p =$ Accélération de la particule.

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} u_0 K V \vec{\nabla} (H^2) \dots\dots\dots(20)$$

Ou :

$$k = K_p - K_F$$

$$\text{et } m = \frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho_p$$

$$\vec{F}_f = \frac{4}{3} \pi R_p^3 (f_p - f_F) \vec{g} \dots\dots\dots(21)$$

et

$$\vec{F}_F = G_n \pi R_p (\vec{V}_F - \frac{\vec{d}_r}{d_t}) \dots\dots\dots(22)$$

La trajectoire est décrite par fonction de forme générale :

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \frac{d\sqrt{a}}{dQ} = f\left(\frac{Vm}{Vt}, \frac{m_{sat}}{2H_0}, \sqrt{a}, Q\right). \dots\dots\dots(23)$$

Ou

$$Vm = 2 u_0 k M_{sat} \cdot H_0 \cdot R_p^2 / 9 n_a \dots\dots\dots(24)$$

Vitesse magnétique (m/s), M_{sat} = Aimantation à la saturation une résolution de telle équation par une solution du quatrième ordre de type Runge kutta permet de définir la trajectoire critique et le rayon de capture $R_{ca} \left(\frac{R_c}{a} \right) \dots\dots\dots(25)$

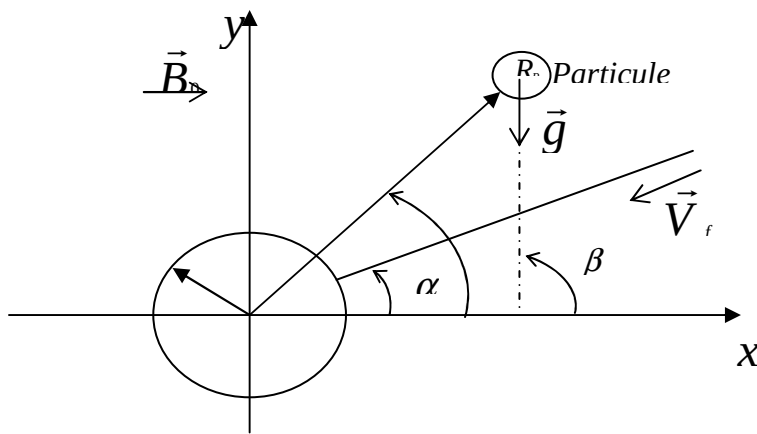


Figure II.5 Modèle de capture (fibre ferromagnétique) /5/

II.6 Séparation magnétique

II.6.1. *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 différences suivant les propriétés magnétiques présentées par le minerai à traiter.

II.6. 2 Classification des séparateurs :

II.6.2.1 *Introduction :*

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 : $\mu_0 \text{ grad } (H)$ 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 :

$$\mu_0 \text{ grad } (H^2) = 2 \times 10^4 \text{ à } 10^6 \text{ N/m}^3 \dots\dots\dots(26)$$

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

$$\mu_0 \text{ grad } (H^2) = 2 \times 10^7 \text{ à } 4 \times 10^9 \text{ N/m}^3 \dots\dots\dots(27)$$

- Les séparateurs à haut gradient et/ou ont haut champ (solénoïde) avec :

$$\mu_0 \text{ grad } (H^2) = 6 \times 10^{10} \text{ à } 10^{12} \text{ N/m}^3 \dots\dots\dots(28)$$

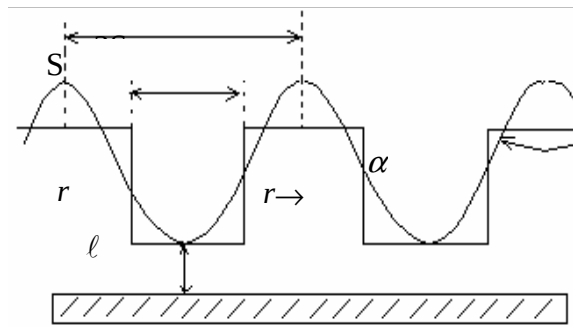
Pratiquement les séparateurs magnétiques à basse intensité ne peuvent convenir que pour les traitements (concentration ou épuration) de produits fortement magnétiques (ferromagnétiques ou ferrimagnétiques) alors que les particules faiblement magnétiques (paramagnétiques) ne peuvent être traitées (en fonction de leur taille) que par des séparateurs à haute intensité ou à haut gradient /1, 8/.

II.6.2.2 Séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI)

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 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....) /1/.



Pièce polaire

Figure II.6.1.2.2 Denture du rotor ou tambour /1/

Différents séparateurs ont plusieurs pas(s) :

- Les séparateurs à pas élevés (>50 mm) qui ont une intensité et une profondeur de champs magnétique plus élevés : ce type d'appareil est bien adapté aux opérations de préconcentration (stérile définitif) ou lorsque le produit à traiter est grossier.
- Les séparateurs à pas polaires faibles qui sont plus recommandés pour l'obtention de concentrés à forte teneur en eau pour le traitement de produit fins.

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

II.6.2.3 Séparateur de type Boxmag Rapide :

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 (*carrousel*) ne fait plus partie intégrante du circuit magnétique et peut être de construction plus légère, ce qui réduit légèrement la masse de l'appareil.

La matrice des séparateurs Boxmag Rapide constituée de barreaux inclinés en acier inoxydable ayant une section trapézoïdale et montée entre deux couronnes (carrousel) en acier inoxydable magnétique, ce qui permet d'assurer un gradient élevé, le passage des particules à travers plusieurs barreaux inclinés, donc plusieurs zones magnétisées et d'augmenter la durée de rinçage des produits magnétiques.

Ces appareils sont surtout caractérisés par 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, l'avantage de cette zéro aux points d'évacuation des produits magnétiques.

Ils développent un champ magnétique allant jusqu'à 1400KA/m, et une capacité de 5 à 160t/h avec un ou deux rotors.

Leur utilisation est comme les précédents, en plus de la concentration de tous les minerais paramagnétiques /4, 9/.

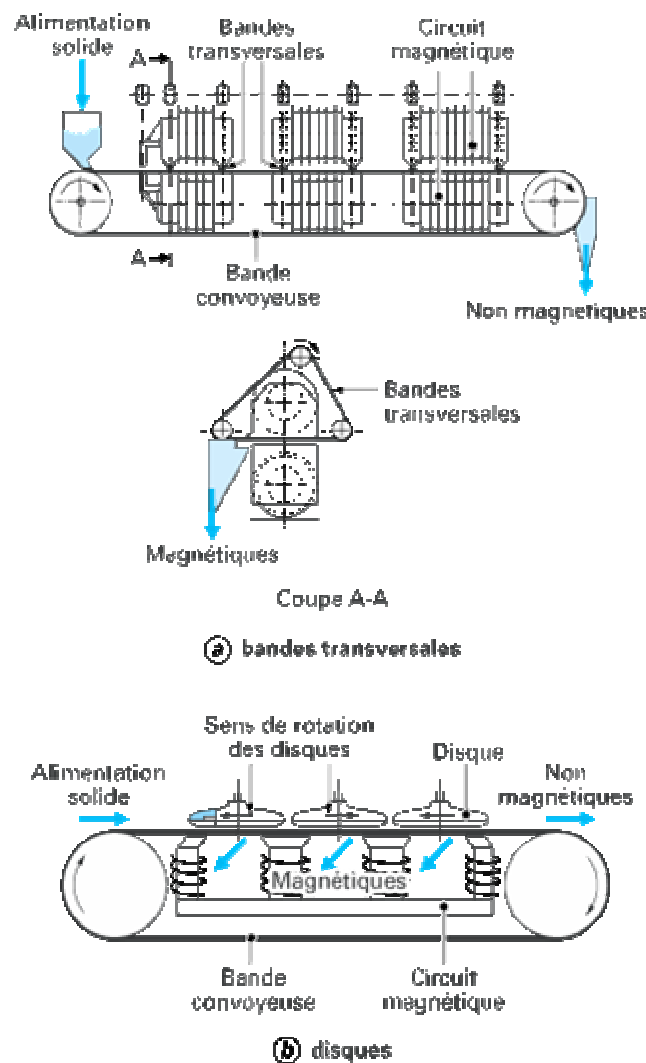


Figure II.6.2.3 séparateur à haute intensité en voie sèche / 4 /

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

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).

II.6.2.4 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.

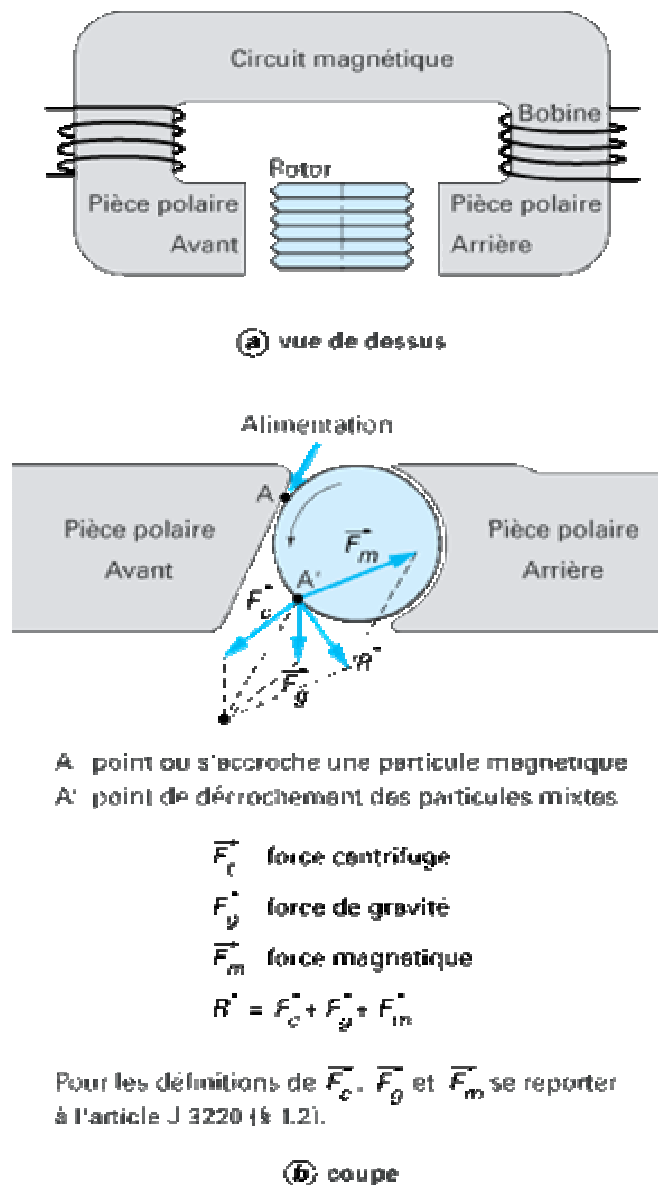


Figure II.6.2.4 séparateur à haute intensité en voie sèche à rotor induit /4/

La figure II.6.1.2.2 comporte un rotor denté tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique. Celui-ci comprend, dans sa conception de base, une culasse magnétique avec un noyau magnétique et une ou deux bobines d'électroaimant entourant ce dernier. Les pôles magnétiques ou pièces polaires, entre lesquelles tourne le rotor soumis à une induction magnétique, peuvent avoir diverses

formes (plan incliné ou vertical). La séparation a lieu dans l'intervalle (entrefer) réglable situé entre les pièces polaires avant et le rotor formant un contre pôle. Le rotor est constitué d'un assemblage de minces tôles en métal allié, isolées les unes des autres de manière à former des arêtes rectangulaires, triangulaires ou trapézoïdales, donc des nervures, 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 où elles sont décollées par une brosse. Les particules non magnétiques quittent le système sous l'action combinée de la force centrifuge et de la force de gravité. L'entrefer e et le pas de denture p sont adaptés à la granulométrie d du produit à traiter ($p = 2e \geq 4d$) /8,9/.

