



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة العربي التبسي - تبسة  
Université Larbi Tebessi - Tébessa  
معهد المناجم  
Institut des Mines  
قسم الإلكتروميكانيك  
Département Electromécanique



## *MEMOIRE*

*Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master*

*Filière : Génie Minier*

*Option : Electromécanique Minière*

# **Impact du choix du moteur du concasseur de la mine de Boukhadra**

**Par**

**DJELLAB Rodouane**

**Devant le jury :**

Mr. KARA Mohamed	Pr	Président	Université Larbi TebessiTébessa
Mr. RECHACH Abdelkrim	MAA	Encadreur	Université Larbi TebessiTébessa
Mr. MOGHRANI Redwane	MAA	Examineur	Université Larbi TebessiTébessa

*Promotion 2020-2021*

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي  
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة)..... خليل رحمان..... الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 994435 و الصادرة بتاريخ 2014

المسجل بمعهد المناجم قسم الإليكترونيكا

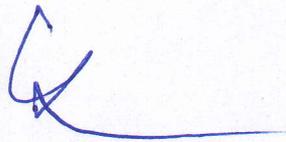
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Impact de choix du moteur du concasseur de la  
mine de Boukakra

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:.....

إمضاء المعني (ة)



16 جوان 2021

  
كتب راقن  
التبسي

## **Remerciement**

*Avant tout nous remercions **DIEU** qui nous a donné la patience déterminer ce travail.*

*Nous tiendrons à remercier grandement les êtres les plus chères au monde : nos mères et pères qui ne cessent de nous prodiguer des conseils pour nous incruster l'idée : que les études sont les seules clés de réussite dans la vie.*

*Nous tenons grand merci à **RECHECH ABDELKRIM** ce pour les efforts faisaients durant l'année universitaire, et pour leurs conseils précieux.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury .*

*Nous remercions tous les enseignants de département de Génie Minieret spécialement les enseignants de l'**ELECTROMECANIQUE**.*

*Enfin nous tenons à remercier tous ceux ou celles qui ont eu l'honneur, de près ou de loin, à nous aider à présenter ce travail.*



# *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A mes parents*

*Grace à leur tendres encouragements et leurs  
grands sacrifices, ils ont ou créer le climat  
affectueux et propice à la poursuite de mes  
études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon  
respect, ma considération et mes profonds  
sentiments envers eux,*

*Je prie le bon Dieu de la bénarde veillée sur  
eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers à  
moi*

*A mon frère Djellab Mokdad*

*Que Dieu lui fasse miséricorde*

*A mes amis*

*Haddad Oussama et Kharbouche Ilyes*

*A tous que j'aime et qui m'aiment*



# **résumé**

## Résumé

Les machines à réluctance variable est une classe particulière des machines électromagnétiques dans lesquelles les forces sont obtenues grâce à la variation de perméance. Le stator ferromagnétique supporte les bobinages, quant au rotor, qui ne possède aucun conducteur, ni balais ni aimant permanent. Il a seulement une denture destinée à faire varier la réluctance magnétique.

A été proposé dans ce travail la substitution du moteur à réluctance variable de géométrie 16/12 pôles à place du moteur asynchrone triphasé a rotor bobiné de 125 kw destiné a entrainer le concasseur à cône de la mine de fer Boukhadra pour augmenter la fiabilité, éviter les pannes, augmenter la production et réduire la consommation énergétique.

### Abstract

Variable reluctance machines is a special class of electromagnetic machines in which forces are obtained through the variation of permeance. The ferromagnetic stator supports the windings, as for the rotor, which has no conductor, brushes or permanent magnet. It only has teeth intended to vary the magnetic reluctance.

The replacement of the 16/12 pole geometry variable reluctance motor was proposed in this work instead of the 125 kw wound rotor three-phase asynchronous motor intended to drive the cone crusher of the Boukhadra iron mine to increase reliability, avoid breakdowns, increase production and reduce energy consumption.

### ملخص

آلات الممانعة المتغيرة هي فئة خاصة من الآلات الكهرومغناطيسية يتم فيها الحصول على القوى من خلال اختلاف النفاذية. يدعم الجزء الثابت الحديدي اللفات ، كما هو الحال بالنسبة للعضو الدوار ، الذي لا يحتوي على موصل أو فرش أو مغناطيس دائم. لديها فقط أسنان تهدف إلى تغيير التردد المغناطيسي.

تم اقتراح استبدال محرك الممانعة المتغيرة ذو الشكل الهندسي 12/16 في هذا العمل بدلاً من المحرك غير المتزامن ثلاثي الأطوار الدوار بقدرة 125 كيلو وات والذي يهدف إلى قيادة الكسارة المخروطية لمنجم الحديد في بوخضرة لزيادة الموثوقية وتجنب الأعطال وزيادة الإنتاج و تقليل استهلاك الطاقة.

# Sommaire

---

## Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Sommaire.....	IV
Listes des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Notation.....	VII
Introduction générale.....	1

### Chapitre I : Generalite sur la mine de BOUKHADRA

I.1 .Cadre géographique.....	2
I.2 .Géologie régionale .....	2
I.2.1. Stratigraphique.....	4
I.2.2. Tectonique .....	6
I.3. Hydrogéologie .....	7
I.4. Hydrologie.....	8
I.5. Minéralisation.....	8
I.5.1. Nature du minerai exploité .....	8
I.5.2. Caractérisation de la minéralisation.....	8
I.6. Présentation de la mine de BOUKHADRA .....	9
I.6.1. Historique de la mine .....	9
I.6.2. Gestion de la mine.....	10
I.7. Morphologie du gisement et réserves globales.....	11
I.8. Régime de travail de la mine de Boukhadra.....	12
I.8 .1.Organisation du travail.....	12
I.8.2. Production en minerai.....	12
I.8.3. Production de la mine.....	13
I.8.4.Duree de la mine .....	14

---

**Chapitre II : Les moteurs asynchrone**

<b>II.1.Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>II.2.Principe de fonctionnement et constitution.....</b>	<b>16</b>
<b>II.2.1.Création d'un champ magnétique tournant .....</b>	<b>17</b>
<b>II.3.Le Stator .....</b>	<b>18</b>
<b>II.4.Le Rotor .....</b>	<b>19</b>
<b>II.4.1.Le rotor à cage (rotor en court - circuit).....</b>	<b>19</b>
<b>II.5.Plaque signalétique.....</b>	<b>20</b>
<b>II.6.Caractéristiques et relations fondamentales.....</b>	<b>21</b>
<b>II.7.Plaques à bornes.....</b>	<b>23</b>
<b>II.8.Couplage.....</b>	<b>23</b>
<b>II.9.Caractéristique d'un moteur asynchrone triphasé.....</b>	<b>25</b>
<b>II.10.Bilan des puissances.....</b>	<b>25</b>
<b>II.11. Modélisation des machines asynchrones .....</b>	<b>25</b>
<b>II.11.1.LES HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES .....</b>	<b>26</b>
<b>II.11.2. Equations électrique et magnétique .....</b>	<b>26</b>
<b>II.11.2.1Equations des tensions .....</b>	<b>27</b>
<b>II.11.2.2.Equations des flux .....</b>	<b>27</b>
<b>II.11.2.3.Equations mécaniques : .....</b>	<b>28</b>
<b>II.11.3.Transformation de Park .....</b>	<b>28</b>
<b>II.11.3.1Matrice de Passage .....</b>	<b>29</b>
<b>II.11.3.2.Equations électriques .....</b>	<b>30</b>
<b>II.11.3.3.Equations magnétiques .....</b>	<b>30</b>
<b>II.11.3.4.Equation du couple électromagnétique .....</b>	<b>30</b>
<b>II.11.3.5.Equation dynamique .....</b>	<b>30</b>
<b>II.12.Conclusion .....</b>	<b>30</b>

### Chapitre III : Différent types de concasseurs

<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>III.2. Les lois fondamentales de concassage .....</b>	<b>31</b>
<b>III.2.1. Rapport de réduction .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3. La consommation d'énergie dans un concasseur .....</b>	<b>32</b>
<b>III.4. Types de concasseur et leur Principes de fonctionnement .....</b>	<b>32</b>
<b>III.4.1. Appareils opérant par écrasement (compression).....</b>	<b>33</b>
<b>III.4.1.1. Concasseurs à mâchoires.....</b>	<b>33</b>
<b>III.4.1.2. Concasseurs giratoires.....</b>	<b>35</b>
<b>III.4.1.3 .Concasseurs à rotors dentés.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.2. Appareils opérant par choc .....</b>	<b>40</b>
<b>III.4.2.1. Concasseurs à percussion .....</b>	<b>40</b>
<b>III.4.2.2. Concasseurs à percussion à axe horizontal.....</b>	<b>41</b>
<b>III.4.2.3. Concasseurs à percussion à axe vertical .....</b>	<b>43</b>
<b>III.4.2.4. Commentaires généraux sur les machines opérant par percussion .....</b>	<b>44</b>
<b>III.5. Critères de choix d'un appareil ou d'une chaîne d'appareils .....</b>	<b>44</b>
<b>III.5.1. Données de base .....</b>	<b>44</b>
<b>III.5.2. Eléments du choix du concasseur primaire.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.2.1. Matériaux non abrasifs (calcaires, charbons, phosphates,bauxites).....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.2.2. Matériaux abrasifs (La grande majorité des roches et des minerai) .....</b>	<b>46</b>
<b>III.5.3. Cas particulier des produits humides et collants.....</b>	<b>47</b>
<b>III .6.Conclusion.....</b>	<b>48</b>

### Chapitre IV : Les moteurs à reluctance variable

<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>49</b>
<b>IV.2.Classification des MRV .....</b>	<b>49</b>
<b>IV.3. Topologies des MRV tournantes :.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.3.1. Les MRV purs .....</b>	<b>50</b>
<b>IV.3.2. Les MRV à effet Vernier .....</b>	<b>51</b>
<b>IV.3.3. Les MRV hybrides .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.4. La géométrie du MRV 16/12 étudié.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.5. Paramètres caractéristiques du MRV .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.5.1. Le pas incrémental.....</b>	<b>54</b>

---

<b>IV.5.2. Le sens de rotation .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.5.3. Principe de fonctionnement et système d'alimentation de la MRV .....</b>	<b>55</b>
<b>IV.6. Equations électromagnétique du MRV .....</b>	<b>59</b>
<b>IV.7. Equation mécanique du MRV .....</b>	<b>59</b>
<b>IV.8. Notion de coenergie .....</b>	<b>60</b>
<b>IV.9. Calcul du couple en utilisant la coenergie.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.10. Les avantages et les inconvénients du MRV .....</b>	<b>62</b>
<b>IV.10.1. Les avantages du MRV .....</b>	<b>62</b>
<b>IV.10.2. Les inconvénients du MRV .....</b>	<b>62</b>
<b>IV.11. Conclusion.....</b>	<b>63</b>

### **Chapitre V : Partie spécial**

<b>V.1.Introduction.....</b>	<b>64</b>
<b>V.2.LE CALCULE DES CARACTERISTIQUES DU MOTEUR MRV CHOISI.....</b>	<b>64</b>
<b>V.2.1.Caractéristique du moteur choisi.....</b>	<b>65</b>
<b>V.2.2.Avantages de la restitution du moteur existant par le MRV proposé.....</b>	<b>67</b>
<b>V.3.Conclusion .....</b>	<b>68</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>70</b>
<b>Références et bibliographie</b>	

## Listes des figures

<b>Figures</b>	<b>Titres</b>	<b>Pages</b>
<b>Chapitre I</b>		
Figure. I.1	Situation géographique de la mine de Boukhadra	02
Figure. I.2	La carte géologique de la mine de Boukhadra	03
Figure. I.3	La carte géologique de gisement de BOUKHADRA	03
Figure. I.4	Les cadres géologique et stratification dans l'est et la région de Mellegue	06
Figure I.5	coupe transversale dans l'anticlinal du Boukhadra	06
Figure. I.6	trois coupes transversales dans l'anticlinal de Boukhadra	07
Figure. I.7	Organigramme de l'entreprise	10
Figure. I.8	carte de répartition des réserves du gisement de Boukhadra	11

**Chapitre II**

Figure II.1	Coupe montrant les différentes parties constituant un moteur asynchrone	15
Figure II.2	Force de Laplace	15
Figure I.3	conversion énergétique du MAS	16
Figure II.4	Représentation schématisée d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor	16
Figure II.5	Le champ tournant résultant tourne dans le sens Horaire à la vitesse $n_s$	17
Figure II.6	Le champ tournant résultant tourne dans le sens Anti-Horaire à la vitesse $n_s$	17
Figure II.7	les différentes pièces de MAS a cage	18
Figure II.8	Moteur asynchrone a rotor à cage	19
Figure II.9	Moteur asynchrone a rotor bobiné	20
Figure II.10	plaque signalétique	20
Figure II.11	Caractéristiques de couple	22
Figure II.12	Caractéristiques du courant	22
Figure I.13	cette plaque que vient de raccorder l'alimentation du moteur	23
Figure II.14	Tensions lies type du couplage	23

Figure II.15	Branchement en triangle	24
Figure II.16	Branchement en étoile	24
Figure II.17	Branchement en étoile-triangle en Moteur rotor bobiné	24
Figure II.18	Caractéristique d'un moteur asynchrone triphasé	25
Figure II.19	Représentation des axes de la machine	28

### Chapitre III

Figure III. 1	Concasseur à mâchoires	33
Figure III. 2	Concasseur à mâchoire à simple effet	33
Figure III.3	Concasseur à mâchoire à double effet	34
Figure III. 4	Concasseur giratoire	35
Figure III. 5	Concasseur giratoire primaire à tête guidée et portée	36
Figure III. 6	Les concasseurs giratoires secondaires	37
Figure III.7	Concasseurs à cône	38
Figure III. 8	Concasseurs à rotors dentés	39
Figure III. 9	Concasseur MMD série 500	39
Figure III. 10	Principe d'un concasseur à percuteurs rigides	41
Figure III. 11	Concasseur à percussion à axe vertical	43

### Chapitre IV

Figure IV.1	«Arbre généalogique » des MRV	50
Figure IV.2	MRV pur à grosses dents	51
Figure IV.3	MRV à pôles statoriques dentés	52
Figure IV.4	Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance	52
Figure IV.5	MRV hybride à effet vernier	53
Figure IV.6	MRV à plots à aimants	53
Figure IV.7	Structure du MRV 16/12 étudié	53
Figure IV.8	Coupe transversale d'une MRV 8/6 avec indication des différents Angles	55

Figure IV.9	Pont H asymétrique pour la commutation du courant d'une phase de MRV	57
Figure IV.10	Commutation de courant au cours d'un cycle de conduction d'un enroulement de phase avec une limitation de courant, pour une gamme à basse vitesse des MRV	58
Figure IV.11	Commutation de courant au cours d'un cycle de conduction d'un enroulement de phase avec une limitation de courant, pour une gamme à moyenne vitesse des MRV	58
Figure IV.12	Commutation de courant au cours d'un cycle de conduction d'un enroulement de phase pour une gamme à vitesse élevée des MRV	59
Figure IV.13	Énergie et coénergie magnétique	60

### Chapitre V

Figure .V.1	Plaque signalétique de MAS 125 KW	66
Figure .V.2	Coupe schématique transversale du Moteur à réluctance variable choisi	67

## liste des tableaux

tableaux	Titres	pages
<b>Chapitre I</b>		
Tableau I.1	composition chimique moyenne du minerai de Boukhadra	9
Tableau I.2	Réserves géologiques et exploitables de la mine	11
Tableau I.3	Nombre de poste par jour et par heure	12
Tableau. I.4	La production programmé pour l'année 2018	14

## Chapitre III

Tableau III.1	Caractéristiques des appareils de fragmentation grossière (concasseurs)	47
---------------	---	----

## Chapitre V

Tableau V.1	Comparaison du moteur existant par rapport au MRV proposé	66
Tableau V.2	Comparaison entre les 04 types de moteurs électriques	68

## Notation

Symbole	Unité	Densité
Fe	T	Fer
L	M	La longueur du conducteur
B	tesla	L'induction magnetique
F	N	La force
[V s]	[-]	La matrice de resistance par phase du stator
[Rr]	[-]	La matrice de resistance par phase du rotor
[L <sub>S</sub> ]	[-]	Matrices des inductances statoriques
U	volts	Tension entre phases en
I	ampères	Courant absorbe dans une phase du stator
∅	rad	Angel de dephasage enter le courant et la tension
P <sub>e</sub>	watts	Puissance electrique du moteur
p	watts	Puissance nominale du moteur
μ	%	Rendement
f	hertz	Frequence des grandeurs electriques statoriques
ω	rd/s	Pulsation des grandeurs electriques statoriques
p	[-]	Nombre de paires de poles du moteur
π <sub>s</sub>	rd/s	Vitesse angulaire de synchronisme en
π	tr/min	Vitesse angulaire de rotation du moteur en
N	tr/min	Vitesse de rotation du rotor en
g	%	Glissement
c	N.m	Couple mecanique nominal fourni par moteur en
c <sub>m</sub>	N.m	Couple maximum en
-c <sub>d</sub>	N.m	Couple de demarrage
I <sub>d</sub>	ampères	Courant appele au demarrage
[Lr]	[-]	Matrices des inductances rotoriques.
[M <sub>sr</sub> ]	[-]	Matrices des inductances mutuelles statoriques.
[M <sub>rs</sub> ]	[-]	Matrices des inductances mutuelles rotoriques
θ	rad	Angle electrique
[P(θ)]	[-]	La matrice de la transformation de park
[P(θ)] <sup>-1</sup>	[-]	La matrice inverse de park

$\theta_s$	rad	L'angle pour le stator
$\theta_r$	rad	L'angle pour le rotor
$\omega_r$	tr /mn	Vitesse mecanique du rotor
J	Cm	Moment d'inertie des pieces tournantes
D max	Cm	Diametre du plus grand morceau avant le concassage
d max	Cm	d max= diametre du plus grand morceau apres le concassage
B	mm	Largeur de la tremie de reception du concasseur
b	mm	Largeur d'ouverture du concasseur
W	Kwh/s	Travail d'entre
W <sub>i</sub>	Kwh/t	Indice de travail specifique
P	micron	80% de la taille des passants du produit, micron
F	micron	80% de la taille des passants de l'alimentation
$\alpha_s$ et $\alpha_r$	rad	Le pas incremental
N <sub>s</sub>	[-]	Nombre de poles statoriques
N <sub>r</sub>	[-]	Nombre de poles rotoriques
N <sub>p</sub>	[-]	Nombre de pas par tour
$\theta_r$	Rad	L'angle de rotation
$\varepsilon$	Rad	L'angle d'attaque
T <sub>e</sub>	N.m	Le couple electromagnetique
Tr	N.m	Les couple resistant
f	[-]	Le coefficient de frottements mecaniques
$\omega$	Tr/rad	La vitesse angulaire
M	Cm	Le moment d'inertie de la masse du rotor
$v_1(t)$	V	L'equation electrique d'une seule bobine
$p(t)$	Kw	Puissance instantanee fournie a la machine
$\partial\theta$	Web	Le flux constant
W' <sub>magn</sub>	Web	La coenergie magnetique

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Les applications des machines électriques sont de plus en plus nombreuses, que ce soit en robotique (machines outils, robots,...), dans le domaine des transports notamment les véhicules électriques et hybrides et dans différents fonctionnement des procédés industriels. Les entreprises minières algériennes en est la preuve car l'utilisation des actionneurs électriques constituent la pièce maitresse de la dynamisation de l'industrie nationale. Dans le même contexte, on peut citer les machines électriques classiques comme celle à courant continu (qui sont les moins utilisés actuellement a cause des problèmes de commutations qui provoquent les étincelles au niveau des balais), synchrones et asynchrones et aussi les nouveaux types de machines émergeants dans l'industrie entre autres ; les moteurs synchrones à aimant permanent et les machines à réluctance variable, les moteurs Brushless, les moteurs synchrones a reluctance variable, ....etc.

Les machines à réluctance variable constituent une classe particulière des machines électromagnétiques dans lesquelles les forces sont obtenues grâce à la variation de perméance d'un circuit magnétique entouré par des bobines. Cette variation est obtenue lors du déplacement relatif des deux parties constitutives : le stator et le rotor. Ces variations de perméance sont sources de variations d'énergie électromagnétique ou encore de variations de réluctance, de perméance ou d'inductance, d'où le nom de « machines à réluctance variable ». Ainsi, le stator ferromagnétique supportera les bobinages, quant au rotor, qui ne possède aucun conducteur, ni balais ni aimant permanent. Il a seulement une denture destinée à faire varier la reluctance magnétique.

A été proposé dans ce modeste travail l'emploi du moteur à reluctance variable à place du moteur asynchrone triphasé a rotor bobiné pour entrainer le concasseur à cône de mine de fer Boukhadra pour augmenter la fiabilité, éviter les pannes, augmenter la production et réduire la consommation énergétique.

Cette étude est subdivisée en cinq chapitres dont le premier évoque une carte de Visite de la mine de fer de Boukhadra wilaya de Tébessa ainsi que son historique et la définition géologique du gisement.

Le deuxième chapitre on a présenté la machine asynchrone triphasé alimentée direct avec un source sinusoïdal, ses différents types et sa modalisation a base transformes de Park.

Le troisième chapitre on a présenté les lois fondamentales de concassage et les différents types de concasseur et leur Principes de fonctionnement

Le quatrième chapitre on a présente l' MRV ; ses classifications, son principe de fonctionnement, son système d'alimentation, les équations électromagnétique et mécanique et Nous précisons également la géométrie du luis.

Le cinquième et dernier chapitre contient une comparaison générale entre un moteur MRV et le moteur asynchrone à rotor bobiné existant au concasseur à cône dans la mine de fer de Boukhadra .

Finalement une conclusion générale qui résume toutes les résultats.

**Chapitre I :**  
**Présentation de la mine de Boukhadra**

## I.1 .Cadre géographique

Le Djebel de BOUKHADRA se situe sur l'Atlas saharien, à l'Est Algérien. L'unité de BOUKHADRA se trouve à une altitude de 850 m, le point culminant du Djebel est de 1463 mètres .La ville de BOUKHADRA fait partie de la WILAYA de Tébessa. Elle se situe à 45 Km au Nord – Est de celle -ci, à 200 Km au sud de la ville côtière de ANNABA, et à 18 Km de la frontière Tunisienne.

Elle est reliée à ANNABA par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe d'EL-HADJAR. Le climat est continental et sec, les températures varient entre 40° c en été et 0° c en hiver, la Pluviométrie est faible avec parfois de faibles chutes de neige.

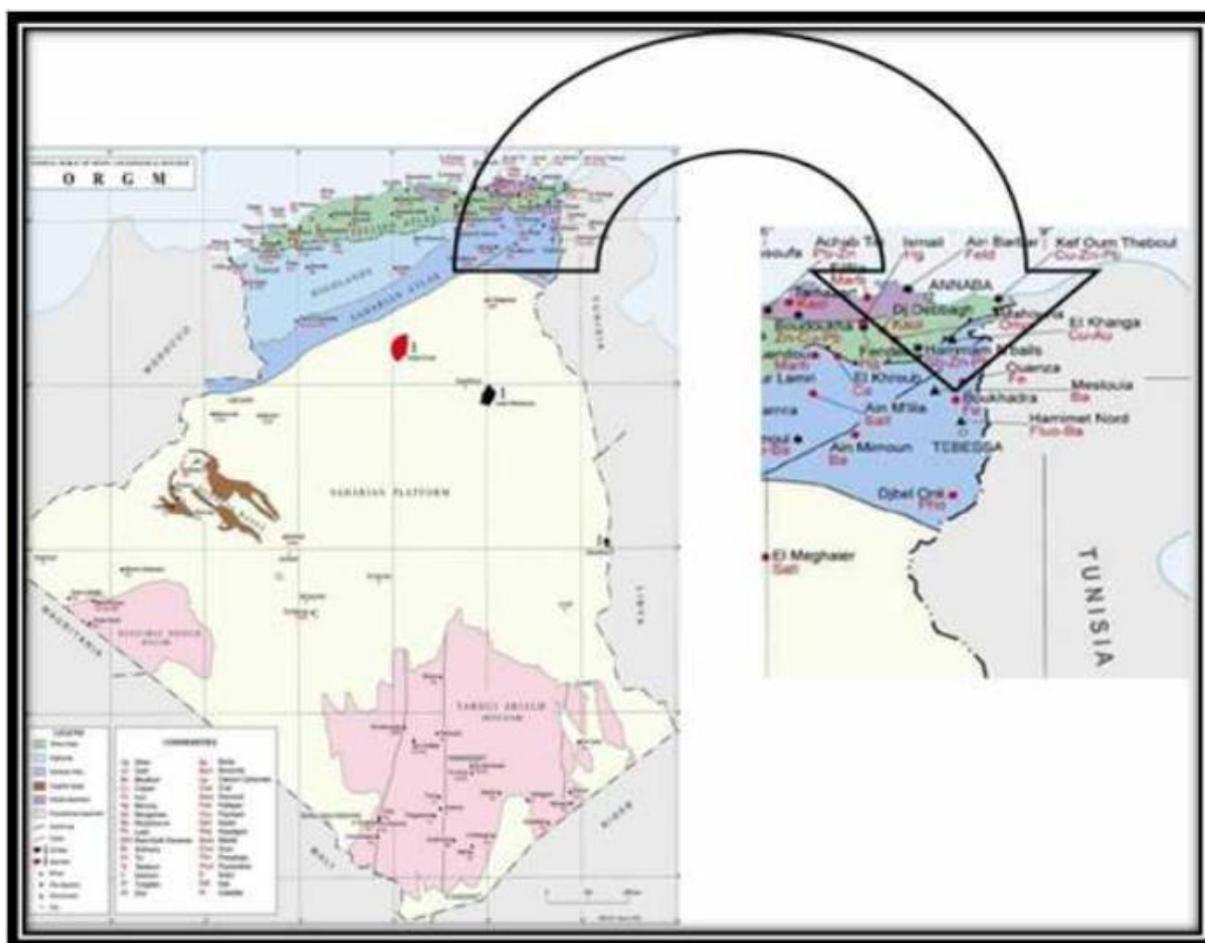


Figure. I.1 : Situation géographique de la mine de Boukhadra.

## I.2 .Géologie régionale

Le massif de Boukhadra présente une structure anticlinale orientée NE-SW, recoupée par le fossé de Tébessa-Morsott d'orientation NW-SE (Fig.I.2) L'ossature de l'anticlinal est constituée par les terrains du Crétacé moyen (Aptien- Vraconien) qui dessinent dans la partie NE une fermeture périclinale. Les terrains les plus anciens reconnus à l'affleurement sont représentés par les évaporites du Trias, ils sont le plus souvent en contact tectonique avec les formations du Crétacé.

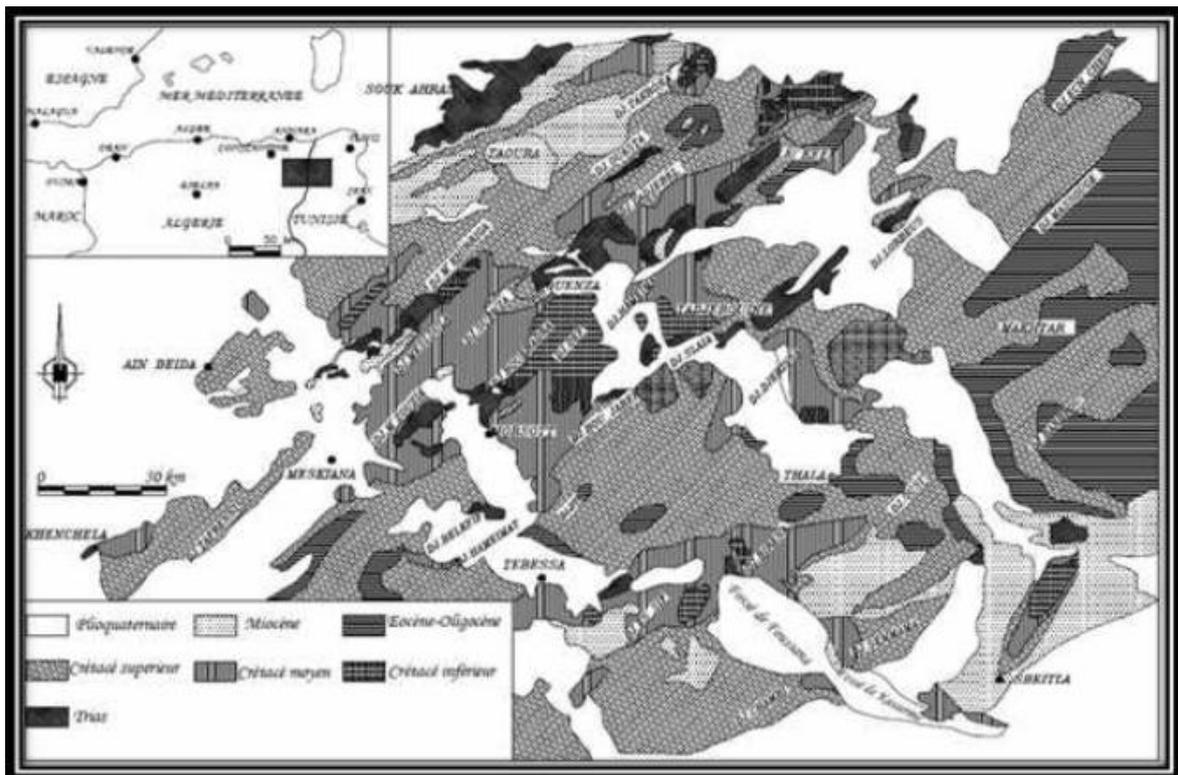


Figure. I.2 : La carte géologique de la mine de Boukhadra.

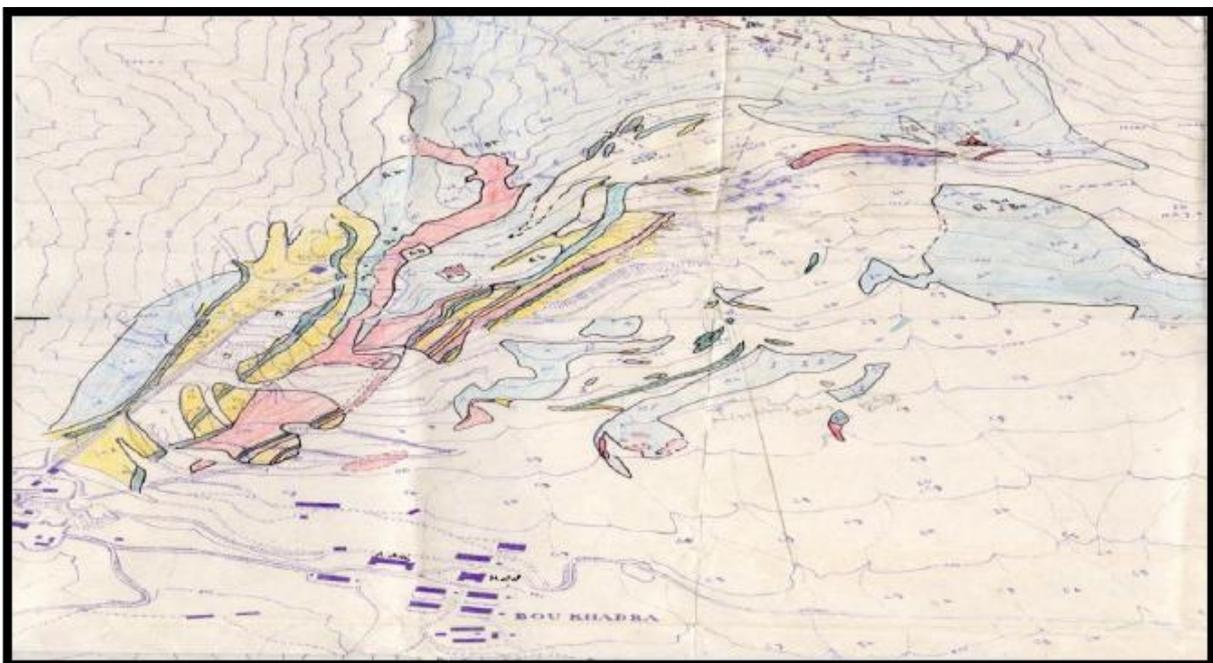


Figure. I.3 : La carte géologique de gisement de BOUKHADRA.

### I.2.1. Stratigraphique

Le gisement de fer de Boukhadra, comme celui de l'Ouenza font partie de la même province métallogénie ferrifère qui s'étend de khenguet - El - Mauhad au sud, Ouenza au Nord et Djerissa à l'Est.

Le djebel Boukhadra ; appartenant au domaine de l'atlas saharien est caractérisé par une structure géologique anticlinale très simple, de direction N.E/S.O, avec une terminaison périclinale au N.E. Le cœur de la structure est représenté par des sédiments de l'Aptien.

Du point de vue litho-stratigraphique, la région de Boukhadra est constituée par des sédiments du Mésozoïque tertiaire en partie du quaternaire.

#### -Trias

Les dépôts du trias sont développés dans les parties Ouest, Sud et Sud-est ; ils sont représentés par des marnes bariolées à gypses Dolomies (cargneules) et les débris de calcaires et degrés. Ces formations sont en contact anormal ou en discordance avec les dépôts du crétacé (Aptien) suite au phénomène de diaprasse. Dans la carrière de Boukhadra (gîte ouest) le trias affleure aux niveaux 890-902 et 914.

#### -Crétacé

Dans le profil du crétacé, nous retrouvons l'Aptien, l'Albien, le Coniacien et le Cénomaniens ou on a la série Aptienne, porteuse de la minéralisation est caractérisée par des marnes et des calcaires constituant la partie inférieure qui encaisse le gîte sud, des calcaires récifaux construits, a organismes fossiles (rudistes) qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale et des grès et calcaires de la partie supérieure de l'Aptien non productif et on a :

##### a - L'Aptien

L'aptien occupe à lui seul le plus grand partie des affleurements de la région (OUENZA, BOUKHADRA, M'KHIRIGA, Kef REKHEMA ET BOUDJABER). Les formations aptiennes se rencontrent dans le noyau, des structures anticlinaux ainsi qu'au voisinage immédiat des formations triasiques, elles constituent la majeure partie de tous les reliefs importants,

Aptienne porteuse de la minéralisation qui encaissant le gîte sud et les petites veines (carrière principale). Calcaires récifaux (construits organogènes rudistes qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale.

##### b- Albien

Dubourdieu 1959 distingue trois termes de bas en haut, Un terme inférieur de 20 à 50m constitué de marnes argileuses jaunes ou brunes riches en gastéropodes. Un terme moyen de 100 m composé de calcaires noires à Bélemnites à intercalation marneuses. Un terme supérieur de 75 m de puissance constitué d'argiles et de marnes noires bitumineuses à bélemnites et nombreuses empreintes d'ammonites avec des minces intercalations marno calcaires.

##### c- Vraconien

Il est représenté par un faciès argilo-marneux marquant ainsi un changement dans la sédimentation qui était essentiellement calcaire jusqu'à l'albien, ce changement s'estompe au fur et à mesure, que 'on rapproche des séries épaisses périclinale ou sédimentation marneuse se manifeste dès le clausenien, ce qui témoigne d'une transgression qui celle en discordance les structures émergées ou érodées.

A Boukhadra Dubourdiou 1956 décrit une épaisse série de 600 m d'épaisseur qui est identique à celle de l'ALBIEN supérieur, elle est constituée de marnes à passées calcaires et marno-calcaires à empreintes d'amorites qu'il attribue au Vraconien.

#### **d- Le miocène**

L'épaisseur du miocène peut atteindre une certaine de mètres (100m) il débute par des formations marines transgressives et discordantes sur les terrains anciens, ils sont représentés par des calcaires roux suivis de marnes très argileuse de couleur verte devenant rouge foncé et enfin par des argiles à intercalation de grés grossiers.

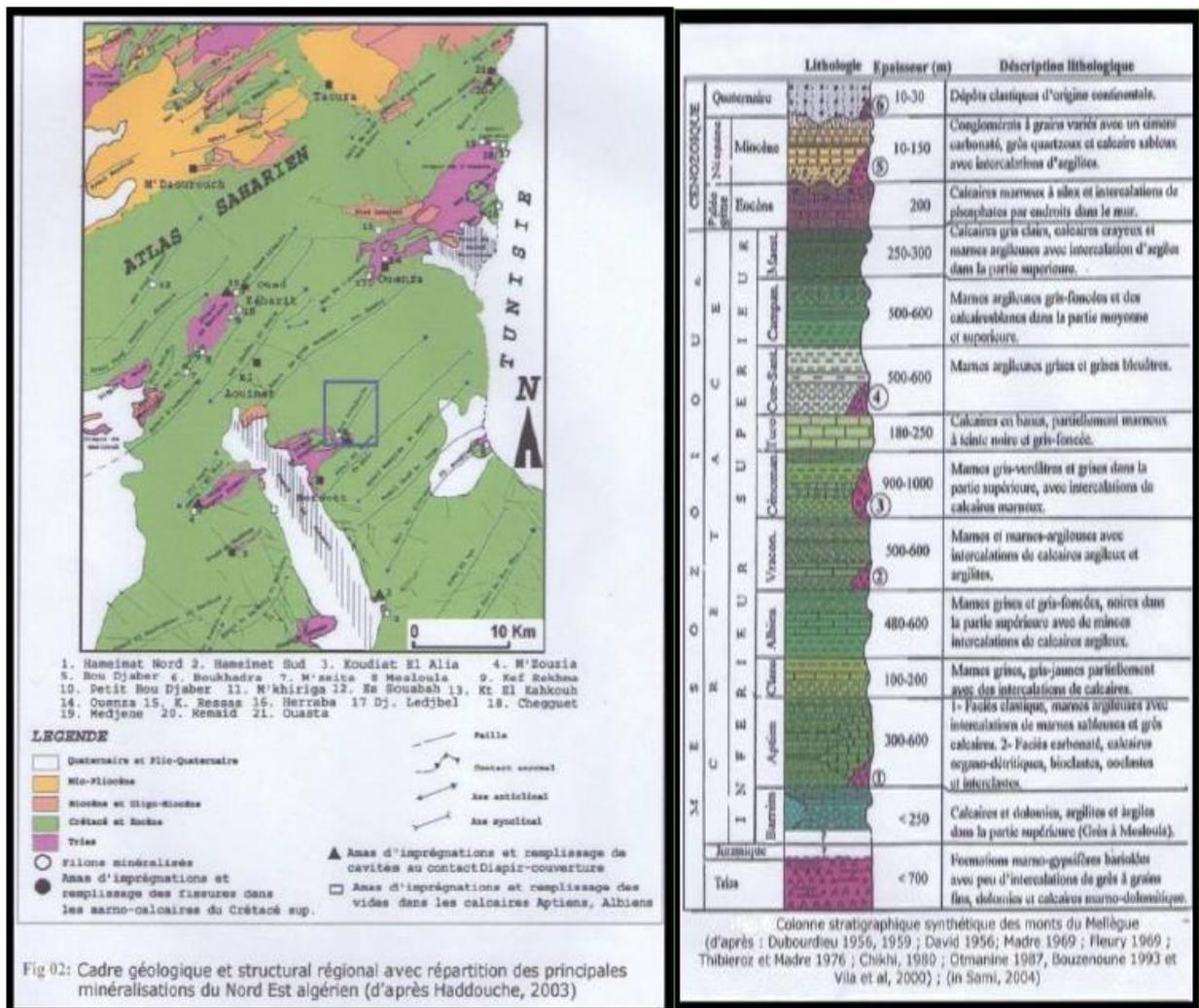
#### **e-Quaternaire**

Les dépôts du quaternaire sont formés par un matériel caillouteux, blocs de calcaires, grés débris de minerai et les conglomérats, ils sont répartis sur les flancs de la montagne et les parties basses du relief. Du point de vue tectonique la région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques importantes.

La phase de plissement de direction NE/SO et la phase de tectonique cassante ayant engendré des mouvements de roche qui sont à l'origine de la formation des fossés de Tébessa–Morsott et des Ouled-Boughanem ainsi que le horst de Boudjaber.

L'anticlinale de Boukhadra est affectée principalement par la faille de Koudiet–ElHamra qui est affectée par un effondrement considérable d'autre faille de Boukhadra de direction NE/SO. Dans la partie SUD-OUEST (à l'aval du pic) la structure est affectée par un effondrement considérable, d'autres failles sans importances majeure à petit rejet sont signalées également aux environs immédiats du gisement.

Par ailleurs nous citons le phénomène de diapirisme qui a joué un rôle prépondérant dans la formation de la structure et les manifestations minérales de Boukhadra (genèse de la minéralisation).

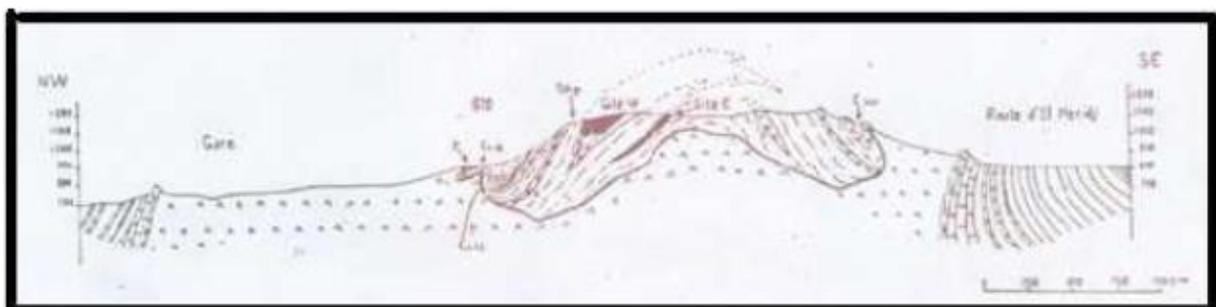


**Figure. I.4 :** Les cadres géologique et stratification dans l’est et la région de Mellegue. [2].

**I .2.2. Tectonique**

La région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques ; la phase de plissement et la phase de tectonique cassante. Dans la structure anticlinale de Boukhadra, on observe deux grandes dislocations tectoniques :

- La 1ère se prolonge presque parallèlement à l’axe de l’anticlinal à partir du pic vers la terminaison périlclinale.



**Figure I.5 :** coupe transversale dans l’anticlinal du Boukhadra

• La 2ème zone de dislocation tectonique de direction WNW-ESE coupe la structure dans sa partie centrale en deux parts, l'amplitude de cette dislocation peut arriver jusqu'à 1000 mètre

D'autres failles, sans importance majeure sont à signaler.