Ces séparateurs ont une grande souplesse de fonctionnement et sont donc susceptibles de traiter des produits de texture très différente dans des limites granulométriques importantes (de 15 mm à 50 μ m).

Ces appareils, relativement légers (de 2,5 à 12 t), peuvent développer des champs magnétiques allant de 400 à 1 600 KA/m avec une consommation énergétique comprise entre 1,0 et 2,5 kWh par tonne traitée (la moitié pour l'établissement du champ, l'autre moitié pour les moteurs d'entraînement) /8,9/.

Les appareils industriels fabriqués en Europe et aux États-Unis ont, en général, un diamètre variant de 150 à 300 mm et une largeur utile comprise entre 200 et 800 mm.

Le tableau II.6.2 donne les caractéristiques techniques, ainsi que des paramètres de concentration et les résultats comparatifs obtenus à partir d'un minerai de fer hématitique (45 % de fer) broyé à 500 μ m /7/.

Tableau II.6.2 : Caractéristiques des séparateurs pour l'hématite / 7 /

Séparateur	Jones P 71	Boxmag Rapid SHW 1	Reading 16-pôles	Krupp-Sol 24/14	Sala HGMS Mk II
Diamètre du carrousel (mm)	710	800	1 800	2 400	1 720
Capacité totale (t/h)	1,0 à 2,5	1,5 à 6,0	15 à 30	20 à 40	1 à 3
Pôles/zones de séparation	2/2	2/1	16/8	4	1
Type de matrice	Plaques dentées	Tiges trapézoïdales	Plaques rainurées	Plaques dentées	Métal expansé
Largeur de la matrice (mm)	75	25	66	180	120
Hauteur de la matrice (mm)	220	150	205	170	140
Champ maximal (T)	1,35	1,4	1,10	1,2	0,60
Vitesse périphérique du carrousel (m/s)	0,11	0,19	0,48	0,37	0,11
Dimension (m)	2 × 3 × 2	2 × 1,7 × 1,5	2,4 × 2,8 (h)	3,5 × 2,5 (h)	2 × 2 (h)
Masse (t)	7,1	3,8	7,1	10	6

II.7. CONCLUSION :

Comme son nom l'indique, la séparation magnétique utilise les propriétés magnétiques des matériaux. Elle peut se faire en voie sèche ou humide.

Cependant, pour qu'il y ait une force magnétique suffisamment importante pour dévier ou retenir une particule magnétique dans un système à champ magnétique fermé, il est nécessaire de développer un gradient de champ.

Si on continue à augmenter l'intensité du champ, le matériau va finir par être totalement aimanté, ses moments élémentaires étant tous alignés avec le champ. On a un état semblable à l'état mais les moments sont orientés en sens contraire car c'est un champ de sens contraire qui les a orientés.

Si on diminue l'intensité du champ, le matériau se désaimante peu à peu mais on ne revient pas sur nos pas : à nouveau non-réversibilité. Lorsqu'on applique un champ d'intensité égale à H_c mais opposé à l'aimantation acquise par le matériau on arrive à désaimanter totalement le matériau (position f). En continuant d'augmenter l'intensité du champ appliqué on réoriente les moments magnétiques du matériau et on arrive progressivement en b.

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 inter particules qui peuvent s'apparaîtraient, comme le phénomène électrostatique, l'action des toutes ces forces.

CHAPITRE III – TRAITEMENT DES MINERAIS DE FER

Le traitement par séparation magnétique à haute intensité (SMHI) aboutit à la séparation d'un concentré partiel titrant de 40,7% Fe, 7,1% de SiO₂ et 8% de CaO, avec un rendement en poids (par apport à la (SMHI) de 74%.

Les traitements des grenus par le grillage magnétisant sont suivis par la séparation magnétique à basse intensité, aboutit à la séparation d'un concentré partiel titrant de 45,5% de Fe, 8,5% de SiO₂ et de 10% de CaO, avec un rendement en poids (par apport à l'entrée au grillage magnétisant) de 90% x 47% (SMBI) = 42,5M.

Au total, le concentré final regroupe les fines de broyage : le concentré partiel de la SMHI, le concentré partiel de grillage magnétisant + SMBI) /11/.

III.1 Enrichissement des minerais hématite brune :

Après la préparation mécanique du minerai, le déschlammage des minerais (avant le jigage) s'effectue dans des spirales qui assurent l'augmentation de la fraction solide de 11% à 70%, et la diminution des fines de 30% à 14%.

Pour l'augmentation de la teneur en fer dans les concentrés, on procède au grillage, suivi par (SMBI), la fraction magnétique est rebroyée jusqu'à 55% en classe de 0,074 mm. Le concentré obtenu est de 58% à 60% de fer avec un degré d'extraction de 80% à 85% /11/.

III.2 Enrichissement des minerais de fer des quartzites oxydés :

Pour l'enrichissement des minerais de fer de ce type sus-cité, on applique en premier stade après le criblage, l'enrichissement par milieu dense, les concentrés de la suspension lourde et les refus du criblage passent au broyeur.

Le concentré du premier stade s'obtient par le criblage fin de la fraction magnétique de (grillage +SMBI), tandis que la fraction non magnétique sera traitée une troisième fois par la SMBI, la fraction magnétique de cette dernière passe au rebroyage puis une autre fois à la SMBI pour l'obtention du concentré final (concentré du deuxième stade) /11/.

III.3 Enrichissement du minerai de magnétite :

Le minerai principal est la magnétite, avec une faible teneur en fer de 30 à 32%. La réduction du tout-venant se passe par trois étages de concassage, pour l'obtention du concentré de premier stade on utilise la séparation magnétique à basse intensité à sec. La fraction non magnétique est épurée puis broyée pour passer à la séparation magnétique humide en deux étages pour avoir un concentré final (minerai brut :Fe32%, concentré :Fe=60% et les rejets :Fe=18%) /11/.

Dans le tableau III.3 sont représentées les valeurs de susceptibilités magnétiques des différents types de minerai de fer.

Tableau III.3 Caractéristiques techniques des principaux types de fer /11/

Minéraux	Formule chimique	Teneur en fer (%)	Susceptibilités magnétiques (m ³ /Kg10 ⁻⁶)
Hématite	Fe ₂ O ₃	70	0,5-3
goethite	Fe ₂ O ₃ H ₂ O	62,9	0,25
Hydrohématite	Fe ₂ O ₃ nH ₂ O	60	1-4
Hydrogoethite	3Fe ₂ O ₃ 3H ₂ O	62,9	1-4
Limonite	2Fe ₂ O ₃ 3H ₂ O	60	0,25-2,5
Magnétite	Fe ₃ O ₄	72,4	600-740
Martite	Fe ₂ O ₃	70	2-7
Sidérose	FeCO ₃	48,2	0,4-1,5
Maghémite	Fe ₂ O ₃	70	400
Magnomagnétite	(Fe, Mg)OFe ₂ O ₃	60	50
Silicate de fer	FeSiO ₃	40	0,2-1

III.4. Différents types de schémas traitement de minerai de fer :

Le traitement des différents types de minerais de fer dans le monde sont représentés à travers les schémas des figures : III.4.a, III.4.b, III.4.c, III.4.d. Ces schémas peuvent être associés à un autre procédé soit la séparation magnétique comme procédé principal.

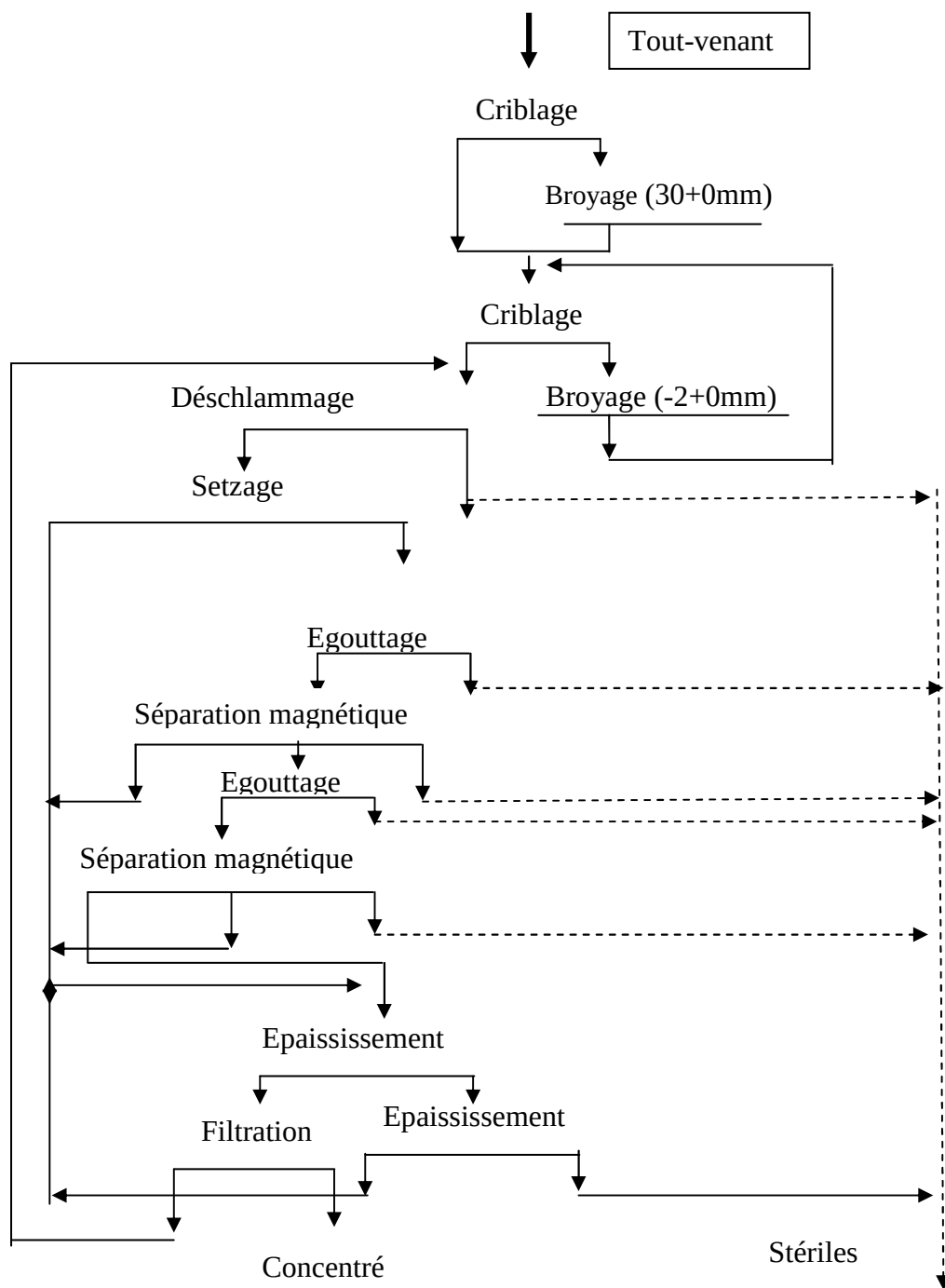
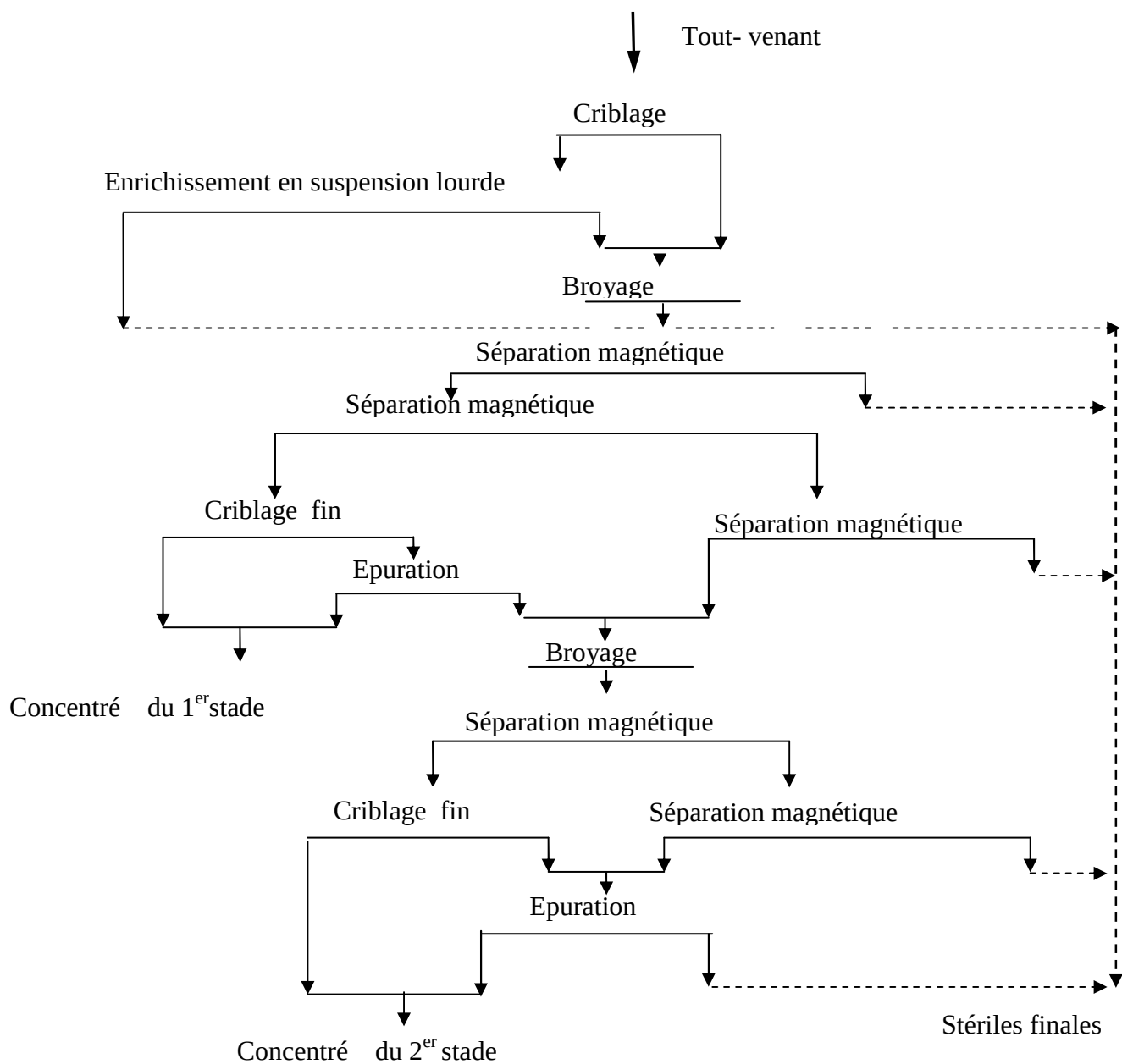


Figure III.4.a Schéma de traitement des minerais de fer (hématite brune) : RUSSIE