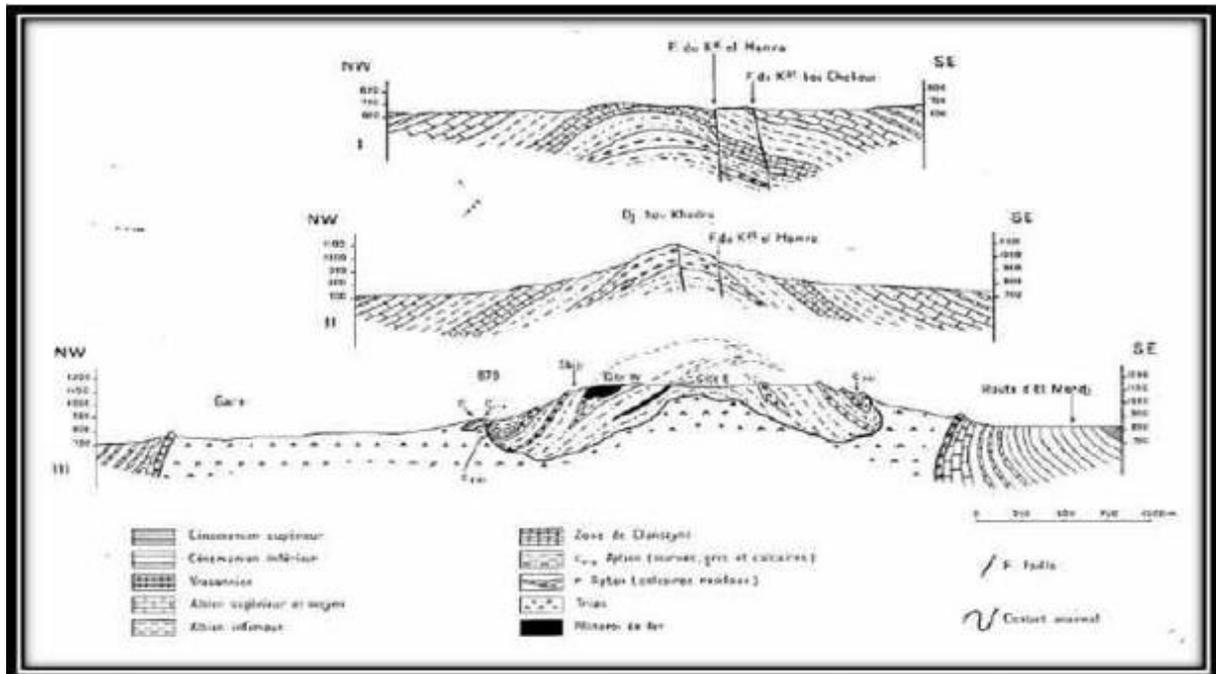


Figure. I.6 : Trois coupes transversales dans l'anticlinal de Boukhadra

### I.3. Hydrogéologie

Les eaux souterraines et les eaux de surfaces s'intègrent dans un ensemble constituant le cycle hydrologique. Une relation de continuité et d'interdépendance existe entre les deux. Tant que le climat et le contexte géologique ou physique ne changent pas, un équilibre est maintenu au sein de ce cycle. Mais une influence anthropique, comme captage d'eau, peut modifier cet équilibre. Une proportion minoritaire de l'eau de pluie s'infiltré, via le sol vers le sous-sol ou elle séjourne et circule dans les formations poreuses ou fissurées constituant ainsi les réserves d'eau souterraine.

Le réseau hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible à l'exception des multiples petits chenaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsèment les versants de Djebel Boukhadra. Le réseau hydrographique se compose de l'oued El Harcha et Oued El Melali qui passent entre Kharoub et el harcha et le Douar el khiana ; suivant la direction NE-SW à l'extrémité nord de Djebel Boukhadra.

Hydrologiquement parlant; le comportement des terrains existants à Boukhadra se résume comme suit:

- Les terrains triasiques contenant du gypse et du sel ; et du fait de leur hétérogénéité présentent un aspect perméable et facilitent les infiltrations des eaux ; leur circulation les rend saumâtre et ne peuvent convenir qu'à l'emploi industriel.

- Les calcaires massifs de l'aptien sont toujours très fissurés en affleurement et constituent un terrain favorable à la circulation et l'accumulation des eaux souterraines.

- Les marnes qui forment malheureusement la plus grande surface affleurant dans la région sont imperméables et toutes les eaux de pluies ruissellent ou s'évaporent.
- Les terrains quaternaires n'ont pas une importance hydrologique.

Les études hydrogéologiques entreprises par la DHW de la wilaya de Tébessa ne révèlent aucune nappe aquifère en eau potable exploitable dans la région minière de Boukhadra. Toutefois ; il y a lieu de noter que les synclinaux calcaires sont des réservoirs naturels d'eau et à leur pied apparaissent des sources qui sont fréquemment localisées sur de petites fractures.

L'on a ainsi les points d'eau d'Ain Chania ; à l'extrémité fracturée du synclinal de même nom ; les sources d'Ain Safsaf ; Al Malga; Chegaga ; Ain Menahla etc.... au pied de Haoud EL Sghir et celle d'Ain Bettik ; au pied de Haoud el Kebir. Au SudEst ; l'Ain Oude El ma est un exutoire de l'eau accumulée dans les calcaires à incérâmes du Sénonien.

A Boukhadra; d'anciens travaux de recherche ont recoupé des circulations d'eau dans les calcaires aptiens (A.Si Hamed).

#### **I .4. Hydrologie**

Selon la géologie, on ne peut pas parler d'oueds, ou de réseau hydrographique proprement dit, mais on remarque des talwegs sec pendant une longue période de l'année et à faible écoulement. Leurs captages pratiquement impossibles à cause de la topographie et leurs faibles quantités.

#### **I .5. Minéralisation**

##### **I .5.1. Nature du minerai exploité**

Le minerai exploité est du fer sous forme d'oxyde de fer montré par l'hématite rouge ( $Fe_2O_3$ ) présente en abondance dans ce gisement avec une teneur moyenne de 54% de fer. Le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire, d'une longueur de 910 à 2200m et d'une puissance variant de 10 à 15 m.

##### **I .5.2. Caractérisation de la minéralisation**

La minéralisation est de type hématite-limonite résultant de l'oxydation de la sidérite. Minerai hématite de formule chimique  $Fe_2O_3$  et de densité  $d=2.7$ . La teneur en fer varie de 51 à 54%. Comparativement aux gisements d'Ouenza, le minerai de Boukhadra est d'une qualité supérieure, riche en fer et moins siliceux. Notons que la prospection est concentrée sur les parties supérieures (amont) des corps minéralisés, excepté la zone de la carrière principale où la prospection est allée jusqu'au niveau 845.

Sur les axes principaux (100-108) et Sud-est (4-11), les travaux de recherche sont arrêtés au niveau 1045 et l'axe Nord au niveau 1105.

Les travaux de recherche dans le périmètre de la carrière principale ont montré que la minéralisation se prolonge jusqu'au niveau hydrostatique (818) ; ceci a été confirmé lors des travaux d'exploitation. Donc, si nous faisons une analogie à la carrière, il est fort probable que sur le prolongement vers l'Est, la minéralisation atteigne le niveau hydrostatique.

Sur l'axe principal par exemple, le sondage S.D/1045/0.102 d'une profondeur de 115.5 m et une inclinaison de 65° Nord avait confirmé la continuité de la minéralisation jusqu'au niveau 925m et sur l'axe Nord, les sondages 1105/241-242 avait intercepté le minerai au niveau 1045.

Pour ce qui est du gîte Nord, les chances de continuité de la minéralisation jusqu'au niveau hydrostatique sont minimales à cause de la faible puissance du corps et de l'irrégularité de la teneur du minerai par rapport aux autres axes ; c'est pourquoi nous limitons la prospection dans un premier temps au niveau 925 seulement. Si les résultats de la prospection complémentaire s'avèrent positifs à ce niveau, il va falloir continuer la recherche jusqu'à la fin de la minéralisation. Le volume des travaux de prospection complémentaire des niveaux sous-jacents sera détaillé dans le programme de prospection que nous élaborerons incessamment.

Pour point de vue qualitatif le gîte Nord est caractérisé par une teneur relativement faible par rapport aux autres axes. Dans la partie sud du gîte, entre les coupes 292-296 nous avons constaté une nette différence de teneur en fer par rapport à la partie Nord.

Les réserves de la partie sud du gîte sont évaluées à 246100 tonnes avec une teneur moyenne en composants de:

- 46.63 % en fer ;
- 15.80 % en SiO<sub>2</sub>;
- 0.6 % en BaSO<sub>4</sub>.

La partie Nord, dont les réserves sont évaluées à 57314284 tonnes est caractérisé par une teneur évaluée, soit :

- 52.42 % en fer ;
- 4.99 % en SiO<sub>2</sub>;
- 0.02 % en BaSO<sub>4</sub>.

**Tableau. I.1** : composition chimique moyenne du minerai de Boukhadra

Eléments	Fe	Si O <sub>2</sub>	Ca O	M gO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaS O <sub>4</sub>	S	M n	Cu	P
Teneur en %	49.8	4.00	7.10	2.00	2.25	Trace	0.04	1.98	Trace	0.02

## I.6. Présentation de la mine de BOUKHADRA

### I.6.1. Historique de la mine

L'exploitation de la mine de BOUKHADRA fut entamée durant l'époque romaine pour l'extraction du cuivre dans la zone du pic par la suite l'exploitation a porté sur le zinc et autres poly-métaux par la concession de BOUKHADRA (Mr TADRO)

- De 1903 à 1926 ; la concession de MOKTA EL HADID avait entreprise des travaux de recherches systématiques entre les galeries entre les niveaux 845- 1225.

- De 1926 à 1966 dates de la nationalisation des mines c'était la société de l'Ouenza qui exploitait le gîte de BOUKHADRA. Cette dernière avait effectuée de la recherche systématique par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de BOUKHADRA.
- Durant la période de 1967 à 1984 la sonarem était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères d'Ouenza et BOUKHADRA. Restauration des entreprises (1983-1984) le c'était FERPHOS qui gérait .exploitait et développait ces recherches sur l'ensemble des gîte ferrifères existant sur territoire nationale.
- En 2001 (octobre 2001) le retour des étrangers sous le nom : (ISPAT Tébessa). Par un contrat de partenariat de 70 % pour Arcelor Mittal et 30% pour Ferphos
- En 2005 : (janvier 2005) changement le nom de l'entreprise à (Mittal Steel Tébessa), Société d'extraction et préparation du minerai de fer au capital social de 613.140.000DA.
- En 2006 : un partenariat s'effectue entre les deux entreprises ARCELOR & MITTAL sous le nom d' « ARCELOR-MITTAL ».
- En 2013 :(octobre 2013) après les nouveau lois de partenariat en Algérie ; un contrat de partenariat fait entre 3 entreprises : 49% pour Arcelor Mittal, 30% pour Ferphos et 21% pour Sider. Et ça continue de cette contrat jusqu'à l'année 2016.

### I .6.2. Gestion de la mine

L'entreprise contient un nombre de 600 employeurs repartis suivant l'organigramme montré sur la figure N°I.7.

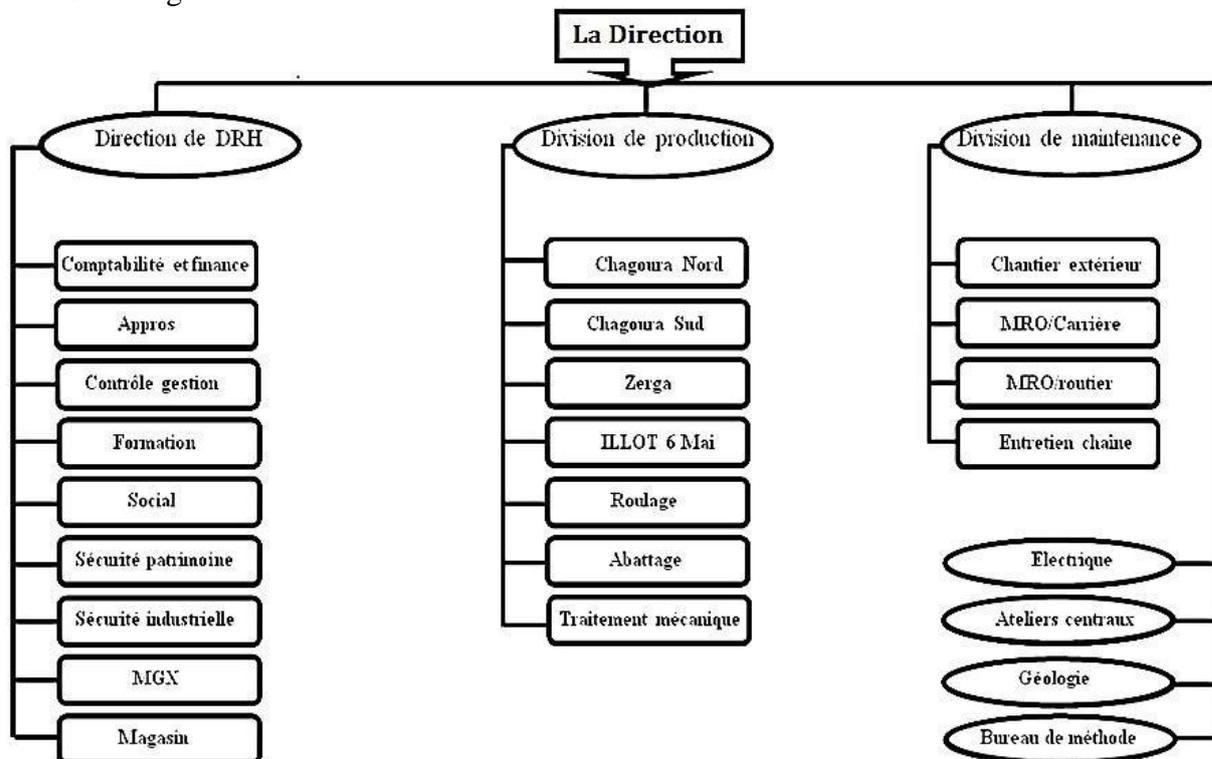


Figure. I.7 : Organigramme de l'entreprise.

### I.7. Morphologie du gisement et réserves globales

Le gisement de minerai de Fer est de forme ventriculaire de type hydrothermale sédimentaire d'une longueur de 900 à 2200m et d'une puissance variée de 10 à 50 m ; la minéralisation est de type fer hématite de forme chimique ( $Fe_2O_3$ ) ; sa teneur moyenne est supérieure à 50%. Globalement, le gisement de Boukhadra est composé de quatre (04) corps minéralisés principaux et les petites veines de moindre importance :

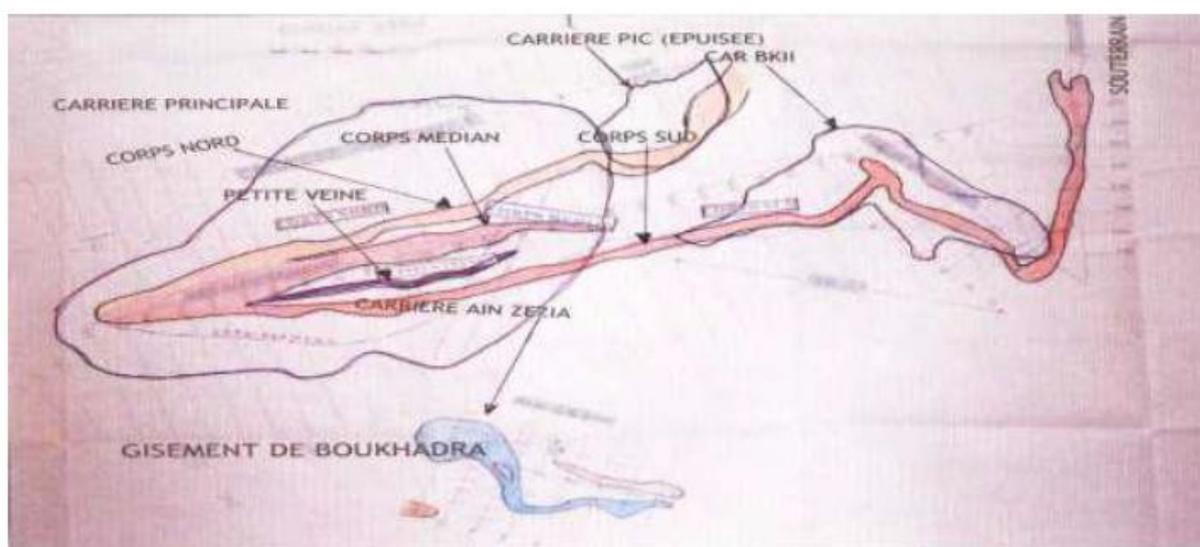
- Corps principal;
- Corps Nord ;
- Corps Median ;
- Corps Sud.

Selon la première estimation des réserves réalisées en 1981 par la D.E.D basée sur les résultats de prospection, les réserves géologiques globales sont évaluées à 50 millions de Tonnes en catégories B, C1, C2.

Les réserves exploitables de la mine arrêtées au 31/10/2019 sont de l'ordre de 42558946Tonnes dont 12 millions seront extraites par ciel ouvert et 31 millions par le souterrain qui englobe plus de 70 % des réserves globales de la mine.

SITES ET QUARTIERS	RESERVES GEO(T)		RESERVES EXP (T)		OBSERVATIONS
	TONNAGE	Fe %	TONNAGE	Fe%	
TOTAL CIEL-OUVERT	12 901 106	53,30	11 723 490	52,13	
TOTAL SOUTERRAIN	33 336 356	55,76	30 835 456	55,34	
TOTAL MINE	46 237 462	55,08	42 558 946	54,48	EN CATEGORIES B+C1+C2
TOTAL MINE	55 487 762		51 809 246		EN CATEGORIES B+C1+C2+P

**Tableau. I.2 :** Réserves géologiques et exploitables de la mine.



**Figure. I.8 :** carte de répartition des réserves du gisement de Boukhadra.

## I.8. Régime de travail de la mine de Boukhadra

### I.8.1. Organisation du travail

Vu de besoins croissant et compte tenu de la matière première, la mine est dotée d'un régime de travail de 16h/24h effectué selon le calendrier suivant :

- 1er Poste de 5 h à 13h
- 2ème poste de 14h à 21h

**Tableau. I.3 :** Nombre de poste par jour et par heure

<i>Mine</i>	<i>nombre de poste de travail par jour</i>	<i>Nombre d'heures par poste</i>
<i>A ciel ouvert</i>	2 postes continus 1ers semestre et 03 postes continus 2ème semestre 2020	7h30/poste
<i>Souterraine</i>	02 postes discontinus	6h30/poste

- **Pour les travaux d'extraction - chargement et de transport :**  
**Pour le minerai :** - Nombre de postes 2 p/j, Durée d'un poste 8 h  
**Pour le stérile :** - Nombre de postes 2 p/j, Durée d'un poste 8 h
- **Pour les travaux de forage et de tir :**  
**Opération de Foration :** - Nombre de postes 2 p/j, Durée d'un poste 8 h  
**Chargement des trous :** - Nombre de poste 1 p/j, Durée d'un poste 5 h
- **Nombre de jours ouvrables par an :**  
 Stérile : 330 jours/an, Minerai : 266 jours/an
- **Nombre de jour ouvrables par semaine :**  
 Pour la carrière : 7 Jours, Pour le souterraine : 5 Jours
- **Nombre de postes par jour :**  $Np/j = 2$  postes
- **Nombre de poste par an :**  
**Pour le stérile :** - Nombre de postes par an :  $Np/an = Nj/an * n$ ,  
 $Nj/an$  : nombre de jours ouvrables par an  
 $n$  : nombre de postes jour,  
 $Np/an = 330 \times 2 = 660$  p/an  
**Pour le minerai :** - Nombre de postes par an :  $Np/an = Nj/an * n$

$$Np/an = 266 \times 2 = 532 \text{ p/an}$$

### 8.2. Production en minerai

- **Production annuelle planifiée :**  $Pan = 287450$  t/an. (Donnée par l'entreprise)
- **Production par mois :**  
 $Pmois = Pan / (Nmois/AN)$ ; (t/ mois),  $Nmois/an$  : nombre de mois par an  
 $Nmois/an = 12$  mois,  $Pmois = 287450/12$

$$Pmois = 23954.16 \text{ T/mois}$$

- **Production par semaine :**  $P \text{ semaine} = Pmois / (Nsem/mois)$ , t/sem  
 Où :  $Nsem/mois$  : nombre de semaine par moi,  $Nsem/mois = 4$  semaines

$$Psem = 23954.16/4 = 5988.54 \text{ t/semaine}$$

- **Production journalière** :  $P_j = P_{an} / (N_j/an)$  t/jour,  
**Pour le stérile** :  $N_j/an=330$  jour/an

$$P_j = 287450/330 = 871.06 \text{ t/jour}$$

- Pour le minerai** :  $N_j/an=266$  jour/an

$$P_j = 287450/266 = 1080.64 \text{ t/jour}$$

- **Production par poste** :  $P_p = P_j / (N_p) ; (t/poste)$ , Où :
  - ✓ pour le stérile :  $P_p=871.06/2= 435.53$  t/poste
  - ✓ pour le minerai :  $P_p=1080.64/2= 540.32$  t/poste

### I .8.3. Production de la mine

L'analyse de la situation actuelle de la mine et de celle qui a prévalu pendant les années écoulées ; nous renseigne sur un déficit énorme en matière de découverte. Or il est admis que l'évolution harmonieuse des carrières doit tenir compte, et sur le même pied d'égalité du minerai et de la découverte; bien plus et compte tenu des impératifs de l'exploitation du minerai et le maintien de la demande sur ce dernier, les besoins des quartiers en matière de découverte se sont vu augmentés. Avec cette situation là ; l'extraction du minerai va connaître plus de difficultés à travers lamine.