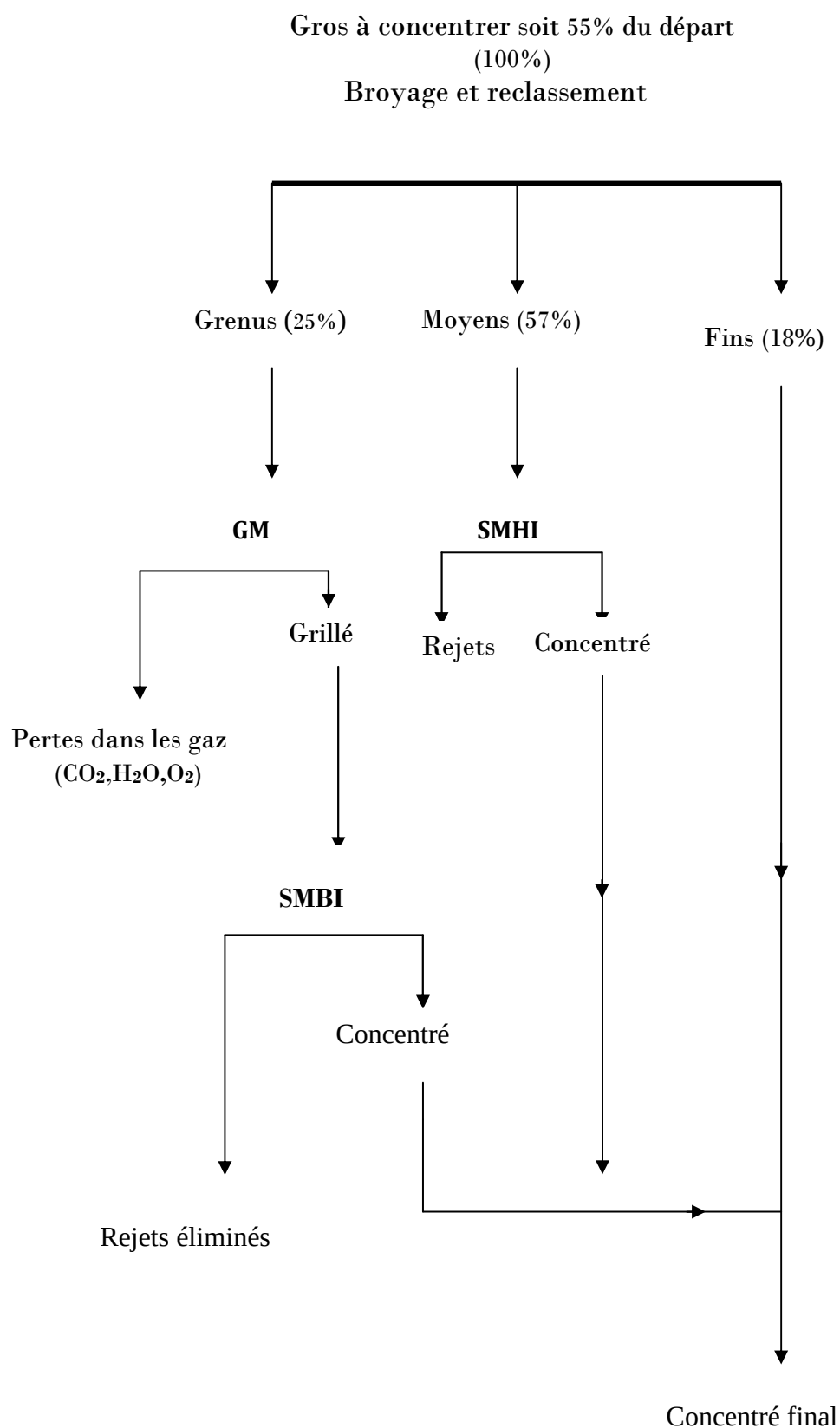


Figure III.4.c Schéma de traitement des minerais hématitiques : FRANCE

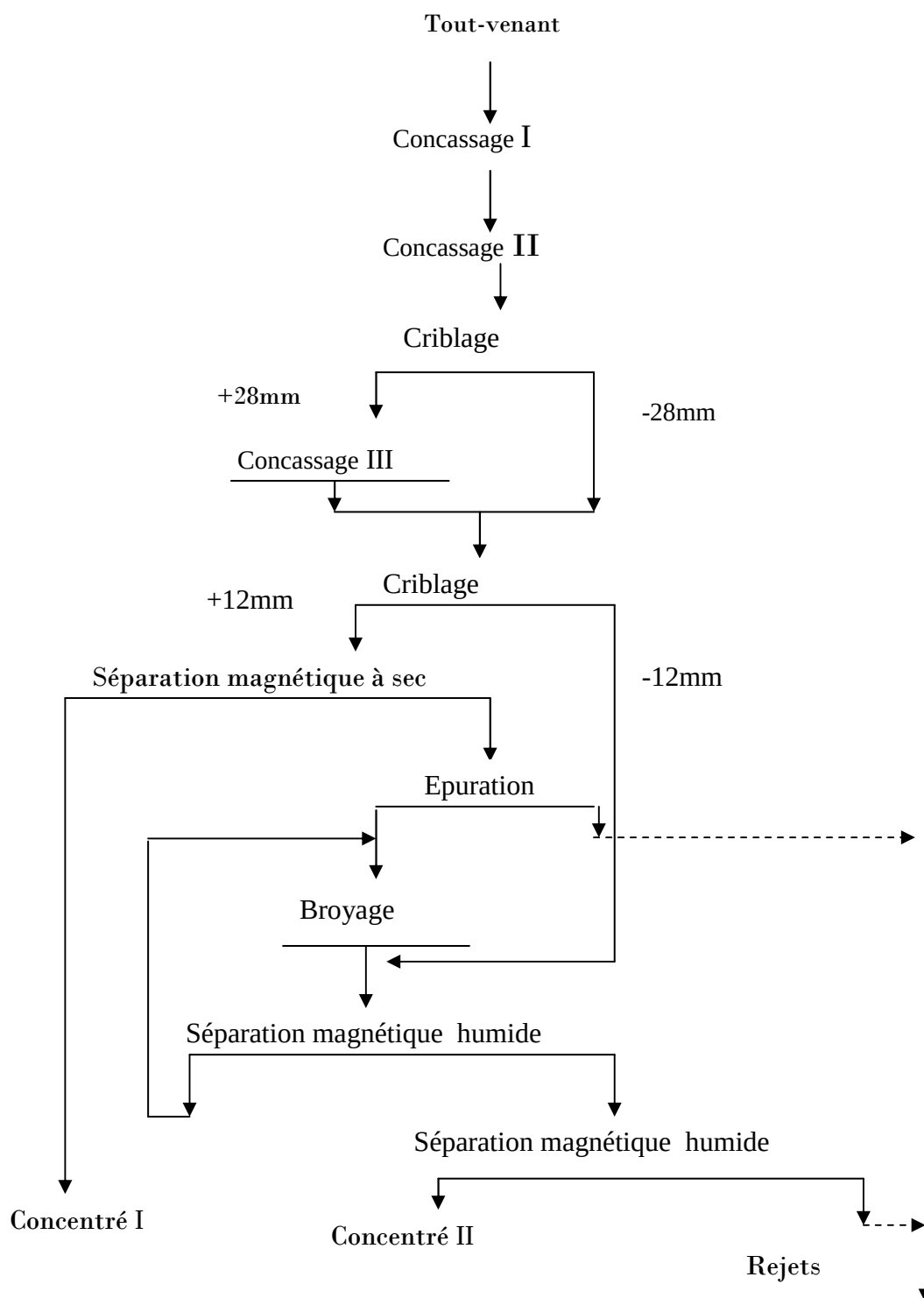


Figure III.4.d Schéma de traitement des minerais de magnétite RUSSIE

III.5. Flottation d'un minerai oxydé de fer

Une méthode de flottation combinée à une méthode de floculation sélective fut mise en œuvre au cours des années 1970. Elle consiste à effectuer une flottation inverse de la gangue et convient à des minerais de type taconite constitués, par exemple, de 30 % d'hématite (Fe_2O_3), de 15 % de goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$), de 5 % de magnétite (Fe_3O_4) et de 50 % de quartz (SiO_2).

Pour déprimer l'hématite à un pH supérieur à 6, en pratique nettement basique (9-11), on utilise des amidons. On flotte le quartz au moyen d'amines en laissant dans le produit non flotté les oxydes de fer. Pour le minerai de fer considéré, il est nécessaire de broyer à 40 mm pour avoir une libération convenable du fer.

Le minerai est successivement broyé dans un broyeur autogène primaire, puis dans un broyeur à galets, dont les corps broyants sont fournis par les morceaux de dimensions supérieures à 75 mm sortant du broyeur primaire. Les particules de dimensions inférieures à 2 mm sont envoyées dans des cyclones dont la sousverse alimente le broyeur à galets. Au cours du broyage, la pulpe est conditionnée avec les réactifs suivants : soude (pour amener le pH à 11) ,1000 g/t ; silicate et tripolyphosphate de sodium (dispersants du quartz), 400 et 100 g/t, respectivement.

On évite d'utiliser de la chaux parce que Ca^{2+} se fixe sur la surface du quartz, qui se trouve déprimé lors de la flottation par les amines. On ajoute à la surverse des cyclones couplés avec les broyeurs à galets, de l'amidon de maïs caustifié (traité à la soude) à raison de 100 g/t. Ce réactif joue le rôle de flocculant sélectif des particules d'oxyde de fer, qui sont récupérées à la pointe d'un épaisseur ; les ultrafines, constituées de 80 % de quartz, sont évacuées dans la surverse. Après dépression des oxydes de fer par de la dextrine, on flotte sélectivement le quartz dans les conditions données dans le tableau III.4.

Après quatre étapes d'épuisage, le flotté est floculé à la chaux et envoyé à la digue à stérile. Le non flotté (oxyde de fer) additionné d'un flocculant polymérique, est épaissi et filtré. L'eau des concentrés et de la surverse de l'épaississeur des oxydes de fer est recyclée.

Tableau III.5. Flottation sélective du quartz

Réactif	Point d'addition	Quantité, (g/t)
Dextrine	Conditionneur et 1 ^{er} épuisage	500
Mélange amine primaire-éther-amines	Entrée du circuit de dégrossissage	200
Polypropylène glycol (moussant)	Circuits de dégrossissage et de relavage	2

III.6. CONCLUSION :

Le traitement des différents types de minerais de fer peuvent être associés à un autre procédé soit la séparation magnétique comme procédé principal. Après la préparation mécanique du minerai, le déschlammage des minerais (avant le jigage) s'effectue dans des spirales qui assurent l'augmentation de la fraction solide de 11% à 70%, et la diminution des fines de 30% à 14%.

Pour l'augmentation de la teneur en fer dans les concentrés, on procède au grillage, suivi par (SMBI), la fraction magnétique est rebroyée jusqu'à 55% en classe de 0,074 mm. Le concentré obtenu est de 58% à 60% de fer avec un degré d'extraction de 80% à 85%.

Une méthode de flottation combinée à une méthode de floculation sélective fut mise en œuvre au cours des années 1970. Elle consiste à effectuer une flottation inverse de la gangue et convient à des minerais de type taconite constitués, par exemple, de 30 % d'hématite (Fe_2O_3), de 15 % de goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$), de 5 % de magnétite (Fe_3O_4) et de 50 % de quartz (SiO_2).

CHAPITRE IV – ESSAIS DE TRAITEMENT DU MINERAI DE FER DE SIDI MAAROUF

IV.1 Prélèvement d'échantillon

Les échantillons de fer étudiés proviennent du gisement de Sidi Maarouf. Le tout venant ayant des dimensions différentes subit un traitement mécanique préalable : un concassage jusqu'à 2mm, un broyage, une homogénéisation, quartage afin d'obtenir un échantillon représentatif et classement dimensionnel par tamisage et attrition. Voir figure IV.1. Ci-dessous.

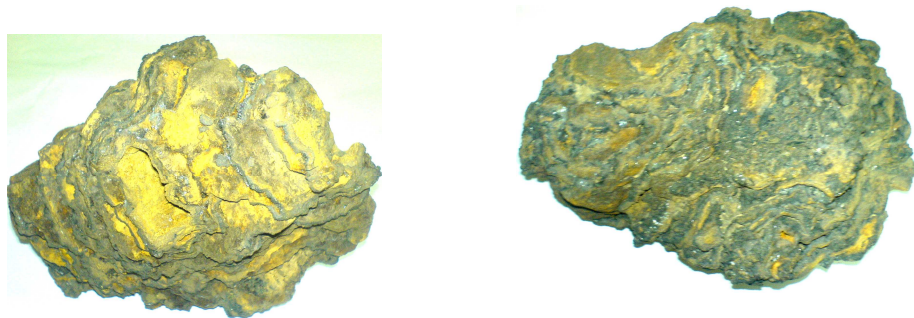


Figure IV.1 Échantillon représentatif du minerai de fer

IV.2 Préparation mécanique

IV.2.1 concassage

Le concassage des échantillons étudié est assuré par un concasseur à mâchoire type OMYPCKNN META (Figure.6), il permet de réduire les dimensions des grains jusqu'à une dimension de 2 mm.

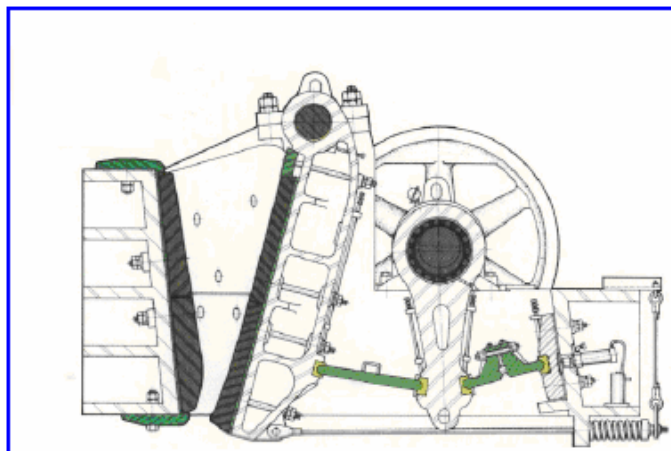


Figure IV.2.1 Concasseur à mâchoire

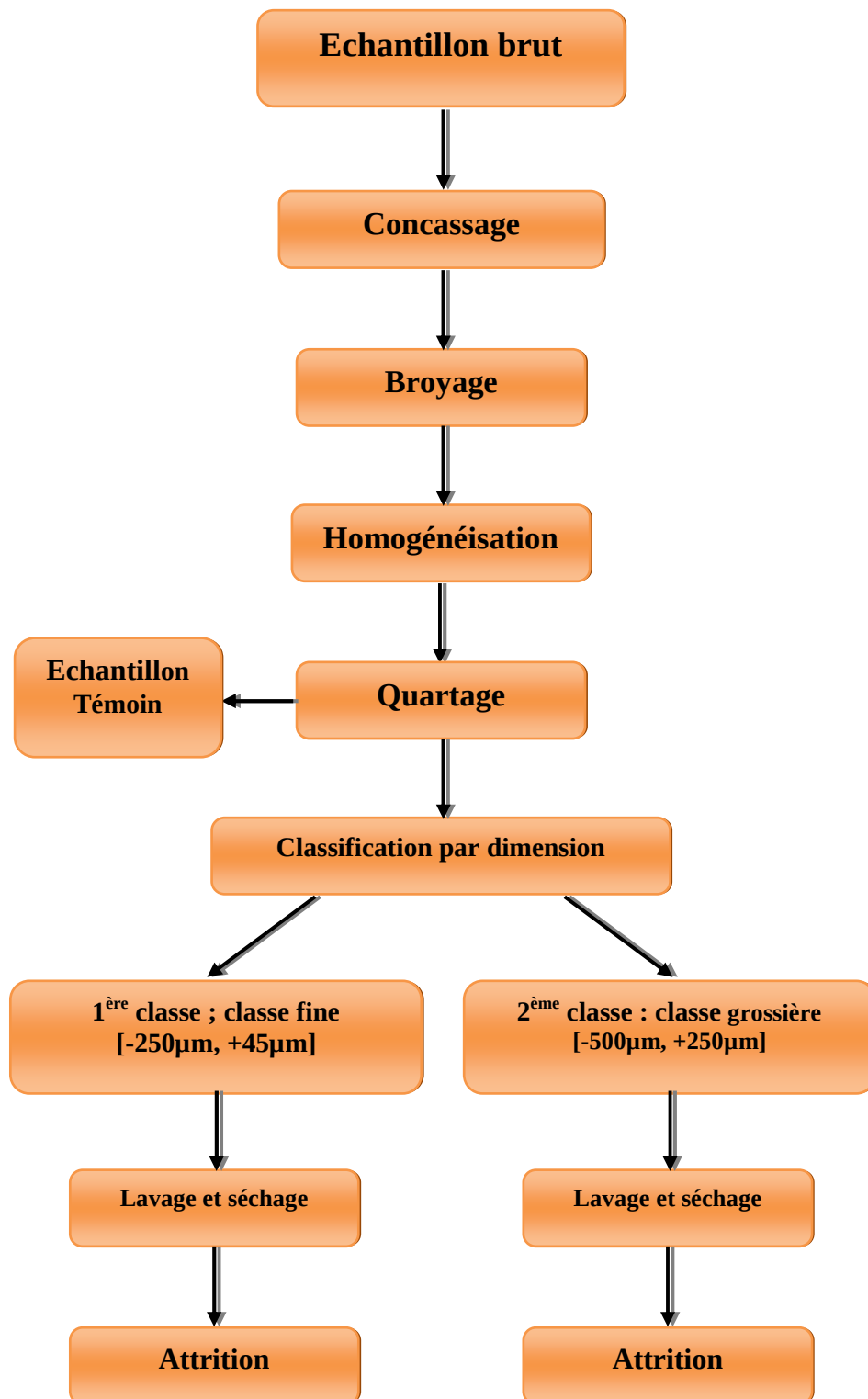


Figure IV.2 étapes de préparation du minerai de fer

I. Objectifs

- Réduction de la taille pour faciliter la manipulation
- Expositions de surface minérales (lixiviation)
- Étape intermédiaire dans broyage autogène

II. Modes d'opération

- À sec
- Une seule étape
- La durée : jusqu'à la vidange complète de la mâchoire

III. Description

- Deux plaques de métal en angle ($<25^\circ$)
- Mouvement va et vient d'une plaque sur pivot
- Matériel est écrasé et relâché successivement

IV. paramètres

- Course : déplacement extrême inférieur
- Réglage : ouverture maximale à la sortie
- Angle entre mâchoires : 25° (glissement vs capacité)
- Vitesse : 100 à 350 rpm
- Capacité : inférieure à 545 t/h

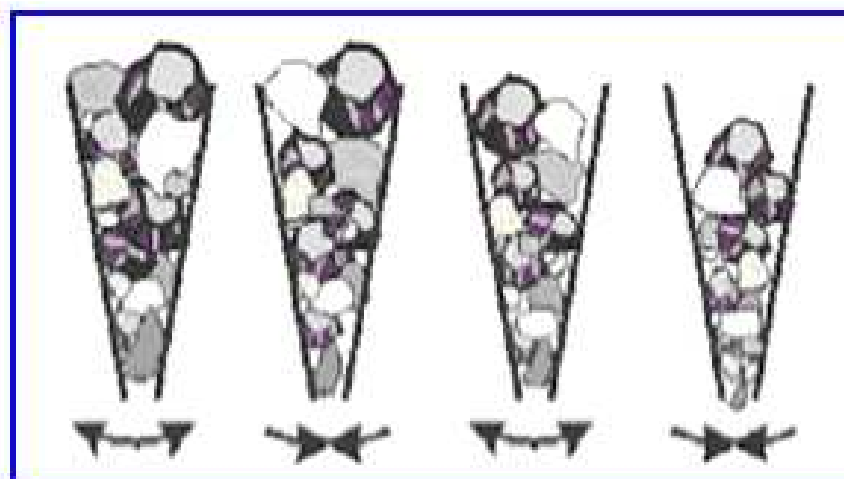


Figure IV.2.a. Mécanismes d'écrasement

IV.2.2 broyage

Le broyage est une opération consistant à diviser un solide, pour augmenter sa surface spécifique (surface développée de la poudre par unité de masse) et donc sa réactivité. Le broyage se fait jusqu'à la maille de libération. La maille de libération d'un minéral est la taille au dessous de laquelle une particule de minerai est parfaitement libérée, c'est-à-dire constituée uniquement de l'espèce minérale à valoriser, le broyeur utilisé est de type CAENAHOB CCCP NHB30Y2.

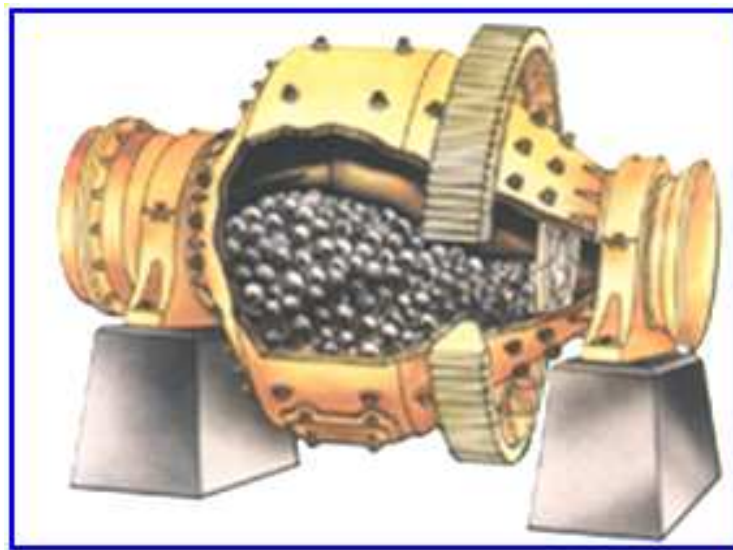


Figure IV.2.2 Broyeur à boulets

I Objectifs

- Réduction de la taille pour atteindre libération
- Exposition de surfaces minérales (magnétique)
- Étape intermédiaire dans la séparation

II Modes d'opération

- À sec
- Une seule étape
- En circuit fermé
- Durée : 10mn

IV.2.3 Quartage

C'est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon. Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à une

homogénéisation de minerais. Il consiste à constituer un cône régulier au moyen d'une pelle, qu'on transforme sous forme de galette plate de contour plus ou moins circulaire. Cette galette est ensuite partagée en quatre (04) quarts égaux. On prélève deux quarts opposés, alors que les deux autres seront gardés comme témoins. On recommence la même procédure de fractionnement jusqu'au dernier quartage. Le procédé de quartage obéit à la loi de RICHARDS définie comme suite :

$$Q_i \geq Kd^2$$

$$m \leq Q_i/Kd^2 \quad \text{avec}$$

$$O_r : m = 2^n$$

d : Diamètre moyen du grain

n : Nombre de quartage

K : Coefficient de répartition de la minéralisation

Q_i : Masse à quarter

m : Coefficient de réduction de la masse

Le choix de la valeur de K est basé sur des calculs statistiques relatifs au gisement. Dans notre cas, il est évalué à 0,1 (minéralisation irrégulière).



Figure IV.2.3 procédé de quartage

IV.2.4 Classement dimensionnel

Le classement dimensionnel est effectué par tamisage de type AS200 et numéro de série 2225040176. Il permet de séparer le matériau en fractions granulaires définies par la côte de la maille carrée de tamis. Avant l'opération de tamisage il est nécessaire de sécher les échantillons dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24h ; afin d'éviter le colmatage du matériau (eau d'humidité) sur les tamis utilisés.

Lors d'un essai de tamisage à sec conventionnel, la série de tamis sélectionnés (tamis 500µm, 250µm et 45µm) est empilée verticalement selon une taille des ouvertures de tamis qui décroît de haut en bas.

L'échantillon sec pesant entre 1200 et 1400 grammes est introduit sur le tamis du haut et le pile entier est soumise à un mouvement de secousses horizontales et verticales grâce à un appareil de tamisage. Les résultats sont présentés dans le tableau.1

L'analyse chimique par tranche granulométrique a montré que les fractions supérieures à $500\mu\text{m}$ et inférieures à $45\mu\text{m}$ (schlamms) constituent les rejets riches en matière siliceuses et dolomitiques. Par contre, la fraction $[-500\mu\text{m}, +40\mu\text{m}]$ est destinée à la flottation.

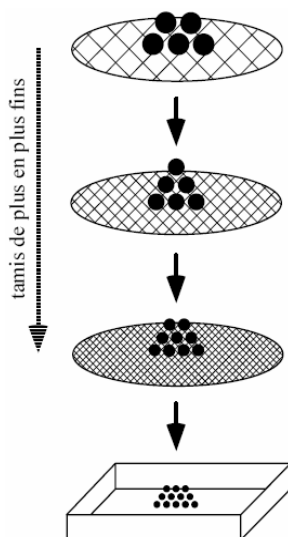


Figure IV.2.4.a Procédure simplifiée de tamisage à sec



Figure IV.2.4.b Tamiseuse de laboratoire type Retsch AS200 Basic

Tableau IV.2.4 Résultats de tamisage

Tranches granulométriques, mm	Poids, g	Rendement partiel, %	Rendement cumulé, $\Sigma\gamma$, %	Rendement cumulé, $\Sigma\gamma$, %
+ 4	90,60	22.65	22.65	100
- 4 + 2	74.55	18.64	41.29	77.35
- 2 + 1	59.30	14.82	56.11	58.71
- 1 + 0,5	46.70	11.67	67.78	43.89
- 0,5 + 0,25	56.45	14.11	81.89	32.22
+ 0,25 + 0,125	35.55	08.89	90.78	18.11
- 0,125 + 0,063	17.10	04.27	95.05	09.22
- 0,063 + 0,045	10.90	02.73	97.78	04.95
- 0,045 + 0	08.85	02.22	100.0	02.22
Total	400.0	100.0	-	-