Vu l'importance des réserves géologiques, la mine sera contrainait de changer ses stratégies de développement et en particulier le mode d'exploitation actuel.

**Tableau. I.4 :** La production programmé pour l'année 2018 et 2019 [1]

MFE	Mine de Boukhadra		
	DIVISION ETUDES ET DEVELOPPEMENT		
REALISATIONS ANNEE 2019			
DESIGNATION	PREVISION	REALISATION	TAUX
EXTRAIT CARRIERE(Mine) (T) Cubature	500 000	277594,66	56%
EXTRAIT SOUTERRAIN (mine) (T) Statistique	100 000	33586,00	34%
EXTRAIT CARRIERE + SOUTERRAIN (T)	600000	311180,66	52%
MINERAI CONCASSE (T)	600000	321500,00	54%
MINERAI EXPEDIE (T) BOUKHADRA	525000	356335,87	68%
STERILE MINE (T)Cubature	3900000	1338091,53	34%
STERILE PRIVE (T)Cubature	1700000	520431,62	31%
TOTAL STERILE (mine+enof) (T)Cubature	5600000	1858523,15	33%
MASSE ROCHEUSE MINE+ ENOF(T) CAR	6100000	2136118	35%
TAUX DE DECOUVERTURE (CARRIERE)	11,20	6,70	60%
AVANCEMENT HORIZONTAL FOND 3ème etage (m)	0	93,0	#DIV/0!
AVANCEMENT HORIZONTAL FOND 4 ème etage (m)	1200	22,50	2%
TOTAL AVANCEMENT HORIZONTAL FOND (m)	1200	115,5	10%

Etat des stocks au :31/12/2019

GAR			
E=	8529,05	NON CONCASSE:	4193,24

#### I .8.4. Durée de vie de la mine

$$T_v = T_c + R_{exp} / P_{an} + \text{text} ; \text{an}$$

Ou :  $T_c$  : est la durée de construction de la mine,  $T_c = 2$  ans ;  $R_{exp}$  : réserves exploitables  
 $R_{exp} = 12\ 000\ 000$  tonne ;  $P_{an}$  : production annuelle planifiée de la mine  $P_{an} = 287450t$  ;  
 $\text{text}$  : durée d'extinction de la mine,  $\text{Text} = 2$  ans ;  
 $T_v = 2 + (12\ 000\ 000 / 287450) + 2 = 45$  ans

# **Chapitre II:**

## **Les Moteurs asynchrone**

## II.1.Introduction

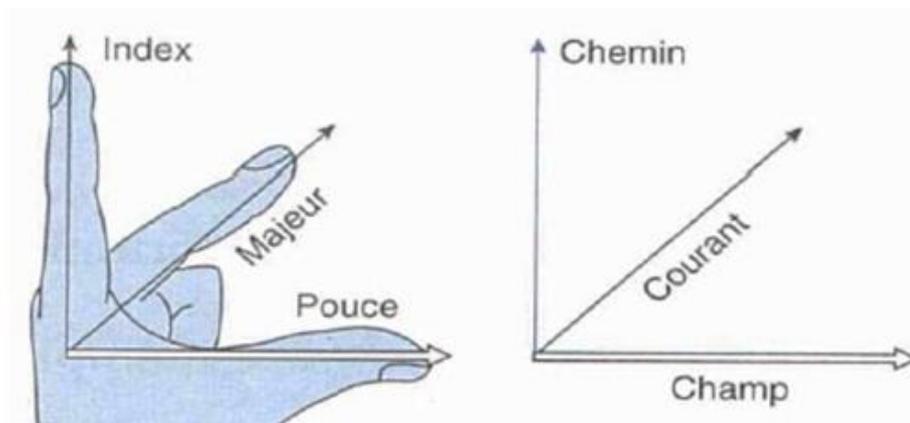
Le moteur asynchrone transforme l'énergie électrique apportée par le courant alternatif monophasé ou triphasé en énergie mécanique. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrée qui sont électriques et des grandeurs de sortie qui sont mécaniques. La conversion de l'énergie électrique s'effectue à 80% à l'aide de moteurs asynchrones triphasés grâce à leur simplicité de construction, à leur robustesse et à leur facilité de démarrage.



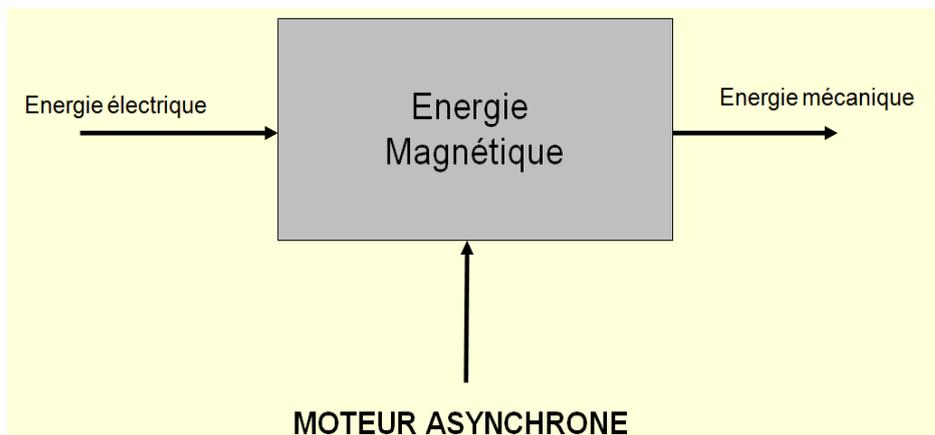
**Figure II.1** Coupe montrant les différentes parties constituant un moteur asynchrone [3].

Pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, les moteurs, ou machines tournantes, utilisent les lois de l'électromagnétisme, et en particulier la loi de Laplace.

En effet, l'action d'un champ magnétique sur un courant électrique produit une force  $F$  égale à  $F=B.i.l$ , ou  $l$  est la longueur du conducteur en m et  $B$  est l'induction magnétique en tesla.



**Figure II.2** Force de Laplace [4].



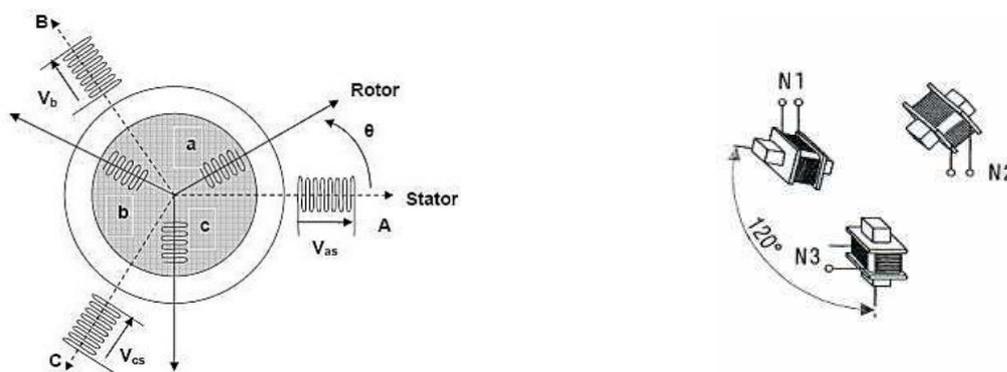
**Figure I.3** conversion énergétique du MAS [5].

## II.2.Principe de fonctionnement et constitution

Trois enroulements géométriquement décalés de  $120^\circ$  sont alimentés chacun par une phase d'un réseau triphasé alternatif.

Les enroulements sont parcourus par des courants alternatifs présentant le même décalage électrique  $120^\circ$ , ils produisent chacun un champ magnétique alternatif sinusoïdal.

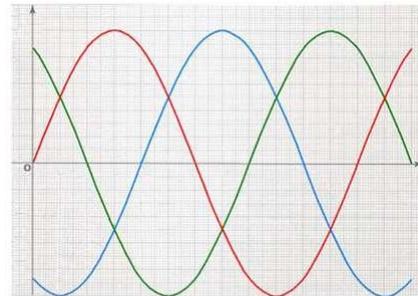
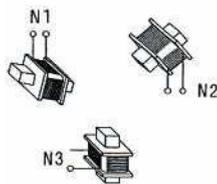
En combinant ces trois champs on trouve un champ tournant d'amplitude constante, ce champ effectue un tour pendant une période du courant d'alimentation avec une paire de pôle par enroulement [3].



**Figure II.4** Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor [3].

### II.2.1.Création d'un champ magnétique tournant

Chaque bobinage produit donc un champ magnétique alternatif sinusoïdal. Ce champ a une direction fixe (axe du bobinage) et un module variable (il est maximum quand le courant est maximum).



$$v_1 = \hat{V} \sin \omega t$$

$$v_2 = \hat{V} \sin (\omega t - 2\pi / 3)$$

$$v_3 = \hat{V} \sin (\omega t - 4\pi / 3)$$

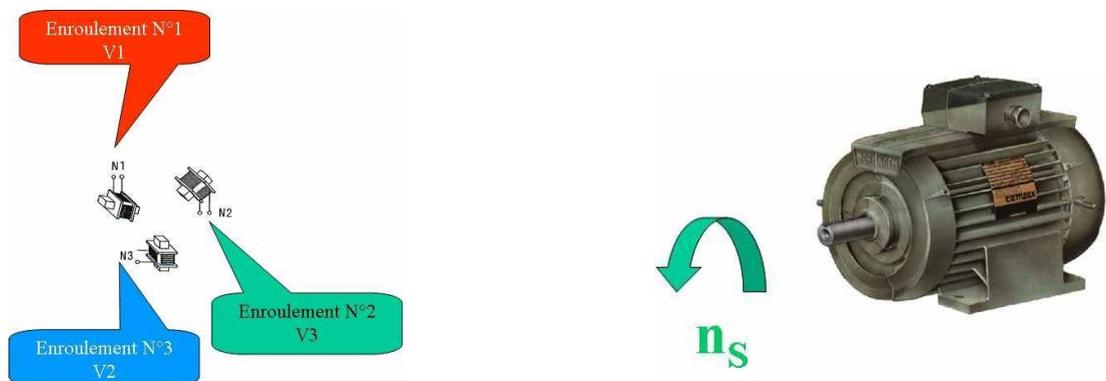
A tout instant, ce champ est la résultante de deux champs de module constant (la moitié de la valeur du champ maximum) qui tournent en sens inverse à la vitesse  $\omega[6]$ .

Cas N°1



**Figure II.5** Le champ tournant résultant tourne dans le sens Horaire à la vitesse  $n_s$

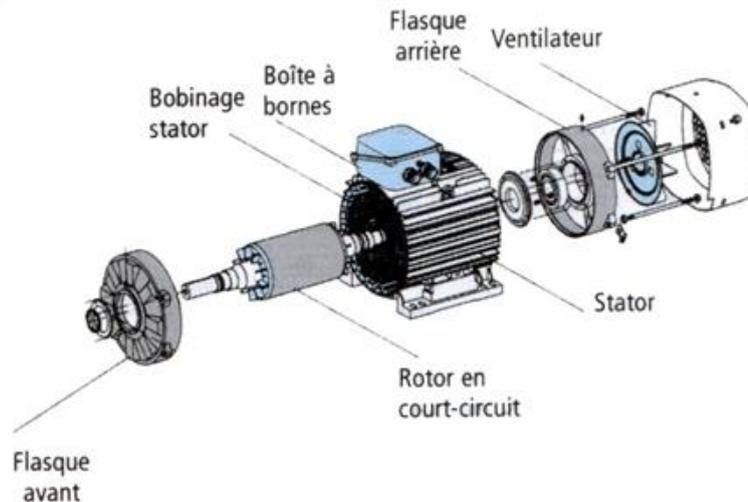
Cas N°2



**Figure II.6** Le champ tournant résultant tourne dans le sens Anti-Horaire à la vitesse  $n_s$

Quels que soient les constructeurs de machine tournante, nous constatons une très grande stabilité des techniques de construction. Par contre, les adaptations de moteurs à différentes applications sont de plus en plus nombreuses : moto-réducteur, moteur-frein, moto-pompe, génératrice asynchrone.

On classe les différentes pièces rencontrées dans toutes machine tournante selon les trois grandes fonctions réalisées :



**Figure II.7** les différentes pièces de MAS a cage [7].

- **Organes électriques :**
  - Circuit rotorique, en court-circuit ou bobiné
  - Circuit statorique bobiné
  - Plaque à bornes
- **Organes magnétiques :**
  - Circuit magnétique statorique et rotorique
- **Organes mécaniques :**
  - Carcasse supportant les flasques
  - Roulements
  - Arbre
  - Ventilateur
  - Tiges de montage
  - Fixation du moteur

### II.3.Le Stator

C'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale munies d'encoches. Des bobinages de section appropriée sont répartis dans ces dernières et forment un ensemble d'enroulements qui comporte autant de circuits qu'il y a de phases sur le réseau d'alimentation

## II.4.Le Rotor

C'est la partie mobile du moteur. Il est placé à l'intérieur du stator et est constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. [8].

Parmi les types les plus usités on distingue:

### II.4.1.Le rotor à cage (rotor en court - circuit)

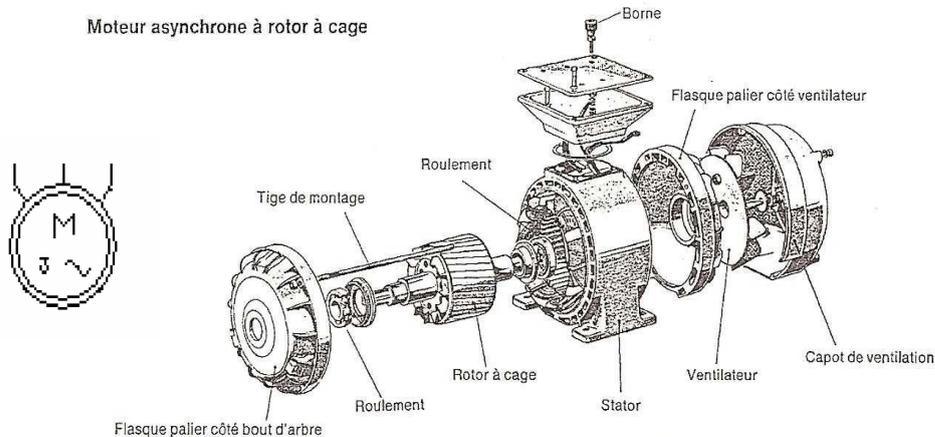
#### a. Rotor à simple cage

Dans des trous ou dans des encoches disposées vers l'extérieur du cylindre et parallèlement à son axe sont placés des conducteurs. A chaque extrémité, ceux-ci sont raccordés sur une couronne métallique. L'ensemble a l'aspect d'une cage d'écureuil.

#### b. Rotor à double cage

Ce rotor comporte deux cages concentriques, l'une vers l'extérieur assez résistante, l'autre intérieure de résistance plus faible. Au début du démarrage, le flux étant à fréquence élevé, les courants induits s'opposent à sa pénétration dans la cage intérieure. Le couple produit par la cage extérieure résistante est important et l'appel de courant réduit.

En fin de démarrage, la fréquence diminue dans le rotor, le passage du flux à travers la cage intérieure est plus facile le moteur se comporte alors sensiblement comme s'il était construit avec une seule cage peu résistante. [9].



**Figure II.8** Moteur asynchrone a rotor à cage [9].

#### c. Le rotor bobiné (rotor à bagues)

Dans des encoches pratiquées sur les tôles constituant le rotor sont logés des enroulements identiques à ceux du stator. Généralement le rotor est triphasé.

Une extrémité de chacun des enroulements est relié à un point commun (couplage étoile). Les extrémités libres peuvent être raccordées sur un coupleur centrifuge ou sur trois bagues en cuivre isolées et solidaires du rotor. Sur ces bagues viennent frotter des balais en graphite raccordés au dispositif de démarrage.

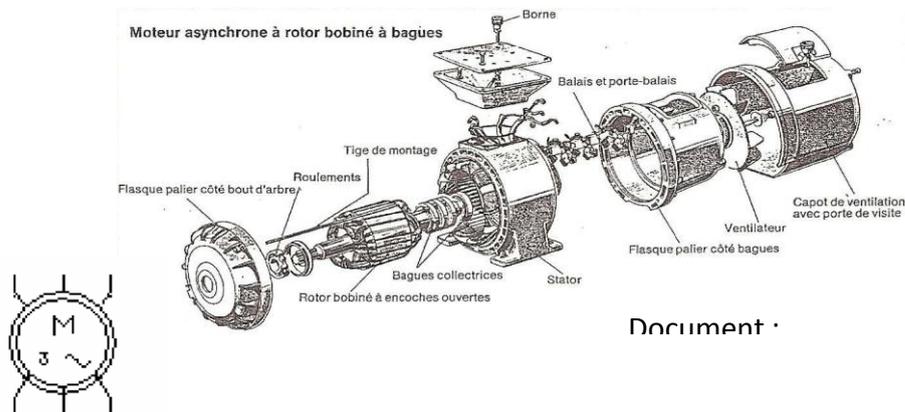


Figure II.9 Moteur asynchrone a rotor bobiné [9].

### II.5.Plaque signalétique

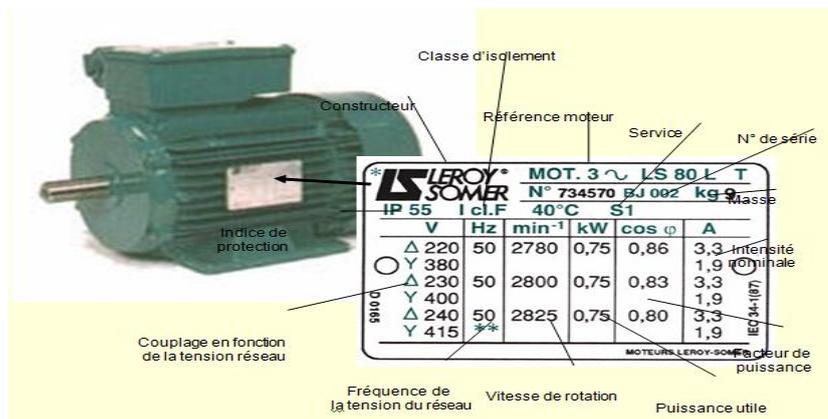


Figure II.10 plaque signalétique [5].

Sur la plaque signalétique, le constructeur indique:

- Le type du moteur
- Puissance utile
- vitesse de rotation
- Facteur de puissance
- Tension d'utilisation - couplage
- Caractéristiques de construction
- Indice de protection
- Classe d'isolation
- Service

## II.6. Caractéristiques et relations fondamentales

On utilisera les notations suivantes :

- U : tension entre phases en volts
- I : courant absorbé dans une phase du stator en ampères
- $\varnothing$  : angle de déphasage entre le courant et la tension
- $P_e$  : puissance électrique du moteur en watts
- p : puissance nominale du moteur en watts
- $\mu$  : rendement
- f : fréquence des grandeurs électriques statoriques en hertz
- $\omega$  : pulsation des grandeurs électriques statoriques en rd/s
- p : nombre de paires de pôles du moteur
- $\pi_s$  : vitesse angulaire de synchronisme en rd/s
- $\pi$  : vitesse angulaire de rotation du moteur en tr/min
- N : vitesse de rotation du rotor en tr/min
- g : glissement
- c : couple mécanique nominal fourni par moteur en N.m
- $c_m$  : couple maximum en N.m
- $c_d$  : couple de démarrage en N.m
- $I_d$  : courant appelé au démarrage en ampères

Puissance électrique absorbée :

$$P_e = \sqrt{3}.U.I.\cos\varnothing \quad \text{en triphase} \quad (\text{II.1})$$

pulsation des grandeurs électriques

$$\omega = 2 \pi f \quad (\text{II.2})$$

vitesse angulaire de synchronisme

$$\pi_s = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.3})$$

Glissement

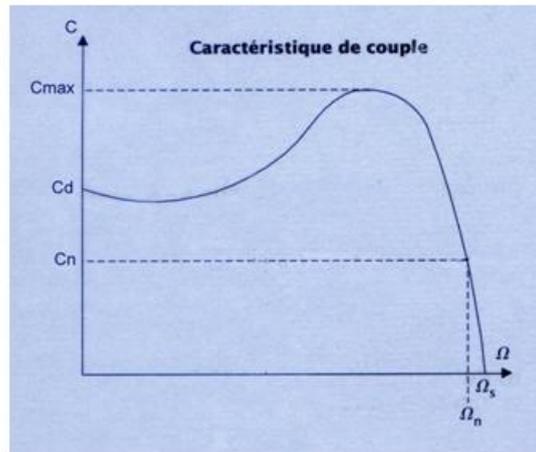
$$g = \frac{\pi_s - \pi}{\pi_s} \quad (\text{II.4})$$

vitesse de rotation du rotor

$$N = \pi \frac{60}{2\pi} \quad (\text{II.5})$$

puissance nominale

$$\begin{aligned} p &= c. p \pi \\ p &= \mu . P_e \\ p &= \mu. \sqrt{3}.U.I.\cos\varnothing \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

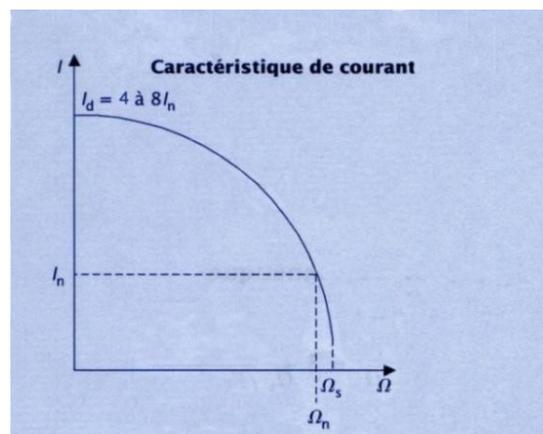


Les rapports donnés par les constructeurs sont en général :

$$0,6 \leq C_d/C \leq 1,5$$

$$2 \leq C_m/C \leq 3$$

**Figure II.11** Caractéristiques de couple [7].



**Figure II.12** Caractéristiques du courant [7]

Le fort appel de courant au démarrage nécessite l'utilisation de protections adaptées (fusible de classe aM ou disjoncteur courbe D).

## II.7. Plaques à bornes

C'est sur la plaque à bornes située dans la boîte à bornes, que sont raccordés les enroulements du moteur.

C'est également sur cette plaque que vient de raccorder l'alimentation du moteur

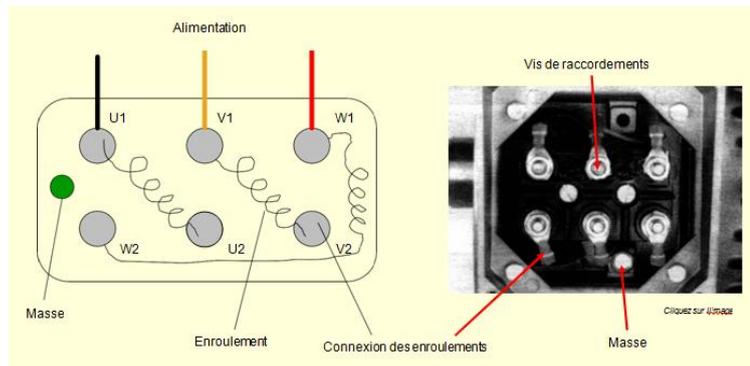


Figure I.13 cette plaque que vient de raccorder l'alimentation du moteur[8].

### II.8.Couplage

Le couplage des enroulements statorique permet de faire fonctionner les moteurs asynchrones sous deux tensions. Il est fonction de la tension du réseau et de la tension que peuvent supporter les enroulements.

Le couplage est réalisé par une connexion, à l'aide de barrettes, sur la plaque à bornes. Méthode:

Repérer la plaque signalétique sur laquelle le constructeur a indiqué les caractéristiques du moteur.

Extraire les indications se reportant au tension admissible par le moteur asynchrone ainsi que les couplages possibles [9].

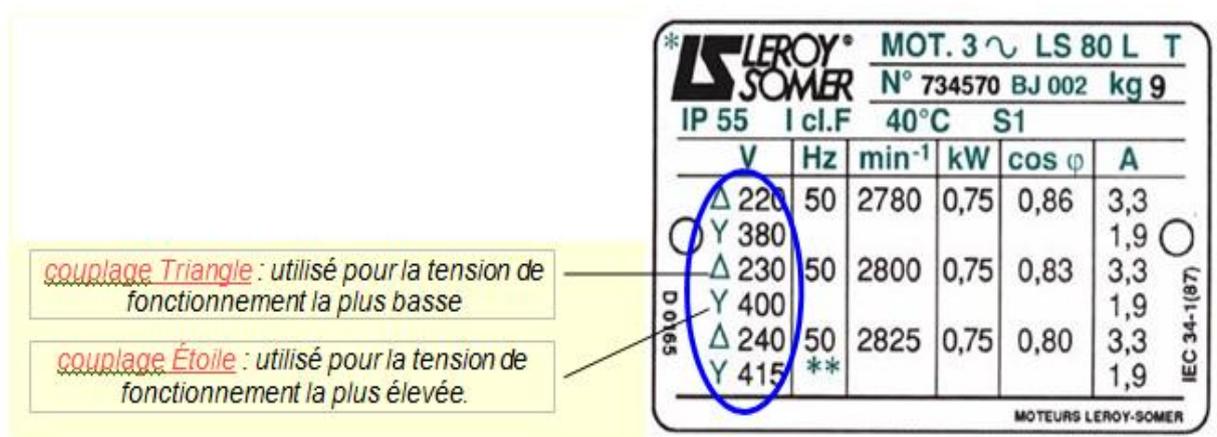


Figure II.14 Tensions lies type du couplage [9].

Le couplage en triangle ( $\Delta$ ) qui impose aux bornes d'un enroulement la tension composée du réseau

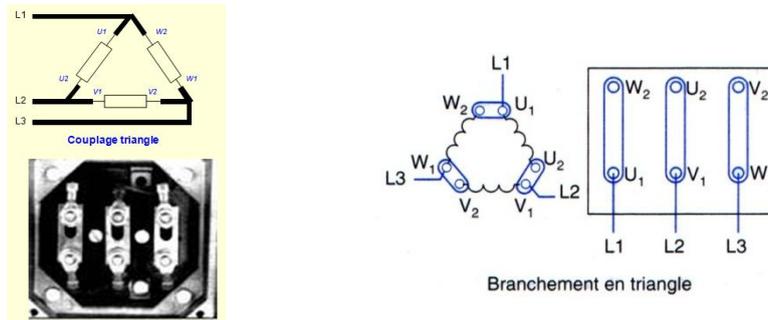


Figure II.15 Branchement en triangle [9].

Le couplage en étoile (Y) qui impose aux bornes d'un enroulement la tension simple du réseau :

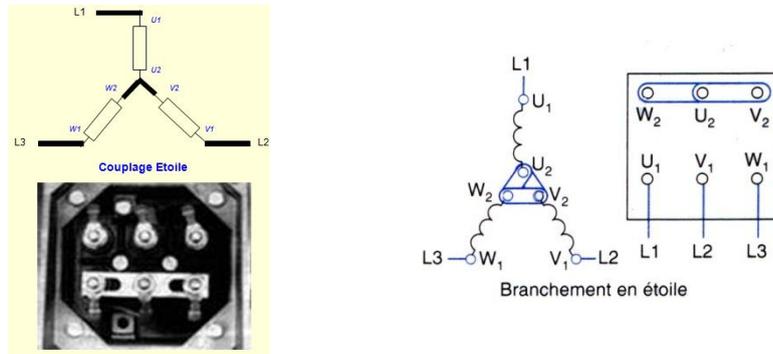


Figure II.16 Branchement en étoile [9].

Moteur rotor bobiné (rotor à bagues)

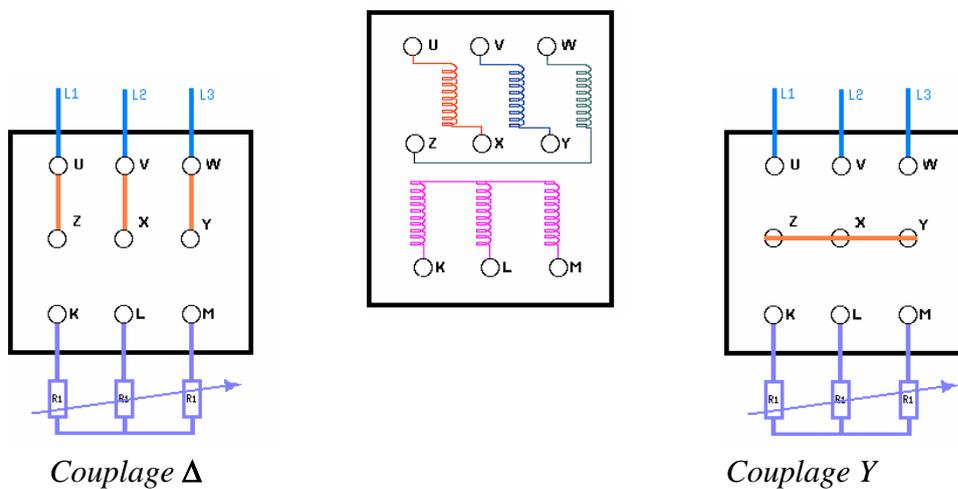


Figure II.17 Branchement en étoile-triangle en Moteur rotor bobiné [8].

### II.9. Caractéristique d'un moteur asynchrone triphasé

Les principales caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé sont :

- Le moment du couple nominal ( $M_n$ ) en Newton Mètre (Nm)
- La fréquence de rotation (N) en Tour par minutes (Tr/min ou  $\text{min}^{-1}$ )
- L'intensité absorbée (I) en ampères (A)

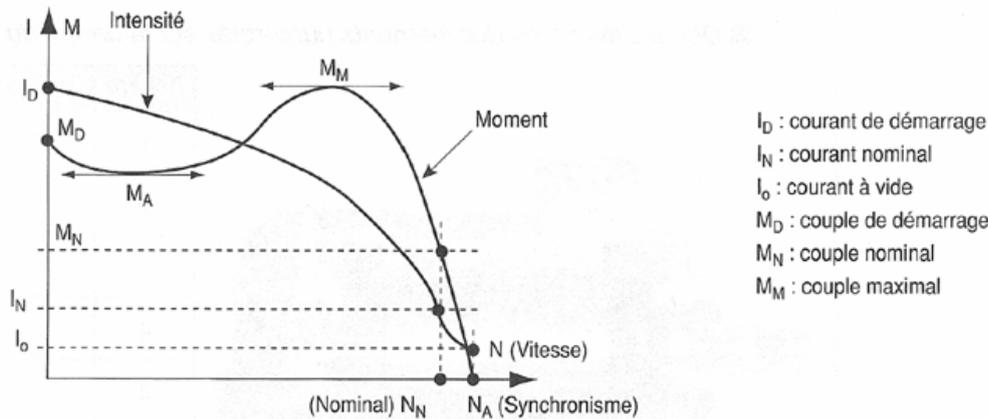
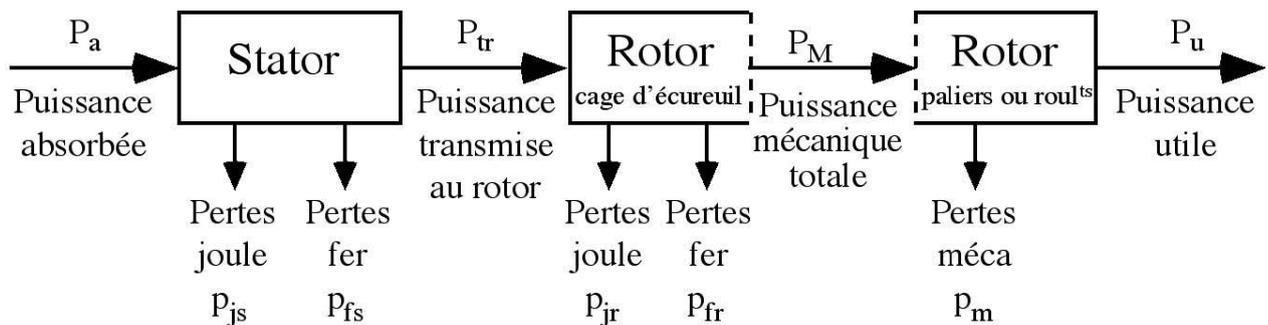


Figure II.18 Caractéristique d'un moteur asynchrone triphasé [9].

L'ensemble de ces caractéristiques et le moment du couple résistant définissent le point de Fonctionnement du moteur. En fonctionnement établi, pour que le système entraîné par le moteur fonctionne correctement, il faut que le couple moteur  $M_m$  soit égale au couple résistant  $M_r$ . Au démarrage, lorsque  $M_m$  est supérieur à  $M_r$ , le moteur accélère.

### II.10. Bilan des puissances



Puissance électrique absorbée :  $P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$

Pertes par effet Joule au stator :  $p_{js} = \frac{3}{2} R I^2$

Pertes par effet Joule au rotor :  $P_{jr} \approx g P_{tr}$

Puissance utile = puissance absorbée – pertes [4]

## II.11. Modélisation des machines asynchrones

Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS). Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques. Le modèle mathématique d'une Machine Asynchrone (MAS) nous facilite largement son étude et permet sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent. La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction du temps. Dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite « transformation de Park », qui consiste à transformer le système triphasé en système à deux axes orthogonaux. L'élaboration d'une telle modélisation est indispensable pour l'étude du régime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse. Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la modélisation de la machine asynchrone par :

- La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices.
- La simplification de ces équations par l'introduction de la transformation de Park.
- La mise sous forme d'équation d'état [10].

### II.11.1.LES HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

- Parfaite symétrie de construction.
- -Le circuit magnétique n'est pas saturé.
- -La variation des résistances des enroulements en fonction de la température négligeable.
- L'entrefer est constant.
- Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités des courants.
- Les pertes fer et les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont nulles.
- La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et celle du flux sont sinusoïdales.

## II.11.2. Equations électrique et magnétique

### II.11.2.1 Equations des tensions

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Ou bien :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II.8})$$

$[V_s]$  : la matrice de résistance par phase du stator.

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Ou bien :

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.10})$$

Le rotor est en court-circuit, donc les tensions rotoriques sont nulles et on peut écrire

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.11})$$

$[R_r]$  : la matrice de résistance par phase du rotor.

### II.11.2.2. Equations des flux

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$[L_S]$ : Matrices des inductances statoriques.

$[L_R]$ : Matrices des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$ : Matrices des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$ : Matrices des inductances mutuelles rotoriques.

$\theta$  : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisi comme axes des références.

$M_0$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor.

### II.11.2.3. Equations mécaniques

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$C_{em} = j \frac{d\pi}{dt} + C_r + f\pi \quad (\text{II.15})$$

### II.11.3. Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée – biphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (a b c) vers le repère mobile (d q). Pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques), on applique la transformation de Park. Pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle. Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider.

En effet, si l'on note  $\theta_s$  (resp.  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. Rotorique). Ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation suivante :  $\theta + \theta_r = \theta_s$

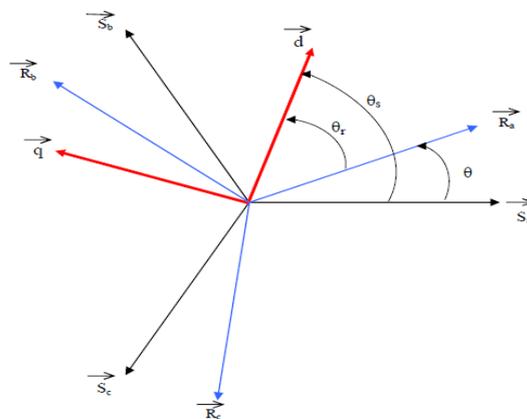


Figure II.19 Représentation des axes de la machine.

Tel que :  $X_{dq} = [p(\theta)]X_{abc}$

X : peut-être la tension, le courant ou le flux.

$[P(\theta)]$  est la matrice de la transformation de Park définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{3/2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$[P(\theta)]^{-1}$  : est la matrice inverse de Park :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{3/2} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

L'angle  $\theta$  correspond à la position du repère choisi pour la transformation.

$\theta = \theta_s$  pour le stator.

$\theta = \theta_r$  pour le rotor [12].

### II.11.3.1 Matrice de Passage

La matrice de la transformation de PARK qui conserve la puissance instantanée est définie par

[1] :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$[X_{abq}] = p(\theta)[X_{abc}]$$

La matrice de Park qui conserve la puissance est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{3/2} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

La matrice de Park qui conserve les amplitudes est défini comme suit :

$$P(\theta) = 2/3 \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

### II.11.3.2. Equations électriques

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} Q_{sd} - \omega_s Q_{sd} \\ V_{sq} &= R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} Q_{sq} - \omega_s Q_{sd} \\ 0 &= R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} Q_{rd} - (\omega_s - \omega_r) Q_{rq} \\ 0 &= R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} Q_{rq} - (\omega_s - \omega_r) Q_{rd} \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

### II.11.3.3. Equations magnétiques

$$\begin{aligned} Q_{sd} &= L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ Q_{sq} &= L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ Q_{rd} &= L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ Q_{rq} &= L_r I_{rq} + M I_{sd} \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

M : mutuelle entre le stator et le rotor.

### II.11.3.4. Equation du couple électromagnétique

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (Q_{rd} I_{sq} - Q_{re} I_{sd}) \quad (\text{II.23})$$

### II.11.3.5. Equation dynamique

$$C_e - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \omega_r \quad (\text{II.24})$$

J : Moment d'inertie des pièces tournantes.

$\omega_r$  : Vitesse mécanique du rotor en tr /mn [11].

## II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la machine asynchrone triphasée à alimentation directe avec une source purement sinusoïdale et sa modélisation.

# **Chapitre III:**

## **Différents types de concasseurs**

### III.1 Introduction

La fragmentation d'un solide s'opère sous l'action d'un champ de contrainte tridimensionnel non homogène généré par des forces en contact. Le concassage est une opération particulière dans l'ensemble des opérations de fragmentation. Il commence à un stade précoce de la réduction dimensionnelle, pour faciliter la manutention, l'homogénéisation et le stockage des matériaux.

Le concassage est une opération de réduction des dimensions du tout-venant extrait de la mine ou de la carrière jusqu'à l'ordre du centimètre. [13].

On distingue les types de concasseurs selon leur fonction dans l'usine de production de granulats, on a l'habitude de les classer d'après leur mode d'action. La fragmentation met en œuvre trois actions : compression, impact et attrition. Ces concasseurs n'ont bien sûr pas les mêmes objectifs, ce qui signifie qu'il est important de choisir le bon concasseur pour telle tâche spécifique.

### III.2. Les lois fondamentales de concassage

#### III.2.1. Rapport de réduction

On appelle rapport de réduction d'un concasseur la valeur du quotient qu'on obtient en divisant la dimension maximale des blocs de pierre qu'il est possible de faire rentrer, ou que l'on fait réellement rentrer dans le concasseur, par la dimension maximale des blocs qui quittent le concasseur après le concassage.

Ce rapport de réduction est une caractéristique quantitative du processus, indiquant, de combien de fois le produit concassé a été réduit.

$$I = \frac{D_{max}}{d_{max}} \quad (III.1)$$

$D_{max}$  = diamètre du plus grand morceau avant le concassage

$d_{max}$  = diamètre du plus grand morceau après le concassage

Pour les roches foisonnées, on tient compte des dimensions des ouvertures des cribles. Les fabricants de concasseurs utilisent le degré de concassage de construction calculé par :

$$I = B / b \quad (III.2)$$

$B$  = largeur de la trémie de réception du concasseur, mm.

$b$  = largeur d'ouverture du concasseur, mm.

Ce degré de concassage est également calculé en fonction des dimensions moyennes des morceaux avant et après le concassage :

$$I = D_{moy} / d_{moy} \quad (III.3)$$

Cependant, dans l'industrie on utilise plutôt les  $D_{80}$  et  $d_{80}$  pour caractériser une granulométrie donnée (diamètre de l'ouverture à travers lequel passent 80% de matériaux avant et après le concassage). [16].

### III.3. La consommation d'énergie dans un concasseur

L'absorption d'énergie pour réduire des fragments de roche est importante. La théorie de morcellement développée par Bond (1952) et appelée indice de travail ou indice de BOND, est encore employée aujourd'hui, bien qu'il y ait eu des avancées récentes (King et Schneider, 1995). En utilisant cette théorie, des besoins en énergie pour ramener des fragments de dimension d'alimentation de 80% à une taille du produit de 80% peuvent être calculés. L'équation de morcellement de Bond est la suivante :

$$W = 10w_i (1/p^{0.5} - 1/F^{0.5}) \quad (\text{III.4})$$

W = travail d'entrée, KWh /s. tonne (1 short tonne = 0.907 tonne métrique).

W<sub>i</sub> = indice de travail spécifique au type de matériau donnée, kWh/t (donnée expérimentale, 14 pour le minerai de fer).

P = 80% de la taille des passants du produit, micron

F = 80% de la taille des passants de l'alimentation, micron

L'une des raisons de l'utilisation de la troisième théorie de morcellement de Bond est que W<sub>i</sub> a été mesuré et rapporté pour plusieurs types de roches.

En employant ce rapport, On peut étudier le travail initial exigé pour différentes dimensions d'alimentation et les indices de travail dans les étapes du morcellement. [13].

### III.4. Types de concasseur et leur Principes de fonctionnement

Dans les machines opérant par compression, les morceaux subissent une action d'écrasement soit répétée, comme c'est le cas dans les concasseurs à mâchoires ou giratoires, soit continue comme dans les concasseurs à cylindres.

Dans les machines opérant par impact, les morceaux sont frappés violemment par un organe tournant à grande vitesse et projetés contre des enclumes, de façon à induire des fractures suivant les plans de clivage naturels de la roche.

Dans les machines opérant par attrition, c'est essentiellement l'abrasion qui est mise en jeu; ces machines sont surtout utilisées pour la production de sable.

Par convention, on classe les machines de concassage en fonction de l'action prépondérante qu'elles utilisent pour la fragmentation. [18].

Les concasseurs opérant par compression:

- Concasseurs à mâchoires
- Concasseurs giratoires
- Concasseurs à cône
- Concasseurs à cylindres
- Concasseurs à rotors dentés

Les concasseurs opérant par impact (choc) :

- Concasseurs à percussion à axe horizontal

- Concasseurs à percussion à axe vertical
- Concasseurs à cylindre de frappe
- Les concasseurs opérant essentiellement par attrition :
- Broyeurs autogènes et semi-autogènes
- Trommels concasseurs en particulier. [15].

### III.4.1. Appareils opérant par écrasement (compression)

#### III.4.1.1. Concasseurs à mâchoires

##### a. Principe de fonctionnement et description

Dans ces appareils, le matériau est écrasé entre deux mâchoires verticales, l'une mobile et l'autre fixe. Le passage du matériau à travers l'appareil se fait par gravité. Mais pour résoudre certains problèmes particuliers, il existe également un autre système appelé concasseur horizontal.