Mode opératoire

- La durée : 20mn
- L'amplitude : 80 impulsions/mn

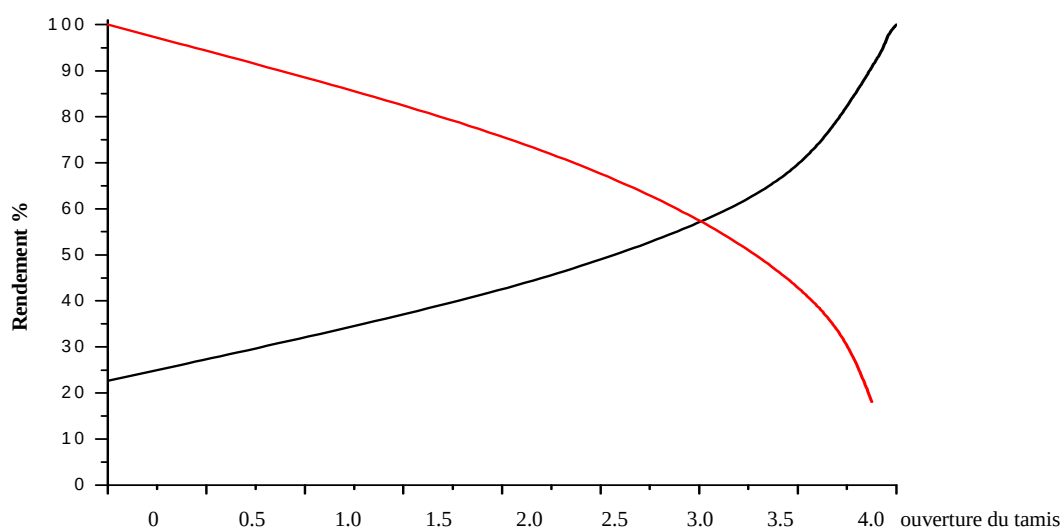


Figure IV.2.4 courbe granulométrique

IV.2.5 Lavage et séchage des échantillons

Dans un premier temps, un échantillon contenant entre 500 et 600 grammes de solides (pour chaque classe) est déposé sur les tamis 45 μm et 250 μm . Les particules fines qui ne sont pas retenues par le maillage du tamis sont lavées par un jet d'eau. Cette étape peut être effectuée à l'aide d'un montage fait sur place ou à l'aide d'un équipement spécialement conçu à cet effet (Figure : IV.2.5). Le mélange particules/eau est laissé à reposer pour une période d'au moins 2 heures puis l'excès d'eau est retiré par décantation.

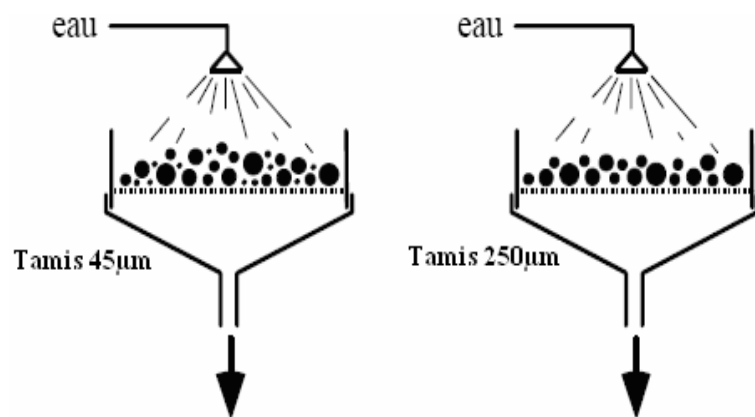


Figure IV.2.5 Lavage des échantillons

La portion de l'échantillon retenue sur le tamis est séchée au four (étuve) à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

IV.3. SEPARATION MAGNETIQUE A HAUTE INTENSITE

- Suite aux observations microscopiques, il a été constaté que la libération du composant utile commence à partir de la tranche granulométrique $- 2 + 1\text{mm}$. Donc les tranches soumises à la séparation magnétique se résument à trois tranches à savoir $-2+1\text{mm}$, $-1+0,5\text{mm}$ et $-0,5+0,25\text{mm}$ ainsi que le mélange de tranche $-1+0,25\text{mm}$.
- Les essais ont été réalisés au laboratoire de caractérisation et traitement du département des Mines sur le séparateur magnétique à haute intensité figure IV.3.a
- Le minerai de fer de Sidi Maarouf a été testé sur différentes intensités du courant de différentes tranches granulométriques, représenté dans les tableaux : IV.3.1, IV.3.2, IV.3.3, IV.3.4, IV.3.5.



Figure IV.3.a Vue générale du séparateur magnétique à haute intensité

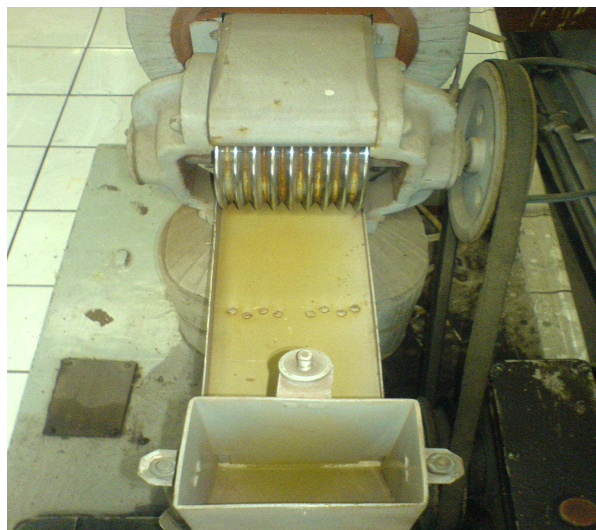


Figure IV.3.b Alimentateur du séparateur magnétique à haute intensité

Tableau IV.3.1 Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf $\alpha = 44,18\%$ Fe

Tranches granulométrique mm	Code	Intensité du courant électrique I, A	Fraction magnétique (Concentré) (g)	Fraction non-magnétique (g)	Rendement Concentré (%)	Teneur Concentré (Fe, %)	Récupération (%)
- 2 + 1	BSG1-1	1,0	58,80	41,20	7,00	-	-
	BSG1-3	3,0	59,50	40,50	61,00	-	-
	BSG1-5	5,0	63,20	36,80	63,20	56,88	81,36
- 2 + 1	BSG2-1	1,0	58,50	41,50	6,00	-	-
	BSG2-3	3,0	59,70	40,30	41,6	-	-
	BSG2-5	5,0	62,70	37,30	62,70	56,66	80,41
- 2 + 1	BSG3-1	1,0	57,80	42,20	5,60	-	-
	BSG3-3	3,0	59,50	40,50	58,60	-	-
	BSG3-5	5,0	62,90	37,10	62,90	56,78	80,83

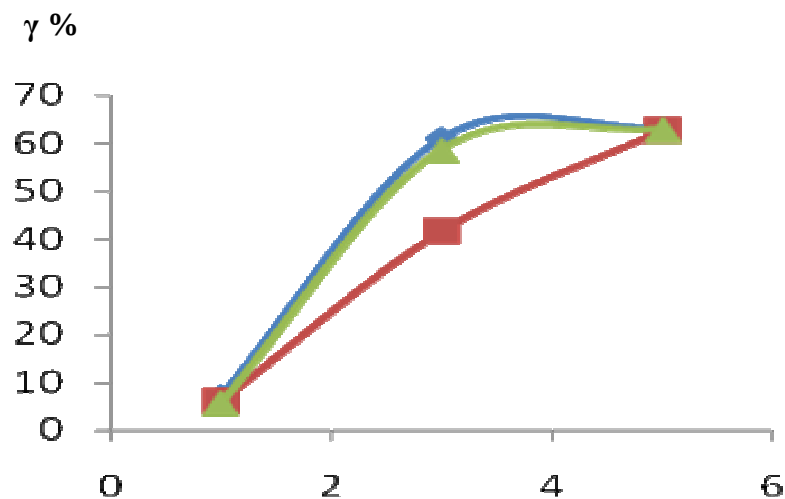


Figure IV.3.c représentation graphique après séparation magnétique des tranches granulométriques - 2 + 1 mm

Tableau IV.3.2 Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf $\alpha = 44,18\%$ Fe

Tranches granulométrique mm	Code	Intensité du courant électrique I, A	Fraction magnétique (Concentré) (g)	Fraction non-magnétique (g)	Rendement Concentré γ (%)	Teneur Concentré (Fe, %)	Récupération (%)
- 1 + 0,5	BSM1-1	1,0	58,8	41,2	58,8	-	-
	BSM1-3	3,0	63,5	36,5	63,5	-	-
	BSM1-5	5,0	68,0	32,0	68,0	56,80	87,42
- 1 + 0,5	BSM2-1	1,0	57,10	42,9	57,10	-	-
	BSM2-3	3,0	64,70	35,3	64,70	-	-
	BSM2-5	5,0	69,0	31,0	69,0	57,10	89,17
- 1 + 0,5	BSM3-1	1,0	59,0	41,0	59,0	-	-
	BSM3-3	3,0	67,7	32,3	67,7	-	-
	BSM3-5	5,0	70,0	30,0	70,00	56,90	90,15

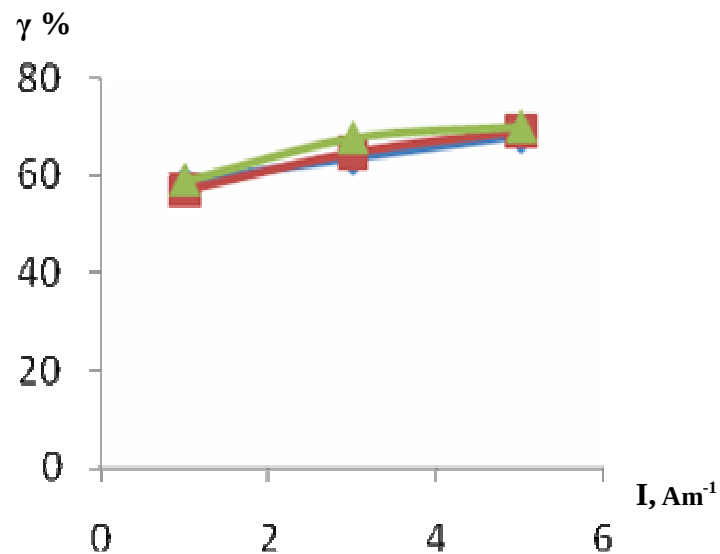


Figure IV.3.d représentation graphique après séparation magnétique des tranches granulométriques - 1 + 0,5 mm

Tableau IV.3.3 Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf $\alpha = 44,18\%$ Fe

Tranches granulométrique mm	Code	Intensité du courant électrique I, A	Fraction magnétique (Concentré) (g)	Fraction non-magnétique (g)	Rendement Concentré γ_c (%)	Teneur Concentré (Fe, %)	Récupération (%)
- 0,5 + 0,25	BSF1-1	1,0	54,60	45,40	54,60	-	-
	BSF1-3	3,0	63,10	36,90	63,10	-	-
	BSF1-5	5,0	70,70	29,30	70,70	57,60	92,17
- 0,5 + 0,25	BSF2-1	1,0	53,70	46,30	53,70	-	-
	BSF2-3	3,0	65,76	34,24	65,76	-	-
	BSF2-5	5,0	72,90	27,10	72,90	57,84	95,43
- 0,5 + 0,25	BSF3-1	1,0	52,90	47,10	91,35	-	-
	BSF3-3	3,0	62,90	37,10	94,35	-	-
	BSF3-5	5,0	69,90	30,10	69,90	57,75	91,36

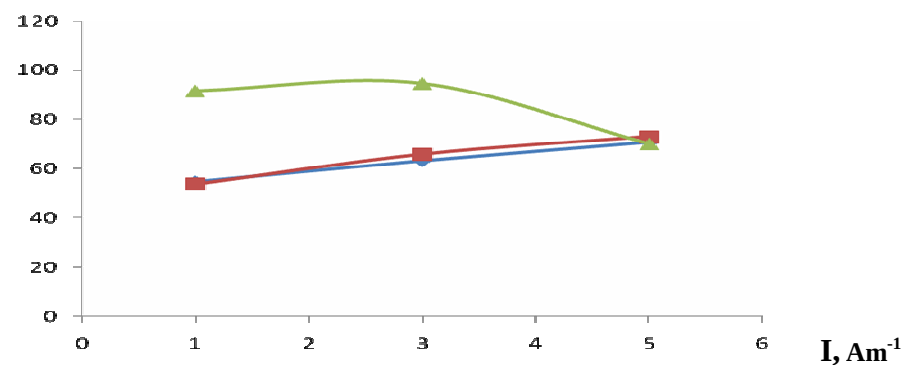


Figure IV.3.e représentation graphique après séparation magnétique des tranches granulométriques - 0,5 + 0,25mm

**Tableau IV.3.4 Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf P éch. = 100g
 $\alpha = 44,18\%$ Fe**

Tranches granulométrique mm	Code	Intensité du courant électrique I, A	Fraction magnétique (Concentré) (g)	Fraction non-magnétique (g)	Rendement Concentré γ (%)	Teneur Concentré (Fe, %)	Récupération (%)
-1+0.25	BS2F	03	62,7	37,3	62,7	-	-
-1+0.25	M	05	72,0	28,0	72,0	57,16	93,19

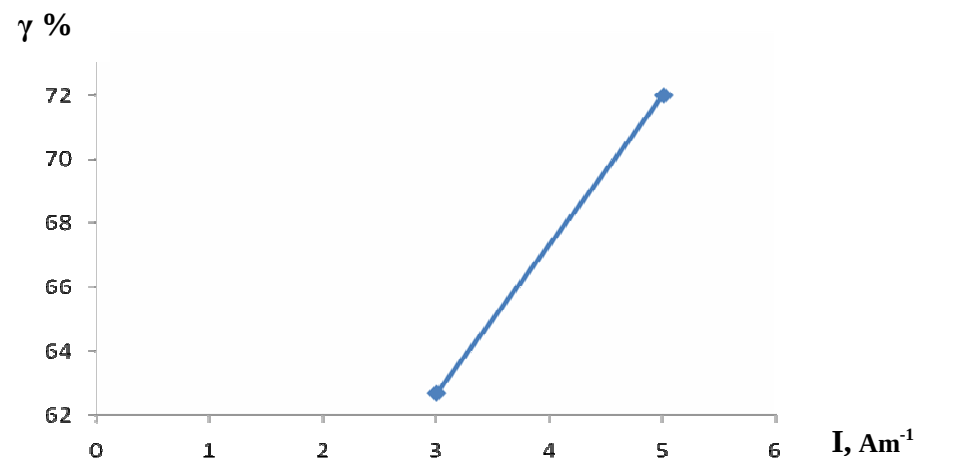


Figure IV.3.f représentation graphique après séparation magnétique des tranches granulométriques - 1+ 0,25 mm

Tableau IV.3.5 Résultats d'essai de séparation magnétique à haute intensité des minerais de fer de Sidi Maârouf Température de chauffage : 100°C α = 44,18 % Fe

Tranches granulométrique mm	Code	Intensité du courant électrique I, A	Fraction magnétique (Concentré) (g)	Fraction non-magnétique (g)	Rendement Concentré γ (%)	Teneur Concentré (Fe, %)	Récupération (%)
-1+0.25	BS2C	05	65,0	25,0	72,22	57,24	93,56

RESULTATS ET DISCUSSION

D'après les résultats de séparation magnétique à haute intensité (SMHI) obtenus, on a constaté ce qui suit :

- le minerai de Sidi Maârouf testé sur diverses fractions granulométriques et différentes intensités de courant a donné les résultats ci-dessus :
- Pour la tranche granulométrique (- 2 + 1) mm et des intensités de courants $I = 2, 3$ et 5 Ampères. Pour les trois essais réalisés, la teneur maximale en fer est 56,88% et le taux de récupération médiocre 81,36%($I = 5A$).Donc on peut dire que les résultats n'ont pas été satisfaisants, cela prouve que la maille de libération du fer n'est pas atteinte.
- Pour la tranche granulométrique (- 1 + 0,5) mm et des intensités différentes $I = 2, 3$ et 5 Ampères. Pour les trois essais réalisés, la teneur maximale en fer est augmentée à 57,10% et le taux de récupération reste médiocre 89,17% ($I = 5A$). Donc on peut dire que les résultats n'ont pas été satisfaisants.
- Pour la tranche granulométrique (- 0,5 + 0,25) mm et des intensités différentes $I = 2, 3$ et 5 Ampères. Pour les trois essais réalisés, la teneur maximale en fer est augmentée à 57,84% et le taux de récupération est très significatif 95,43% ($I = 5A$). Donc on peut dire que les résultats sont très satisfaisants.
- D'autres essais sur le minerai de fer de Sidi Maârouf ont été effectués sur des tranches granulométriques étirées tels (- 1 + 0,25) mm avec une intensité de courant de 5 Ampères dans des conditions atmosphériques ambiantes et chauffé à une température de 100°C. Les résultats enregistrés sont satisfaisants du point de vue teneur en fer 57,16% et 57,24%, la récupération est respectivement 93,19% et 93,56%.

CONCLUSION GENERALE :

- Les études géologiques antérieures ainsi que nos recherches ne peuvent pas apporter des preuves directes sur l'existence des accumulations des oolites ferrugineuses. Les principaux phénomènes qui ont subis les formations calcaireuses sont la brichification, la cristallisation, la dolomitisation partielle et la minéralisation en oxyde de fer, barytine, sulfure. La constitution minéralogique et chimique de fer de Sidi Maarouf comporte des variations sensibles entre les types morphologiques.

- la séparation magnétique utilise les propriétés magnétiques des matériaux. Elle peut se faire en voie sèche ou humide. Cependant, pour qu'il y ait une force magnétique suffisamment importante pour dévier ou retenir une particule magnétique dans un système à champ magnétique fermé, il est nécessaire de développer un gradient de champ.

- Le traitement des différents types de minerais de fer peuvent être associés à un autre procédé soit la séparation magnétique comme procédé principal. Après la préparation mécanique du minerai, le déschlammage des minerais (avant le jigage) s'effectue dans des spirales qui assurent l'augmentation de la fraction solide de 11% à 70%, et la diminution des fines de 30% à 14%.

Une méthode de flottation combinée à une méthode de floculation sélective fut mise en œuvre au cours des années 1970. Elle consiste à effectuer une flottation inverse de la gangue et convient à des minerais de type taconite constitués, par exemple, de 30 % d'hématite (Fe_2O_3), de 15 % de goéthite ($\text{Fe}_2\text{O}_3, n \text{ H}_2\text{O}$), de 5 % de magnétite (Fe_3O_4) et de 50 % de quartz (SiO_2).

- le minerai de Sidi Maârouf testé sur diverses fractions granulométriques et différentes intensités de courant a donné les résultats très satisfaisants. Pour la tranche granulométrique (- 0,5 + 0,25) mm et des intensités différentes $I = 2, 3$ et 5 Ampères. Pour les trois essais réalisés, la teneur maximale en fer est augmentée à 57,84% et le taux de récupération est très significatif 95,43% ($I = 5\text{A}$).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES

- [1] GILLET (G.). - La séparation magnétique sous champs intenses en minéralurgie : Les systèmes cryo-électriques. *Thèse de Doctorat d'État, INPL, Nancy, oct. 1988.*
- [2] GILLET (G.), DIOT (F.), NAVA (E.). - Optimisation d'un filtre magnétique, modèle général de capture. *Mines et Carrières, Les Techniques, I-II/96, 1996.*
- [3] NAVA (E.). - Modèle de piégeage de particules ultrafines sous champs magnétiques intenses. Application à l'épuration de fluide. *Doctorat INPL, oct. 1996.*
- [4] NAVA (E.), MAILFERT (A.), GILLET (G.), COLTEU (A.). - Modélisation d'un séparateur magnétique HGMS. *Mines et Carrières, Les Techniques, I-II/96, 1996.*
- [5] SIDO (N.N.). - Étude d'un modèle de séparation magnétique : analyse des phénomènes de capture et de percolation magnétique. *Doctorat INPL, soutenu le 1/07/2002.*
- [6] VINCENT-VIRY (O.), MAILFERT (A.), GILLET (G.). - Magnetic percolation phenomenon in high field – high gradient separators (HGMS). Le phénomène de percolation magnétique sur les séparateurs à haut champs – haut gradient (HGMS). *IEEE Transaction on Magnetic. Vol. MAG-36, N° 6, Nov. 2000.*
- [7] FORSSBERG (K. S. E.) et KOSTKEVICIUS (N. R.). - Comparative pilot scale tests with wet high intensity magnetic separators. *Erzmetal 35 n 6, 1982, p. 285-293.*
- [8] CASTEEL (K.). - Magnetic separation. States of flux. *Word Mining Equipement, Partie I, 01/02-2001, p. 22-24, Partie II, 03/2002, p. 46-48.*
- [9] GILLET (G.) et DIOT (F.). - Technologie de la séparation magnétique. *Memento des Mines et Carrières, 1998. Société de l'Industrie Minérale, p. 409-432.*
- [10] GILLET (G.), DIOT (F.), JOUSSEMET (R.), LENOIR (M.) et POLO (V.). - Application des séparations magnétique et électrique aux déchets solides et aux effluents liquides. *Les Techniques de l'Industrie Minérale, n 6, juin 2000, p. 61-84.*
- [11] SVOBODA (J.). - Magnetic Methods for the treatment of minerals. *Developments in Mineral Processing, Vol. 8, Elsevier 1987, 692 p.*
- [12] WEISS (N. L.). - SME Mineral Processing Handbook. *Society of Mining Engineers of AIME, New York, 1985.*
- [13] Y.Cudennec, A. Lecerf, C.R.Acad.Sci.Paris, Chimie 4 (2001) 885-891.
- [14] J.B.Parise, W.G.Marshall, R.I.Smith, H.D.Lutz, H.Möller, Amer. Mineral., 85 (2000) 189-193.
- [15] J.M.R. Génin, C. Ruby, Solid State Sciences, 6 (2004) 705-718.
- [16] Y.Cudennec, A.Lecerf, C.R.Chimie 6 (2003) 437- 444
- [17] A.P. Zhukhlistov, Crystallogr. Rep. 46 (5) (2001) 730–733.
- [18] R.M. Cornell, U. Schwertmann, 1996, The iron oxides structure, properties, reactions, occurrences and uses, V.C.H., Weinheim.
- [19] E. Jansen, A. Kyek, W. Schäfer, U. Schwertmann, Appl. Phys. A74 (2002) pp.1004-1006.
- [20] L. Pauling, S.B. Hendricks, J. Amer. Chem. Soc. 47 (1925) 781–790.
- [21] R.L. Blake, T. Zoltai, R.E. Hessevick, L.W. Finger, U.S. Dept. of Interior, Bureau of Mines, 1970, pp. 1–20.