Les types les plus répandus de concasseurs à mâchoires verticales sont le concasseur à simple effet (ou plutôt simple volet) et le concasseur à double effet (ou plutôt à double volet). Mais actuellement dans l'industrie minière, seuls, sont utilisés les concasseurs à simple effet qui sont moins lourds (et donc moins chers) que les concasseurs à double effet. [15]. [13].

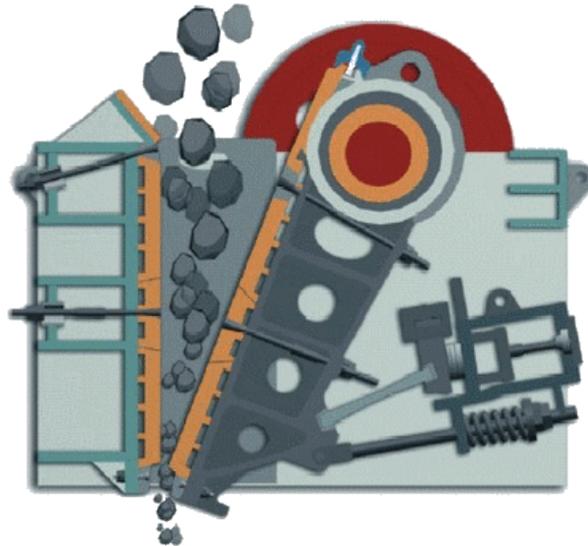
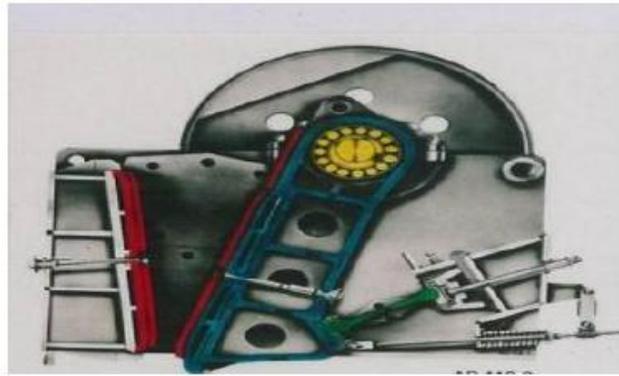


Figure III. 1. Concasseur à mâchoires [13].

##### - Le concasseur à simple effet (simple volet)

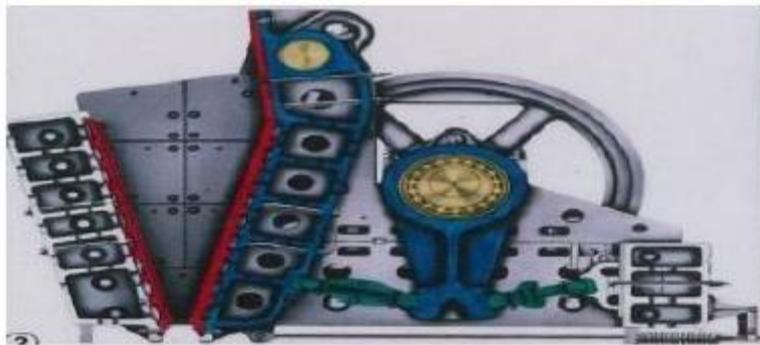
Dans un concasseur à simple effet la mâchoire mobile est liée à sa partie supérieure à un arbre excentrique, cependant que sa partie inférieure repose sur un volet articulé, qui lui confère un mouvement alternatif d'amplitude limitée, mais qui provoque une friction de la mâchoire contre les matériaux. On peut dire que la mâchoire mobile glisse de bas en haut, pendant la phase d'ouverture, puis de haut en bas, pendant la phase de fermeture, d'une quantité voisine du double de l'excentricité de l'arbre. [15].



**Figure III. 2.** Concasseur à mâchoire à simple effet. [16].

#### - Le concasseur à double effet (double volet)

La mâchoire mobile est portée par un balancier qui pivote autour d'un axe fixe situé à sa partie supérieure. Derrière ce balancier, une bielle est animée à sa partie supérieure d'un mouvement circulaire uniforme par un arbre excentrique à quatre paliers. Un système à deux volets entre les parties inférieures du balancier et de la bielle, d'une part, et bielle et bâti, d'autre part, permet de transformer le mouvement de la bielle en un mouvement alternatif périodique du bas du balancier. [15].



**Figure III. 3.** concasseur à mâchoire à double effet. [16].

**Remarque :** ce type de concasseurs à cause de leur prix, ne sont actuellement utilisées que pour la fragmentation des matériaux très abrasifs comme les Ferro - alliages, [16].

#### b. Utilisations et caractéristiques des concasseurs à mâchoires

Les appareils à mâchoires sont essentiellement utilisés en concasseurs primaires dans les carrières de roches massives et dures ou dans les mines, soit en installations fixes, soit en installations mobiles et semi mobiles. Dans tous les cas, ils doivent être alimentés au moyen d'une trémie, d'un distributeur et éventuellement d'un crible pour court-circuiter les produits dont la dimension est inférieure au réglage. [15].

### III.4.1.2. Concasseurs giratoires

Il existe deux familles distinctes de concasseurs giratoires :  
Les appareils à tête montée sur arbre guidé et porté et les appareils dits « A tête en porte à faux ». [18].

#### a. Principe de fonctionnement et description

Les concasseurs giratoires représentent les appareils les plus répandus dans les diverses étapes de préparation des minerais et des matériaux. [15].



Figure III. 4. Concasseur giratoire. [17]

#### - Les appareils à tête montée sur arbre guidé

Ces appareils sont utilisés dans toutes les applications primaires, mais existent aussi en applications secondaires .souvent préféré des appareils dits «à tête en porte à faux ». [15].

- Les appareils dits « à tête en porte à faux », Ils sont utilisés à partir du stage de concassage secondaire et dans les applications tertiaires.

On étudiera chacune de ces machines en fonction de leurs applications : Ils sont tous à arbre guidé et porté. L'arbre est guidé en tête, dans un étrier, au niveau de l'intersection des axes de l'arbre et du bâti de la machine, et porté en pied par un vérin permettant le réglage et la compensation de l'usure. L'entraînement se fait en pied par l'excentrique monté le plus souvent sur bague bronze, et parfois sur roulement.

Le mouvement y est transmis directement par l'intermédiaire d'un couple d'engrenages coniques formant à la fois réduction et renvoi d'angle (ou anciennement par poulie à axe vertical) La chambre de broyage, largement ouverte, a pour bissectrice une génératrice quasi verticale. L'évacuation des matériaux concassés s'effectue en sortie inférieure par décharge annulaire (ou par deux couloirs si entraînement direct par poulie à axe vertical).Pour les anciens appareils à tête suspendue, le réglage était réalisé par un écrou en partie supérieur de l'arbre. L'arbre est supporté par un vérin qui permet un réglage quasi instantané.

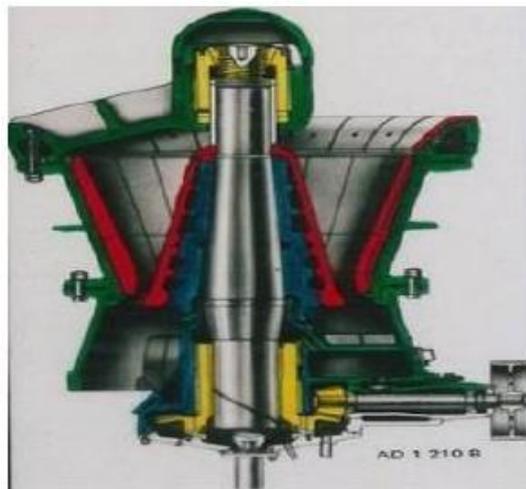
Les facteurs déterminant pour la production et le rendement des concasseurs sont, bien évidemment, le choix de la dimension, suivi de ;

- La vitesse de rotation ;
- L'angle de prise des matériaux entre les pièces bruyantes qui ne doit pas dépasser 280 sous peine de voir les blocs sauter dans la cuve de broyage. [13].

On caractérise habituellement les concasseurs giratoires primaires par la dimension radiale des ouvertures d'admission, exprimée en pouces, suivie du diamètre de la mâchoire mobile à sa partie inférieure, exprimée également en pouces. En effet, ce sont les deux chiffres caractérisant le mieux les possibilités de l'appareil, puisque le premier conditionne la dimension des blocs à l'alimentation et le second conditionne le débit dont l'appareil est capable pour un réglage donné.

- Le débit des concasseurs est, bien évidemment fonction de la dimension, et ensuite de la vitesse de rotation et de l'excentricité de l'arbre Concasseurs giratoires primaires ;
- Concasseurs giratoires secondaires ;
- Concasseurs giratoires tertiaires ;
- Concasseurs giratoires pour production de sable ; [15].

### b. Concasseurs giratoires primaires



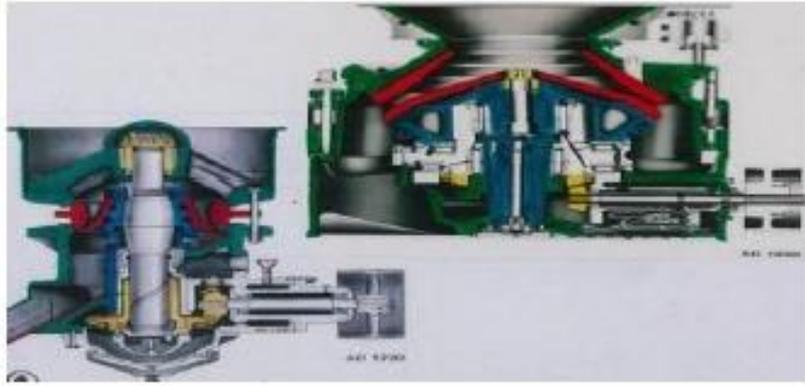
**Figure III. 5.** Concasseur giratoire primaire à tête guidée et portée. [16].

### c. Les concasseurs giratoires secondaires

Ce sont des appareils destinés à reprendre les matériaux pré-concassés à l'étage primaire afin de les ramener à une dimension admissible pour les appareils, La plupart du temps, ils ne sont pas utilisés pour fabriquer des matériaux fins, sauf les ballasts.

Le concassage secondaire assure un grand rapport de réduction 4 à 5 les contraintes suivent les mêmes critères comme le concasseur primaire tel que :

- Admission et dégagement des produits à concasser très libre
  - Angle de pincement dans la chambre de broyage déterminé à la limite de la préhension des matériaux à traiter. Les concasseurs giratoires secondaires, ce sont des appareils "à tête sur arbre en porte à faux" ce dernier système, présente plusieurs avantages :
    - Maintien d'un circuit fermé ;
    - Retour rapide au réglage établi de la mâchoire ;
    - Raideur des ressorts oléopneumatiques plus faible que les traditionnels ressorts mécaniques.
- [15].



**Figure III. 6.** Les concasseurs giratoires secondaires. [16].

#### **d. Les concasseurs giratoires tertiaires**

Ils ne diffèrent des concasseurs secondaires que par la géométrie de la chambre de concassage. Il s'agit donc de machine déterminante dans la chaîne de production de granulats routiers ou de béton, qui nécessite par ailleurs une qualité intrinsèque de grande dureté et une grande résistance à l'abrasion.

Les efforts des différents constructeurs, au cours des dernières décennies, ont porté sur la mise en évidence et la bonne application des conditions idéales d'exploitation, afin d'améliorer :

- Le coefficient de réduction ;
- Le coefficient d'aplatissement ;
- Le coût des pièces d'usure ramené à la tonne des produits finis ;
- Le rapport puissance absorbée/tonnage produit. Toutes ces conditions sont déterminées par :
- La forme de la chambre de concassage ;
- La vitesse d'excitation de la tête ;
- L'inclinaison de la tête par rapport au bol.

On recherchera dans les concasseurs giratoires tertiaires, des chambres très faiblement décroissantes en volume, pour assurer une bonne compacité des produits en cours de concassage. Une qualité régulière des produits est assurée par un réglage automatique continu de l'ouverture de la chambre de concassage. Ainsi tous les appareils tertiaires bénéficient du même développement d'assistance hydraulique décrit pour les concasseurs secondaires.

Le plus souvent, ces asservissements, hydrauliques sont pilotés par automate programmable asservi à :

- La puissance absorbée ;
- Le niveau des matériaux dans la cuve de réception ;
- Le débit de produit

Après étalonnage, il devient facile, à l'aide d'un mini-calculateur, d'assurer une maîtrise de la courbe granulométrique, au fur et à mesure de l'usure des pièces. [15].

#### **e. Les concasseurs à cône**

Les concasseurs à cône sont utilisés dans les étapes de broyage secondaire, tertiaire et quaternaire. Il arrive cependant, lorsque la granulométrie naturelle des

matériaux traités est suffisamment petite, que l'étape de broyage primaire classique ne soit pas indispensable. Dans un tel cas, les broyeurs à cône peuvent alors assurer l'étape primaire du processus de concassage.

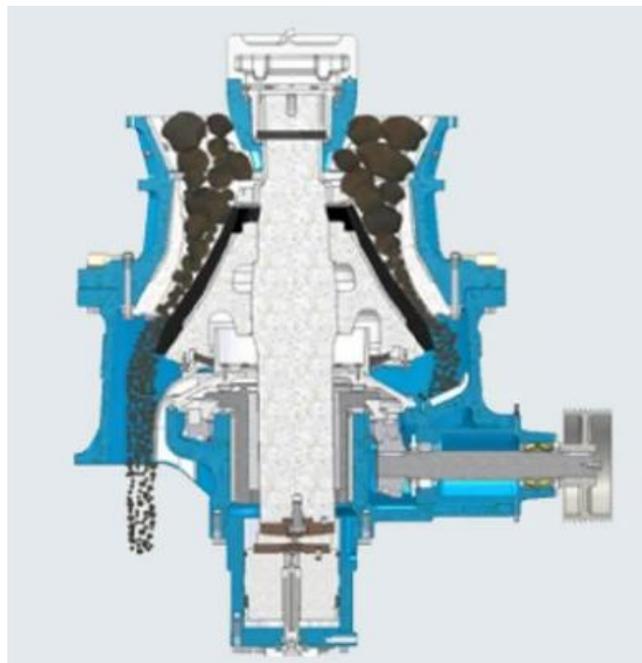
Les concasseurs à cône posés sont dotés d'un arbre fixe et les matériaux sont broyés dans une chambre, entre un élément extérieur fixe (la mâchoire fixe) et un élément intérieur mobile (la mâchoire mobile).

Un excentrique emmanché sur l'arbre fixe génère le mouvement d'oscillation de la mâchoire mobile entre la position ouverte et la position fermée, ainsi que l'ouverture de décharge.

La compression continue ainsi générée entre les mâchoires de la chambre entraîne la fragmentation des matériaux. Un effet de broyage supplémentaire se produit entre les particules compressées elles-mêmes, ce qui se traduit par une usure moins importante des mâchoires. On parle alors d'auto-concassage.

Le réglage de la machine est assuré en faisant tourner un bol afin de modifier la position verticale de la pièce d'usure supérieure (mâchoire fixe). L'un des avantages de ce type d'ajustement est une usure très régulière des mâchoires.

Afin d'optimiser les coûts et d'améliorer la forme des produits, il est recommandé de toujours alimenter les broyeurs à cône à plein, c'est-à-dire que la chambre doit toujours être aussi pleine de matériaux que possible. Cela peut se faire facilement en utilisant une trémie tampon pour réguler les inévitables fluctuations du débit d'alimentation en matériaux. Des dispositifs de surveillance du niveau permettent de détecter les niveaux maximum et minimum de matériaux et de réguler l'alimentation du broyeur en fonction.



**Figure III.7.** Concasseurs à cône [19]

### III.4.1.3 .Concasseurs à rotors dentés

#### a. Introduction

Les Concasseurs à rotors dentés sont des appareils à double (ou triple) rotor munis de divers organes coupants, sont utilisés pour des matériaux tendres ou collants.



**Figure III. 8.** Concasseurs à rotors dentés. [17].

Depuis une vingtaine d'années ce concept du double rotor a été repensé et développé par la société britannique MMD (Mining Machinery Développement). Il en résulte le développement d'un type un peu particulier de concasseur (pour le concassage grossier et moyen principalement) compacts, de profil bas, facilement intégrables dans les installations mobiles, capables de très gros débits et convenant, en particulier, à des matériaux humides et collants. [13]. [15].



**Figure III. 9.** Concasseur MMD série 500. [18].

#### b. Principe et description

Le principe de base repose sur le fait que la résistance à la compression d'une roche est de 8 à 10 fois plus importante que sa résistance à la tension. Le système MMD exploite donc la faiblesse inhérente de la roche au cisailage, utilise les plans de fracture naturels pour fragmenter les matériaux à une taille prédéterminée. Pour exécuter leur action de concassage, les concasseurs MMD utilisent de grandes dents implantées sur 2 rotors de diamètre relativement faible tournant en sens inverse qui effectuent la rupture en happant et en fragmentant le matériau lorsqu'il passe entre elles; la taille, le nombre et la forme des dents déterminent les dimensions du produit final. L'espace présent entre ces grandes dents permet aux matériaux les plus fins de passer à travers la machine sans autre dégradation, comme dans une opération de scalp à g.

Les blocs par contre sont pris et broyés par les dents en rotation.  
Des blocs de dimensions importantes peuvent être admis ; soit en gros 500 à 1500 mm.  
Donc ce système de concassage permet une hauteur réduite des appareils et des débits particulièrement élevés.

Ces machines pour les plus gros modèles, peuvent accepter de forts tonnages et de gros blocs (jusqu'à 2 m). La série 1500 peut débiter jusqu'à 10 000 t/h, fait moins de 2 m de haut.

Dans les mines de fond, où l'espace est réduit, les dimensions du matériel MMD présentent donc un avantage particulier. Les concasseurs MMD peuvent facilement être intégrés dans des installations mobiles ou semi-mobiles de concassage. Les concasseurs de type MMD peuvent être utilisés en concassage primaire, secondaire et même tertiaire (réduction jusqu'à 25 mm). Ces machines pour les plus gros modèles, peuvent accepter de forts tonnages et de gros blocs (jusqu'à 2 m).

Les concasseurs MMD ayant, par rapport aux concasseurs classiques, de faible dimension pour le même débit, présentent un rapport taille/débit plus petit, de même le rapport poids/débit est de l'ordre de la moitié de celui d'un concasseur classique.

Ces caractéristiques permettent de monter aisément ces machines sur roues ou chenilles, La vitesse réduite et les grandes dents facilitent le traitement des matériaux humides et collants. [13]. [15].

### **III.4.2. Appareils opérant par choc**

#### **III.4.2.1. Concasseurs à percussion**

##### **a. Généralités:**

Le principe général de la plupart des appareils opérant par chocs est simple: un rotor tournant à grande vitesse et portant un certain nombre de pièces de choc (percuteurs) fixes ou articulées lance le matériau sur des plaques dites de choc ou enclumes ou sur une couche du même matériau.

Dans les concasseurs à percussion, il faut que la vitesse d'impact soit au moins égale à 20 m/s pour provoquer la rupture du matériau. Pratiquement, la vitesse tangentielle des percuteurs est souvent nettement plus élevée. Ces machines fonctionnent donc sur le principe de la rupture des matériaux au choc, de manière quasi instantanée, par opposition à la rupture par écrasement. [15].

##### **b. Principe de fonctionnement**

Le fonctionnement de ces concasseurs se caractérise ainsi par rapport aux concasseurs opérant par écrasement:

- La courbe granulométrique des produits obtenus est beaucoup plus riche en éléments fins;
- Les produits sont sensiblement plus cubiques; le coefficient de réduction est élevé, surtout si l'on traite des matériaux fragiles;
- La consommation d'énergie est faible eu égard au rapport de réduction et au débit obtenu;
- Les chocs sont tels que le procédé n'est pas utilisable industriellement pour des matériaux trop durs. Les effets du frottement sont si intenses que les matériaux un peu abrasifs provoquent des coûts d'usure absolument prohibitifs ; cette usure pourra être contenue dans la mesure où l'architecture du concasseur privilégiera les chocs normaux, mais à partir d'un

certain degré d'usure inévitable, on générera des chocs tangentiels qui la précipiteront; on y a remédié dans une certaine mesure (appareils verticaux) en remplaçant les enclumes métalliques par une couche de matériaux, mais au détriment d'autres caractéristiques de ces appareils.

Ces machines sont divisées en deux types:

- Rotor à axe horizontal,
- Rotor à axe vertical.

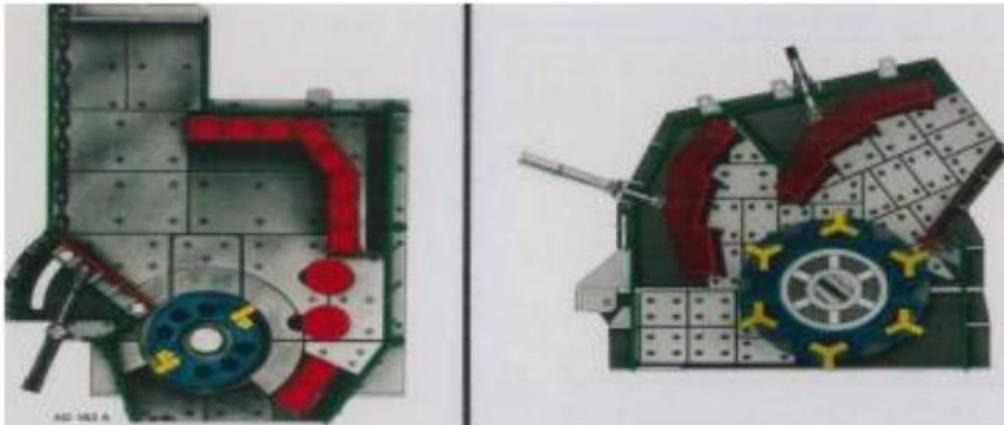
Seules celles du premier type effectuent du concassage primaire, car généralement la dimension maximum admissible à l'entrée ne peut dépasser 50mm dans le cas des appareils à axe vertical. [18].