- [22] Y. Cudennec, A. Lecerf, *Solid State Sciences*, 7 (2005), pp.520-529
- [23] Y. Cudennec, A. Lecerf, *J.Solid State Chem.*, 179(3) (2006), pp.716-722
- [24] J.E. Post and V.F. Buchwald, *Amer. Mineralogist*, 76 (1991) pp.272-277.
- [25] Trolard F., Abdelmoula M., Bourrié G., Humbert B., Génin J.-M. R. (1996) Mise en évidence d'un constituant de type «rouilles vertes» dans les sols hydromorphes. Proposition de l'existence d'un nouveau minéral: la «fougérite». *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes*, ISSN 1251-8050, vol. 323, no12, pp. 1015-1022.
- [26] Feeder, F.; Trolard, F.; Klingelhofer, G.; Bourrie, G. (2005) In situ Mossbauer spectroscopy: Evidence for green rust (fougerite) in a gleysol and its mineralogical transformations with time and depth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 69, iss. 18, p. 4463-4483.
- [27] Y.Cudennec, A. Lecerf, *C.R.Acad.Sci.Paris, Chimie* 4 (2001) 885-891. J.B.Parise, W.G.Marshall, R.I.Smith, H.D.Lutz, H.Möller, *Amer. Mineral.*, 85 (2000) 189-193.
- [28] Trolard, F.; Génin, J.-M. R.; Abdelmoula, M.; Bourrié, G.; Humbert, B.; Herbillon, A. (1997) Identification of a green rust mineral in a reductomorphic soil by Mossbauer and Raman spectroscopies, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 61, p. 1107-1111.
- [29] Y.Cudennec, A.Lecerf, *C.R.Chimie* 6 (2003) 437-444
- [30] A.P. Zhukhlistov, *Crystallogr. Rep.* 46 (5) (2001) 730–733.
- [31] R.M. Cornell, U. Schwertmann, 1996, *The iron oxides structure, properties, reactions, occurrences and uses*, V.C.H., Weinheim.
- [32] E. Jansen, A. Kyek, W. Schäfer, U. Schwertmann, *Appl. Phys.* A74 (2002) pp.1004-1006.
- [33] Marc Michel, Lars Ehm, Sytle M. Antao, Peter L. Lee, Peter J. Chupas, Gang Liu, Daniel R. Strongin, Martin A. A. Schoonen, Brian L. Phillips, John B. Paris, *Science* 316(5832) (2007) pp.1726-1729.
- [34] L. Pauling, S.B. Hendricks, *J. Amer. Chem. Soc.* 47 (1925) 781–790.
- [35] R.L. Blake, T. Zoltai, R.E. Hessevick, L.W. Finger, U.S. Dept. of Interior, Bureau of Mines, 1970, pp. 1–20.
- [36] Y. Cudennec, A. Lecerf, *Solid State Sciences*, 7 (2005), pp.520-529
- [37] Y. Cudennec, A. Lecerf, *J.Solid State Chem.*, 179(3) (2006), pp.716-722.
- [38] J.E. Post and V.F. Buchwald, *Amer. Mineralogist*, 76 (1991) pp.272-277.
- [39] Blondel F. Marvier L (1952)
Symposion sur les gisements de fer du monde (Algérie).
- [40] Boulot (1937) Rapport sur les gisements de sidi Maarouf –services des mines, Constantine
- [41] Brives A. (1918) Contribution à l'étude des gites métallifères de l'Algérie.
- [42] Butler B.S (1969)
Some inter-relations of structure mineralogy and association with intrusive bodies in ore deposits.
- [43] CONSTANTINESCU L. et COL. (1964). *Prospectiuni géofizice (methode cipurilor Natural)*.

- [44] DELGA MICHAEL DURAND. (1955). Etude géologique de l'ouest de la chaîne numidique «Bull. du service de la carte géologique de l'Algérie» stratigraphie-descriptions régionale n° 24.
- [45] CHERMAN F. (1953). Le rôle actif et passif du Trias gypsosalin et minéralisé dans la genèse de gîtes métallifères des terrains secondaires et tertiaires de la Kabylie des Babors (Algérie).
- [46] DURON R. (1968). Géologie de l'Afrique.
- [47] BITULESCU T.P et COL. (1971). Economie geologica miniera.
- [48] GURAN, DOINA BUTUCESCU (1972). Zacaminte si tendinte actuala în valorificarea minereului sarace.
- [49] INDUSTRIALEXPORT – ROMANIE (1968). Mines de fer –Algérie –étude.
- [50] HUNT ET AL, 1995 ; ROBERTS ET AL, 1995 ; DEKKER ET SCHOONEN 1996, Propriétés magnétiques des minéraux ferromagnétiques.
- [51] RESSOURCES NATURELLES CANADA ; geological Survey des États-Unis, examen de 2006, minerai de fer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CONSULTEES

- [52] Association française pour l'étude des eaux. Analyse des boues, Tome N°1 Généralités et Analyses physique. Paris; 1985.
- [53] Barrow, G. M. Physical chemistry. 5^{ème} ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1988; p. 859.
- [54] Bergeron, M.; St-Laurent, H.; Blackburn, D., et Gosselin, A. Développement d'un procédé de traitement de sédiments contaminés par utilisation de technologies minéralurgique. Section du développement technologique, Direction de la protection de l'environnement, Environnement Canada; 1997; Rapport présenté par l'INRS-Géoressources et le Centre de Recherches Minérales à Verreault Navigation et Environnement Canada.
- [55] Blazy, P. La valorisation des minerais. Paris: Presses Universitaires de France; 1970; p. 416.
- [56] Boivin, A. Répertoire des méthodes d'analyse en usage dans la division fluorescence X. Sainte-Foy, Québec: Centre de recherches minérales, Ministère des ressources naturelles; 1989.
- [57] Burt, R. O. Gravity Concentration Technology. Fuerstenau, D. W. Developments in Mineral Processing - Volume 5. Amsterdam: Elsevier Science Publishers; 1984; p. 605.
- [58] Centre St-Laurent. Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés. Document rédigé par Jean-René Michaud, Direction du développement technologique; 1994; N° de catalogue : En40-450/1993F.
- [59] Conseil canadien des ministres de l'environnement. Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés, Volume I: Rapport principal. 1993; Rapport CCME EPC-NCS62F.

- [60] Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés, Volume II: Sommaires des méthodes d'analyse. 1993; CCME EPC-NCS66F.
- [61] Coulson, J. M. et Richardson, J. F. Chemical Engineering, Volume 2: Particle Technology and Separation Process. 4^{ème} édition ed. Oxford: Pergamon Press; 1991; p. 968.
- [62] De Blois, C. Méthodes d'analyse de diverses substances minérales, Tome 4: Analyse par volumétrie, gravimétrie, spectrophotométrie UV-visible et infrarouge et chromatographie ionique et gazeuse. Sainte-Foy, Québec: Centre de recherches minérales, Ministère de l'Énergie et de Ressources; 1992.
- [63] Degremont. Memento Technique de l'eau, Tome 1 et 2. 1989.
- [64] Environnement Canada. Document d'orientation sur le prélèvement et la préparation de Sédiments en vue de leur caractérisation physicochimique et d'essais biologiques. 1994; Rapport SPE 1/RM/29.
- [65] Environnement Canada et Centre St-Laurent. Guide Méthodologique de Caractérisation des Sédiments. Ministre des Approvisionnements et Services Canada; 1992; de catalogue EN40-412/1991F.
- [66] Gagné, R. Méthodes d'analyse de diverses substances minérales, Tome 1: Analyses par Spectrophotométrie d'adsorption atomique et spectrométrie d'émission atomique au plasma et Fluorométrie. Sainte-Foy, Québec: Centre de recherches minérales, Ministère des ressources Naturelles; 1990.
- [67] Gill, C. B. Materials Beneficiation. New York: Springer-Verlag; 1991; p. 245.
- [68] Hurlbut, C. S. et Klein, C. Manual of mineralogy. 19^{ième} ed. New York: John Wiley & sons, Inc.; 1977; p. 549.
- [69] Jones, M. H. et Woodcock, J. T. Principles of Mineral Flotation. Victoria, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 1984; p. 320.
- [70] Keith, L. H. Environmental Sampling and Analysis: A Practical Guide. Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc.; 1991; p. 143.
- [71] Kelly, E. G. et Spottiswood, D. J. Introduction to Mineral Processing. New York: John Wiley & Sons; 1982; p. 479.
- [72] Kirk, R. E. et Othmer, D. F. Tar Sands. Encyclopedia of Chemical Technology. 3^{ème} édition ed. New York: John Wiley & Sons; 1983; pp. 601-627.
- [73] Knelson, B. The Knelson Concentrator: Metamorphosis From Crude Beginning to Sophisticated World Wide Acceptance. Minerals Engineering. 1992; 5(10-12):1091-1097.
- [74] Kröning, H. Separation and dewatering of silt from the port of Hamburg. Aufbereitungs-Technik Mineral Processing. 1990 ; 31(4):205-214.
- [75] Ministère de l'environnement. Procédure d'évaluation des caractéristiques des déchets solides et des boues pompables. Ministère de l'environnement, Direction des laboratoires ; 1985; p. 29.
- [76] Ministère de l'environnement et de la faune. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales - Cahier 1: Généralités. Ste-Foy: Les éditions le Griffon d'argile 1994.

- [75] Problématique des sols et des eaux souterraines contaminés par des produits pétroliers: sélection des paramètres analytiques. Sainte-Foy, Québec: Publications du Québec; 1995.
- [76] Conservation et analyse des échantillons d'eau et de sol: guide des méthodes. Sainte-Foy, Québec : Publication du Québec; 1996.
- [77] Plumpton, A. J. Le CRM à l'avant-garde en matière de concentration gravimétrique. CRM En Bref, Bulletin D'Information Du Centre De Recherche Minérale. 1996; Juin: 1-4.