### III.4.2.2. Concasseurs à percussion à axe horizontal

Cette famille est elle-même divisée en deux groupes : Les appareils à percuteurs rigides et ceux qui ont des percuteurs articulés.

#### a. Concasseurs à percuteurs rigides

Ils sont constitués d'un rotor cylindrique à vitesse variable muni de percuteurs et d'un bâti avec des plaques de choc. Constituant un, deux ou trois écrans réglables en position, en fonction du nombre d'étages de concassage recherché et du coefficient de réduction. Tous les paramètres de ces appareils sont réglables à distance, permettant ainsi leur intégration dans un ensemble automatisé. Ils ne possèdent pas de grille de sortie. [15].



**Figure III. 10.** Principe d'un concasseur à percuteurs rigides. [16].

Caractéristiques des concasseurs à percuteurs rigides :

- Le nombre d'écrans est généralement de 2. Cela permet de tirer partie de la machine en mettant deux étages de concassage, quelques machines sont de trois écrans pour augmenté encore le coefficient de réduction.
- Il est possible de régler la machine en agissant sur les écartements des écrans. Cela permet de "translater" la courbe granulométrique vers les dimensions plus importantes.
- Il existe un deuxième paramètre sur lequel il possible d'intervenir, la vitesse de rotation du rotor. Il s'agit d'un point très important. En effet, la vitesse de percussion. Qui peut varie de 25 à 55 m/s par exemple en position secondaire ou tertiaire.

A une influence directe sur la composition granulométrique. C'est à dire pouvoir faire varier la production granulométrique intermédiaire en fonction du marché. La courbe granulométrique n'est pas donc translatée (déplacement parallèle ou par affinité). [15].

#### **b. Concasseurs à percuteurs articulés**

Le principe est le même que le concasseur à percussion à percuteurs rigides, sauf que la chambre de broyage est ouverte à la partie inférieure. L'avantage est l'absence de bourrage. L'inconvénient étant le manque de contrôle granulométrique des matériaux sortant. Lorsqu'il est nécessaire d'effectuer un contrôle granulométrique des matériaux.

Par exemple dans le cas de la production de produits fins, le fabricant met une grille galbée à la partie inférieure. Le risque de bourrage apparaît et est atténué par le remplacement des percuteurs rigides par des percuteurs articulés. [15]. [16].

#### **c. Caractéristiques et Utilisation des concasseurs à percuteurs articulés**

Ces machines comportent généralement un rotor. il est possible d'adapter le diamètre du rotor, le nombre de marteaux et l'écartement des grilles aux matériaux et à l'application visée. Ces concasseurs ont été très employés en tertiaire, généralement après des concasseurs à percussion. Ces machines restent extrêmement sensibles à l'abrasivité des matériaux. Quand il s'agit de broyer des matériaux tendres et non colmatant, il est tenant de les utiliser en position primaire.

Il s'agit alors, dans la majorité des cas, du seul étage de réduction, dans ce cas, l'appareil comporte deux rotors.

Dans tous les cas, l'usure demeure un handicap. Ce phénomène se produit d'une part le, lancé du matériau, d'autre part à son impact. Les techniciens ont cherché à réduire, sinon à éliminer, le frottement au lancé. La solution consiste à réduire l'impact. [13]. [15].

#### **d. Avantages et inconvénients des concasseurs à percussion à axe horizontal**

Par leur conception, les appareils à chocs primaires sont des appareils permettant de très gros quotients de réduction. Surtout dans la mesure où l'on traite des matériaux fragiles.

Ces appareils permettent en particulier de produire un pourcentage important d'éléments fins. En revanche, leur emploi est absolument à proscrire lorsque :

- On a affaire à des matériaux tant soit peu abrasifs (plus de 5 à 8% du quartz ou de tout autre minéral dur) ;
- Le matériau à traiter est trop peu fragile aux chocs (calcaire tendre, craie, etc.);
- On ne veut pas produire d'éléments fins au poste primaire afin de pouvoir, par un criblage ultérieur, éliminer les matériaux sales avant l'étage secondaire. D'autre part ces appareils réclament des puissances installées très importantes pour faire face au passage des gros blocs. Le contrôle de la dimension des blocs à l'entrée doit être rigoureux.

En effet, il n'est pas possible d'aller extraire un bloc qui resterait coincé dans le gueulard d'admission sans ouvrir l'appareil, après l'avoir arrêté. Il ne faut pas oublier qu'avec son inertie, un tel appareil met souvent plus d'une demi-heure à s'arrêter à vide.

Du fait du grand coefficient de réduction et de la production directe d'éléments fins, de nombreux concasseurs à percussion ont été installés en cimenterie avec cependant certains

déboires dus, soit à l'usure importante, soit au mauvais rendement dans le cas de matériaux trop tenaces ou trop tendres.

Les concasseurs à marteaux secondaires sont couramment utilisés dans les carrières destinés à la préparation de granulats calcaires car. Outre la production importante de sable de qualité, ils permettent d'obtenir des gravillons de cubicité inégalable.

La granularité des matériaux produits par ces appareils varie fortement avec la vitesse de rotor. [15]. [18].

### III.4.2.3. Concasseurs à percussion à axe vertical



**Figure III. 11.** Concasseur à percussion à axe vertical. [17].

Il existe trois types de concasseurs à percussion à axe vertical.

#### a. Concasseur à impact unique

Les grains à projeter sont placés près du centre d'un plateau comportant des canaux allant du centre à la périphérie. Sous l'effet de la force centrifuge, les grains se déplacent vers la périphérie du plateau et le quittent pour amorcer une trajectoire aérienne et venir heurter soit des plaques de blindage, soit un talus de produit.

Au début de la trajectoire aérienne, la vitesse des grains est la composante de la vitesse relative des grains par rapport au plateau et de la vitesse périphérique du plateau au point où le grain quitte ce dernier.

Deux types de machines se présentent sur le marché :

- Dans l'un, on s'attaque essentiellement aux problèmes d'usure en limitant les contacts du matériau avec les organes de protection de la machine.
- Dans l'autre, on cherche au contraire à tirer le meilleur parti possible de ses qualités. [15].

#### b. Machines à double impact indirect

Ces machines sont équipées de deux rotors situés l'un au-dessus de l'autre. Et montés sur le même arbre. Après un premier impact, le matériau est guidé vers le deuxième rotor pour être à nouveau accéléré en vue d'un deuxième impact, créant un concasseur à double impact

indirect. Le premier rotor est normalement équipé d'un anneau blindé, tandis que le seconde peut être équipé soit d'un autre anneau blindé, soit d'un autogène. [15].

### c. La machine synchro concasseur

Il se distingue à impact classique en ce que le trajet des particules est totalement déterministe, évitent à la fois les perturbations à l'impact et les interférences entre les particules. Les particules sont d'abord guidées le long des pales d'un distributeur rotatif et projetées par les forces centrifuge. Avec une vitesse de décollage la plus faible possible. Sur une enclume tournant dans le même sens et positionnée transversalement sur leur parcours pour augmenter leur énergie cinétique grâce à l'accélération qui leur a communiqué. Après cet impact en Co-rotation, les particules rebondissent avec une vitesse plus élevée que leur vitesse d'impact. Cette vitesse de rebond permet un impact secondaire soit contre un anneau blindé (synchro Pactor), soit contre un anneau autogène (syncro CombiPactor), la collision s'effectue d'une façon totalement déterministe ; c.-à-d. Que les particules entrent en collision sans perturbation, essentiellement au même endroit, à la même vitesse d'impact et sous le même angle d'impact. [15].

#### III.4.2.4. Commentaires généraux sur les machines opérant par percussion

Le concassage à percussion constitue un progrès par rapport au concassage par écrasement : il permet le plus souvent des coefficients de réduction presque deux fois supérieurs, et l'obtention de matériaux riches en éléments fins, qui sont souvent utilisables. De plus, la forme des produits est nettement supérieure. Ces caractéristiques font que le concassage par percussion suscite à l'heure actuelle un intérêt considérable auprès des carrières.

Ces qualités sont malheureusement stérilisées par leur incompatibilité avec les produits un peu durs, comme les matériaux dits nobles pour la construction des routes ou la fabrication de ballast : les appareils où "caisses à pierres" remplacent les pièces d'usure perdent en effet une partie des avantages, que le principe des appareils à percussion leur confèrent. [15].

### III.5. Critères de choix d'un appareil ou d'une chaîne d'appareils

#### III.5.1. Données de base

Elles sont de deux sortes :

##### a. Les objectifs à atteindre :

- quantité à fragmenter,
- dimensions ou degré de fragmentation à atteindre des divers produits que l'on veut obtenir,
- sélection des divers constituants,

##### b. La nature et les propriétés de la roches (des matériaux) traités :

- Nature pétrographique,
- Abrasivité et pourcentage des constituants les plus durs.
- Résistance mécanique et fragilité
- Humidité et propreté,
- Dimension maximale des morceaux

Les appareils de fragmentation ayant la plupart du temps un coefficient de réduction relativement limité, il est rare que l'opération de concassage dans le cas d'un produit de carrière ou de mine souterraine puisse s'effectuer au moyen d'un seul appareil. En fonction de

la nature de la roche et du débit à assurer. Il y aura une cascade de machines de concassage associées à des cribles permettant soit de les court-circuiter. Soit de préparer les granulométries éventuellement nécessaires pour la commercialisation (granulats) ou la libération (Pré-concentration d'un minerai). Ces étapes de réduction granulométrique sont appelées "concassage primaire, secondaire, tertiaire et Quaternaire"[13].

La granulométrie à l'entrée d'un appareil (et particulièrement la taille des plus gros blocs) et le débit qu'il doit assurer permettent de définir sa taille dans le type choisi. En général l'un de ces deux critères imposera le choix de l'appareil qui pourra être surdimensionné pour l'autre critère.

- On devra tenir compte de la charge circulante prévue, ainsi que du rendement et de la capacité d'admission du type d'appareil choisi, en fonction de l'usure moyenne des pièces bruyantes, en effet.
- dans un appareil giratoire, l'ouverture d'entrée diminue par la remontée de la noix en fonction de l'usure.
- dans un appareil à mâchoire ; la dimension des plus gros éléments produits augmente en fonction de l'usure de la denture des mâchoires.
- dans un appareil à percussion, la proportion des éléments fins du produit diminue beaucoup avec l'usure de percuteurs ou des marteaux.
- dans un appareil à cylindres dentés, la prise des blocs est beaucoup moins bonne lorsque les dents sont usées.
- Dans la détermination du schéma de concassage, il y a lieu de tenir compte.
- Que même si un concasseur permet de réaliser un rapport de réduction élevé, il a été prouvé qu'il est plus efficace de le faire fonctionner avec un réglage moyen plutôt qu'avec le réglage qui offre le plus grand rapport de réduction.
- De la nécessité de prévoir dès la conception du schéma de nouvelles données d'exploitation venant d'impératifs commerciaux nouveaux (par exemple une modification de la granulométrie des granulats issus du concasseur tertiaire).
- De l'ouverture du concasseur primaire doit permettre l'admission des blocs provenant de la carrière ou de la mine.
- Qu'en fonction de l'abrasivité de la roche, on peut opter pour un appareil à percussion, ou un appareil opérant par écrasement. [13].

### **III.5.2. Eléments du choix du concasseur primaire**

L'ouverture du concasseur primaire doit permettre l'admission des blocs provenant de la carrière ou de la mine dont la taille dépend du programme prévu pour l'abattage. En fonction de l'abrasivité de la roche, on peut opter pour un appareil à percussion, ou un appareil opérant par écrasement. [15].

#### **III.5.2.1. Matériaux non abrasifs (calcaires, charbons, phosphates, bauxites)**

Le concassage par percussion peut être judicieux eu égard à l'énergie spécifique qu'il demande et aux grands coefficients de réduction qu'il permet, pouvant aller jusqu'à 10. Il est cependant générateur d'une plus grande quantité de fines. Il est surtout utilisé pour des applications où on ne désire pas obtenir de granulométries intermédiaires (cimenterie par exemple).

Il est à noter que pour des matériaux friables on pourra opter pour un concasseur à cylindres, opérant en compression. [15].

### III.5.2.2. Matériaux abrasifs (La grande majorité des roches et des minerais)

Le concassage par compression s'impose et la capacité de production prévue fixe en général le choix entre appareil à mâchoires et appareil giratoire.

Pour les débits inférieurs à 600 t/h, on utilise essentiellement des concasseurs à mâchoires à simple effet, lorsque la roche est très dure et très résistante. Le coefficient de réduction est au maximum de 4,5 à 5. C'est donc la dimension  $n$  des plus gros blocs qui détermine le choix de l'ouverture du concasseur, donc de sa taille. Et on vérifie généralement que son débit nominal est compatible avec le débit prévu. Toutefois, En règle générale, la dimension des plus gros blocs doit être inférieure ou égale à 80 % de l'ouverture du concasseur. Il y a lieu également de tenir compte que les concasseurs à mâchoires ont tendance à laisser passer des blocs surdimensionnés par rapport à la taille recherchée.

Pour les débits compris entre 600 et 1000 t/h, le choix est plus controversé. Toutefois, on donne généralement l'avantage au concasseur à mâchoires si l'abattage a tendance à donner de gros blocs. Pour les matériaux à la fois très durs et très abrasifs, la préférence peut être donnée aux concasseurs giratoires.

Pour les débits supérieurs à 1000 t/h, seuls les concasseurs giratoires conviennent. C'est alors le débit qui en fixe la taille et on vérifie que l'ouverture est compatible avec la dimension des plus gros blocs. Il s'agit d'appareils très lourds nécessitant une grande hauteur pour leur installation. [15].

**Tableau III. 1.** Caractéristiques des appareils de fragmentation grossière (concasseurs). [14].

Appareil	Dimension maximale admise (mm)	Rapports de réduction normaux	Capacités maximale (t/h)	Energie consommée par tonne traitée
Concasseurs à mâchoires	2500	1/4 à 1/6	4000	0,4 à 2
Concasseurs giratoires primaires	1600	1/4 à 1/5	7000	0,25 à 0,75
Concasseurs giratoires secondaires	750	1/5 à 1/8	3000	0,5 à 1
Concasseurs à cônes tête standard	450	1/5 à 1/8	3000	0,75 à 1,5
Concasseurs à cônes tête courtes	175	1/4 à 1/7	1500	1,5 à 2
Concasseurs à cylindres cannelés	0,05 à 0,6 (diamètre)	1/3 à 1/4	2000	0,3 à 0,75
Concasseurs à percussion (percuteurs rigides)	2000	1/8 à 1/15	1200	0,2 à 0,6
Concasseurs à marteaux articulés	0,1 à 0,8 (diamètre)	1/10 à 1/30	1200	0,2 à 0,6
Emotteurs à fléaux et à chaînes	250	1/10 à 1/15	50	0,3 à 0,8
Trommels concasseurs	0,1 à 0,5 (diamètre)	25	400	0,1 à 0,3
Coupeuses et trancheuses	300	1/10 à 1/15	60	0,5 à 20
Déchiqueteuse	1200	1/2 à 1/10	200	0,1 à 50

### III.5.3. Cas particulier des produits humides et collants

Les appareils alimentés par simple gravité ne sont pas utilisables. On a alors le choix entre les concasseurs à cylindres qui peuvent être alors munis de peignes de décolmatage, et les concasseurs opérant par chocs munis soit d'un système de séchage à air chaud, soit d'une enclume mobile, ou encore les appareils autogènes ou semi autogènes à sec avec une circulation d'air chaud. [15].

### III .6.Conclusion

Les objectifs à atteindre et la nature et les propriétés de la roches et des matériaux traités est un facteur essentiel dans le choix de concasseurs adéquat. Le concassage par écrasements comme dans le cas de la mine de Boukhadra « concasseur a conne », rempli bien sa fonction de réduction des dimensions moyens de la roche. Néanmoins on a remarqué que certains gabarits font coincer le conne du concasseur et bloque son fonctionnement ; c'est pour cette raison que l'opérateur a souvent recours a la variation du rhéostat monté en série avec le circuit du rotor pour augmenter le couple ou la vitesse et décoincer le concasseur. après cela, l'entreprise minière a monté un brise roche sur le haut du concasseur pour procéder a la défragmentation de la roche hors gabarit.

**Chapitre IV :**  
**Les moteurs a reluctance variable**  
**MRV**

## IV.1. Introduction

Bien avant que la machine à courant continu n'arrive à maturité et occupe une place importante dans plusieurs applications industrielles, de nombreuses machines, connues aujourd'hui sous le nom de machines à réductance variable, étaient proposées. Parmi les inventeurs, citons le physicien "russe Jacobi" qui, dans un rapport présenté à l'Académie des sciences en 1834, propose d'appliquer l'électromagnétisme aux machines et décrit une structure tournante à réductance variable. On rapporte que le professeur et physicien américain "Charles Grafton Page" a réalisé entre 1835 et 1840 plusieurs dispositifs originaux à fer tournant.[20]

En France, vers 1840, l'ingénieur "Graiffe" a construit un moteur de démonstration. Ce moteur est aussi autopiloté mécaniquement. D'autres moteurs similaires furent conçus en 1837 par l'Américain "Davenport" pour actionner une presse d'imprimerie et par l'Écossais "Robert Davidson" en 1839 pour l'entraînement d'un tour.

En 1845, "Gustave Froment" réalise un moteur tournant performant, ancêtre des moteurs à réductance variable à double saillance. C'est vers les années 1910 que les moteurs pas à pas à réductance variable commencent à être appliqués à des entraînements différents. Une invention originale de l'ingénieur écossais "CLWalker" a fait l'objet d'un dépôt de brevet au Royaume-uni en 1919. [20]

Les machines à réductance variable ont été cependant, d'un emploi assez restreint à cause de leur facteur de puissance et de leur rendement faible. Ce n'est que dans les années 60 qu'on s'est intéressé de nouveau aux moteurs à réductance variable

"Multon" (1994) présente une étude de l'historique et traite des aspects de conception, d'alimentation et de modélisation des machines à réductance variable. [20]

## IV.2. Classification des MRV

Dans l'industrie électromécanique, il a été convenu de classer les moteurs selon le type d'énergie électrique (directe ou alternative). Mais cela n'empêche pas certaines classifications de considérer des formes géométriques et des types de mouvements (linéaires, rotatifs ou combinés)... etc. Grâce à une recherche documentaire, nous avons constaté que le MRV ne correspondait pas à la classification évidente. En effet, pour une même forme géométrique, ils peuvent utiliser un fonctionnement en énergie continue (comme le MRV doublement saillant pur) ou en énergie alternative (comme la synchronisation, le vernier, le MRV hybride), ... etc.

Certains auteurs [21] ont tenté de trouver sa place dans « l'arbre généalogique » du moteur. Sans le collecteur, le MRV est placé sur le côté du moteur à courant alternatif, comme le montre la Figure IV.1.

## IV.3. Topologies des MRV tournantes

Les MRV peuvent être à mouvement rotatif ou linéaire, mais dans notre cas nous allons nous intéresser aux machines tournantes. Il existe plusieurs configurations géométriques pour les MRV rotatifs, les plus usuelles sont celles qui considèrent le nombre de pôles statoriques plus élevé que le nombre de pôles rotoriques (cela n'empêche pas que dans certains cas le rotor contient plus de dent que le stator).

Le choix du nombre des dents et des phases doit se faire par rapport à l'application envisagée et aux performances souhaitées. Les critères qui peuvent influencer le choix pour une topologie particulière incluent, entre autres [22]:

- La valeur du couple et sa forme en régime transitoire et en régime permanent ;
- Le type d'alimentation et le circuit de commande utilisé ;
- Les chemins de flux magnétique et les pertes fer produites.

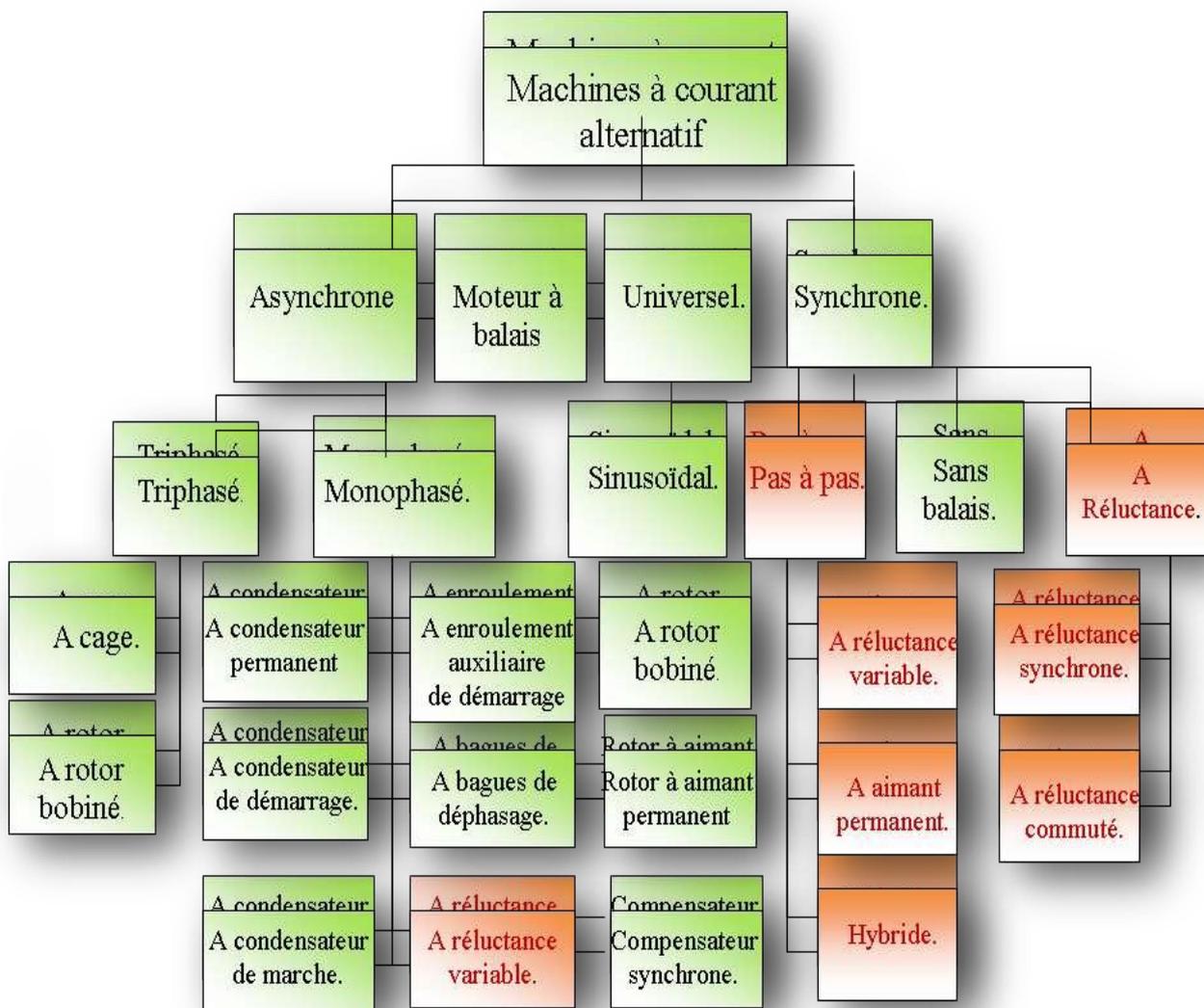


Figure IV.1 : «Arbre généalogique » des MRV

Les principales configurations géométriques des MRV rotatifs sont comme suit :

### IV.3.1. Les MRV purs

La machine à réluctance variable "pure" comporte des dents sur le stator et sur le rotor. Seules les bobines statoriques sont alimentées en courant. Le rotor ne contient ni aimants ni enroulements (Figure IV.2).

La structure simple du MRV lui donne des grands avantages par rapport aux autres

solutions aussi que des inconvénients importants comme les ondulations du couple dues à la double saillance et le caractère fortement non-linéaire des effets électromagnétiques pendant le fonctionnement. À cause de ces effets, la modélisation du moteur et la stratégie de son alimentation-commande sont assez compliquées.

Le courant dans les phases du moteur est commuté en fonction de la position du rotor (auto-commutation) pour profiter de la variation de l'inductance entre la position alignée et non-alignée des dents rotoriques par rapport aux dents statoriques. Ce mode d'alimentation-commande entraîne la nécessité d'une partie électronique de contrôle spéciale pour gérer le fonctionnement de l'onduleur et la détection précise de la position du rotor.

Le choix du nombre des dents et des phases doit se faire par rapport à l'application envisagée et aux performances souhaitées. Les critères qui peuvent influencer le choix pour une topologie particulière incluent :

- La caractéristique de fonctionnement par le biais de la valeur du couple et sa qualité (ondulations et bruit), les demandes mécaniques lors du démarrage et les performances énergétiques lors du freinage récupératif.
- Le type d'alimentation (triphase, monophasé, etc.) et l'onduleur utilisé
- Les chemins de flux magnétique et les pertes de fer produits.

Le nombre des dents statoriques et rotoriques est normalement pair et la liaison entre les deux valeurs est donnée par:  $N_s = N_r \pm 2$

Les moteurs avec un nombre plus grand des dents sont obtenus à partir des  $\sigma$ τυρχτυρεσ de base, on multipliant  $N_s$  et/ou  $N_r$ [23]. On peut citer divers types de structures de MRV pures [24]:

- Structures à double denture à gosses dents à 2 dents par phase (figure IV.2) ;
- Structures à double denture à gosses dents à plus de 2 dents par phase.
- Structures à pôles statoriques dentés (« petites dents ») où un bobinage excite
- plusieurs dents à la fois : on parle de « bobinage global ».

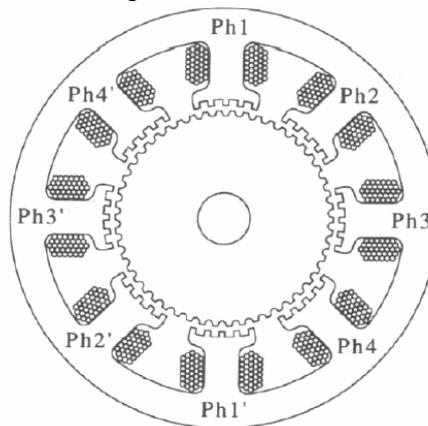


**Figure IV.2 :** MRV pur à grosses dents.

### IV.3.2. Les MRV à effet Vernier

Certaines machines Vernier ont des structures identiques aux MRV pures sauf qu'elles sont alimentées en courant alternatif sinusoïdal et non en créneaux. On distingue les machines

dites « Vernier à grand nombre de dents », qui possèdent deux armatures saillantes : sur chaque armature, les dents sont identiques et équiréparties mais les nombres de dents statoriques et rotoriques sont légèrement différents (similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse), ce qui permet d'obtenir une perméance sinusoïdale (Figure IV.3 )



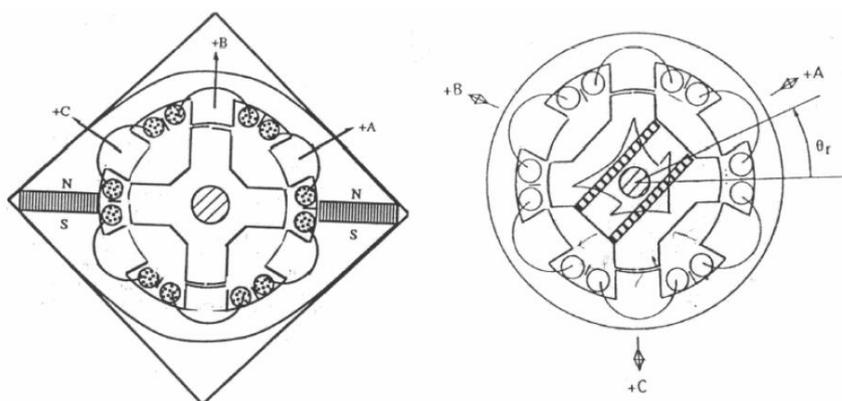
**Figure IV.3 :** MRV à pôles statoriques dentés

On trouve aussi les machines « Vernier à grosses dents » dans lesquelles chaque pôle statorique constitue lui-même la dent. Les nombres de pôles sont alors relativement faibles et les performances couple-vitesse sont comparables à celles des machines asynchrone et synchrone à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines.[25]

### IV.3.3. Les MRV hybrides

Par rapport aux précédentes structures, la particularité des MRV hybrides réside dans l'intégration d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances.

L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé mais on s'éloigne des structures à réluctance pure. Il est cependant intéressant de signaler deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRV : l'une met en œuvre des aimants placés au rotor [26] , la machine se rapprochant des machines synchrones à aimants enterrés (Interior Permanent Magnet) ; la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure et utilise des aimants placés au stator[24]: on obtient alors une machine à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée » figure II.4.



**Figure IV.4 :** Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance

La MRV de la figure IV.5 met en œuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet vernier pour une alimentation sinusoïdale. Le grand nombre de dents de la machine à « plots aimantés » de la figure IV.6 rend cette structure intéressante pour les forts couples[27].

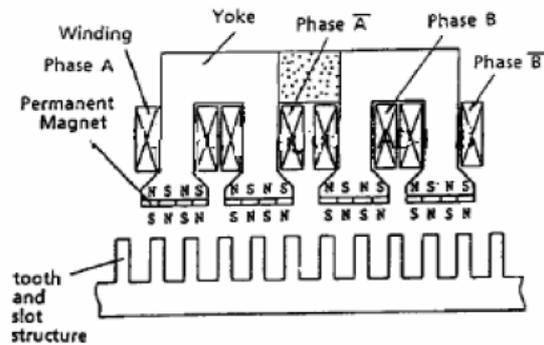
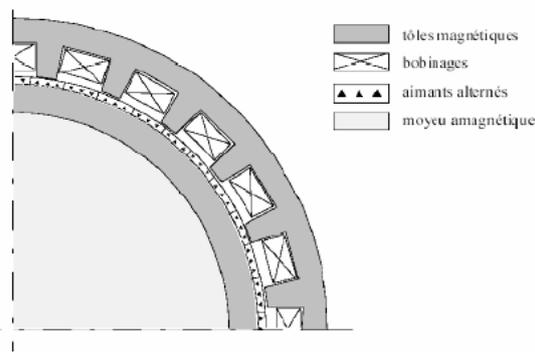


Figure IV.5 : MRV hybride à effet vernier aimants

Figure IV.6 : MRV à plots à aimants

#### IV.4. La géométrie du MRV 16/12 étudié

Dans cette mémoire, notre choix a été porté sur un MRV à 16 dents statoriques et 12 dents rotoriques, vu la simplicité de sa géométrie et de son alimentation. Le MRV 16/12 que nous allons étudier fait partie des MRV purs à deux dents par phase; l'entrefer présente une géométrie plus ou moins dentée de part et d'autre. Comme toute machine tournante, il comporte plusieurs parties : [28]

- Le stator qui est constitué de tôles magnétiques empilées et ayant seize (16) pôles autour desquels sont disposés des enroulements concentriques. Les enroulements de deux pôles diamétralement opposés sont reliés en série et forment une phase.
- Le rotor quand à lui, ne comporte aucun élément actif (bobinage ou aimant permanent), et il est constitué lui aussi de tôles magnétiques empilées ayant douze (12) pôles saillants (Figure IV.5).
- L'entrefer possède une géométrie dentée due aux pôles saillants du stator et du rotor. Cette géométrie varie durant le mouvement.
- Des bobinages concentriques simples.
- L'arbre sur lequel tourne le rotor.
- Un convertisseur électronique qui assure l'alimentation des phases et la commutation.

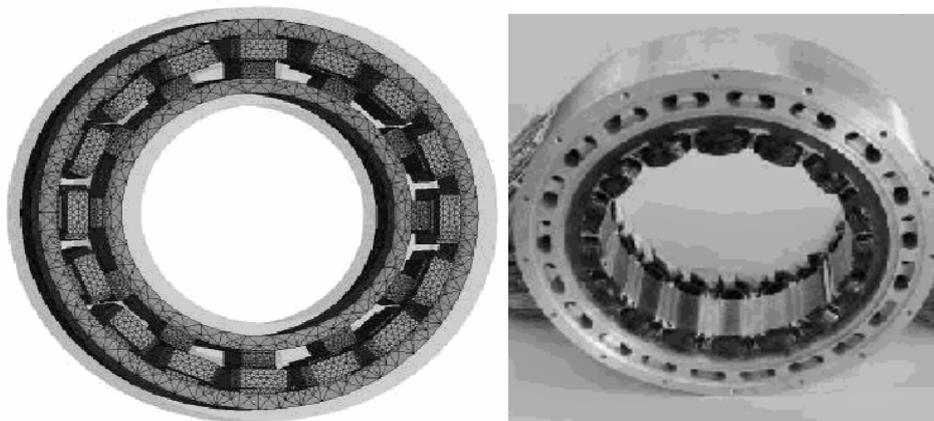


Figure IV.7 : Structure du MRV 16/12 étudié.

## IV.5. Paramètres caractéristiques du MRV

Le MRV est caractérisé par plusieurs paramètres qui déterminent la durée de commutation et le sens de rotation.

### IV.5.1. Le pas incrémental

Le pas incrémental du MRV est l'angle entre la position de conjonction et celle d'opposition. C'est une grandeur très importante pour déterminer les durées d'alimentations des bobines et les périodes de commutation des composants du circuit d'alimentation.

On désigne le pas polaire statorique  $\alpha_s$  tel que:

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{N_s} \quad (\text{IV.1})$$

Le pas polaire rotorique  $\alpha_r$  par :

$$\alpha_r = \frac{2\pi}{N_r} \quad (\text{IV.2})$$

Pour une machine symétrique, l'espacement des pôles statorique et rotorique est régulier. Entre deux commutations, le déplacement angulaire sera égal à la différence entre  $\alpha_s$  et  $\alpha_r$ . Le pas incrémental  $\alpha_p$  sera donc égal à:

$$\alpha_p = |\alpha_r - \alpha_s| \quad (\text{IV.3})$$

Dans le cas d'une MRV 16/12 nous aurons  $\alpha_s=22^\circ30'$ ,  $\alpha_r=30^\circ$  et le pas polaire  $\alpha_p=7^\circ30'$ . Chaque bobine sera donc excitée pendant une période de.

### IV.5.2. Le sens de rotation

Le sens de rotation du rotor du MRV dépend lui aussi du nombre de pôles statoriques  $N_s$  et rotoriques  $N_r$

Si  $N_s < N_r$  ou  $\alpha_s > \alpha_r$  alors :

$$\alpha_p = \alpha_s - \alpha_r \quad (\text{IV.4})$$

Le sens de rotation du rotor est identique au sens de l'alimentation des bobines statorique.

Si au contraire  $N_s > N_r$  ou  $\alpha_s < \alpha_r$  alors :  $\alpha_p = \alpha_r - \alpha_s$  (IV.5)

Le sens de rotation du rotor est alors opposé à celui de l'alimentation des bobines statorique avec.  $\alpha_r = q \cdot \alpha_p$

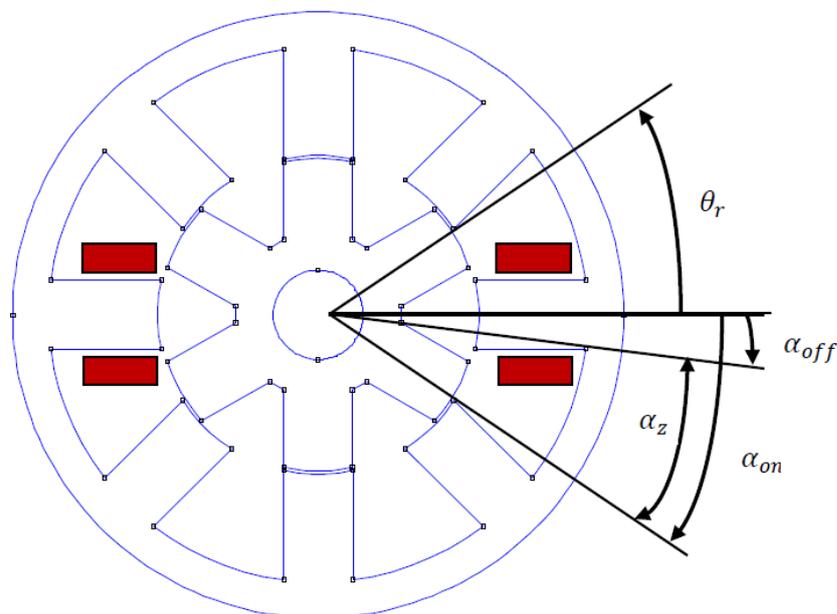
Pour un MRV 16/12 le sens de rotation est donc contraire au sens d'alimentation des phases. Le nombre de pas par tour est donné par :

$$N_p = \frac{2\pi}{\alpha_p} \quad (\text{IV.6})$$

Pour notre MRV nous obtiendrons  $N_p = 24$ , cela revient à dire que : pour que le rotor fasse un tour complet, il faut alimenter les 8 phases 24 fois ; c'est un MRV 16/12 à 8 phases et 24 pas.

### IV.5.3. Principe de fonctionnement et système d'alimentation de la MRV

La question la plus fondamentale dans le contrôle des moteurs à reluctance variable est associée à une alimentation adéquate et synchronisée des enroulements du moteur d'une manière séquentielle. La Figure IV.8 représente la section transversale d'une MRV 12/10 et les positions  $\alpha_{on}$  et  $\alpha_{off}$  du rotor pour lesquelles des enroulements de chaque phase sont successivement magnétisés et démagnétisés à partir d'une source externe. Il existe deux positions extrêmes des dents du rotor par rapport aux dents du stator, la position d'opposition (unaligned position) et la position de conjonction (aligned position), cette dernière correspond à la superposition de l'axe des dents du stator et l'axe des dents du rotor. L'enroulement de la phase relative à la position du rotor doit être alimentée par un courant d'une valeur adéquate dans la plage de l'angle de rotation, à savoir  $\alpha_{on} < \theta_r \leq \alpha_{off}$ . Cela signifie que l'alimentation doit être mise en marche telle que définie par l'angle  $\alpha_{on}$  légèrement avant la position non alignée, tandis que l'alimentation est coupée (comme décrit par l'angle  $\alpha_{off}$ ) légèrement en avance par rapport à l'instant où une dent atteint une position alignée. La différence entre les deux angles est connu comme angle de conduction, qui est égal à:  $\alpha_z = \alpha_{on} - \alpha_{off}$



**Figure IV.8.** Coupe transversale d'une MRV 8/6 avec indication des différents angles.

Les angles de commutation de la mise sous tension et hors tension d'une phase doivent être avancés d'un angle à cause de la caractéristique dynamique du courant durant l'amorçage et l'extinction des semi-conducteurs. En d'autres termes, les angles de commutations sont fonctions de la vitesse de rotation et de l'inductance des enroulements ainsi que du contrôle des commutateurs du convertisseur. Pour les petites vitesses, le courant dans l'enroulement augmente très vite au regard de l'angle de conduction, il est limité par le contrôle selon la méthode MLI.

Pour les vitesses de rotation élevées, l'augmentation du courant est relativement faible après l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs d'une phase, de plus la période de conduction est très courte. Une force électromotrice importante est induite dans les enroulements et l'augmentation du courant dépend seulement de la différence entre la tension d'alimentation et la force électromotrice. La commande des interrupteurs du convertisseur via

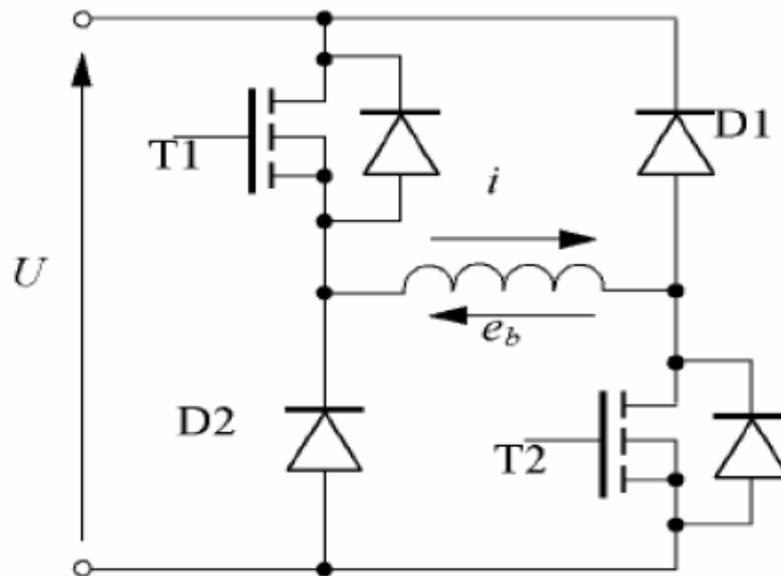
l'angle  $\alpha_{on}$  et l'angle de conduction  $\alpha_z$  constitue la méthode de base appliquée dans le contrôle et l'adaptation des caractéristiques de la MRV, à côté de la possibilité de contrôler la tension d'alimentation habituellement réalisée à l'aide de la méthode MLI. Par l'analyse du fonctionnement de la machine à reluctance variable, on peut déterminer l'angle de conduction théorique pour une seule phase ; Cet angle est désigné comme angle d'attaque, ce qui se traduit par le nombre de phases et les dents du rotor sous l'hypothèse d'une conduction séparée des enroulements.

Dans une MRV, la différence entre le nombre des dents du stator et du rotor par le nombre de paires de pôles est égale à 2. L'angle d'attaque est donné par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\rho} \left( \frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) = \frac{2\pi}{qN_r} \quad (\text{IV.7})$$

Pour une MRV 6/4, l'angle d'attaque est égale  $\varepsilon = 30^\circ$ , tandis que pour une MRV8/6  $\varepsilon = 15^\circ$ . La valeur réelle de l'angle de conduction  $\alpha_z$  est toujours supérieure à l'angle d'attaque  $\varepsilon$ . Car, généralement, le but étant d'obtenir des valeurs élevées du couple électromagnétique, la période de conduction est prolongée dans la plage de forte attraction de la dent du rotor par l'électro-aimant constitué par une paire de dents de stator de telle sorte que l'angle de mise hors tension  $\alpha_{off}$  précède légèrement la position alignée (position de conjonction). Pour cette raison, le processus de décroissance du courant dans une phase donnée est accéléré autant que possible afin d'éviter les valeurs de couple négatives. Ceci se produit après que le rotor ait atteint la position déterminée par l'angle  $\alpha_{off}$  puis cet enroulement est excité avec une tension inverse qui provoque le retour de l'énergie à la source.

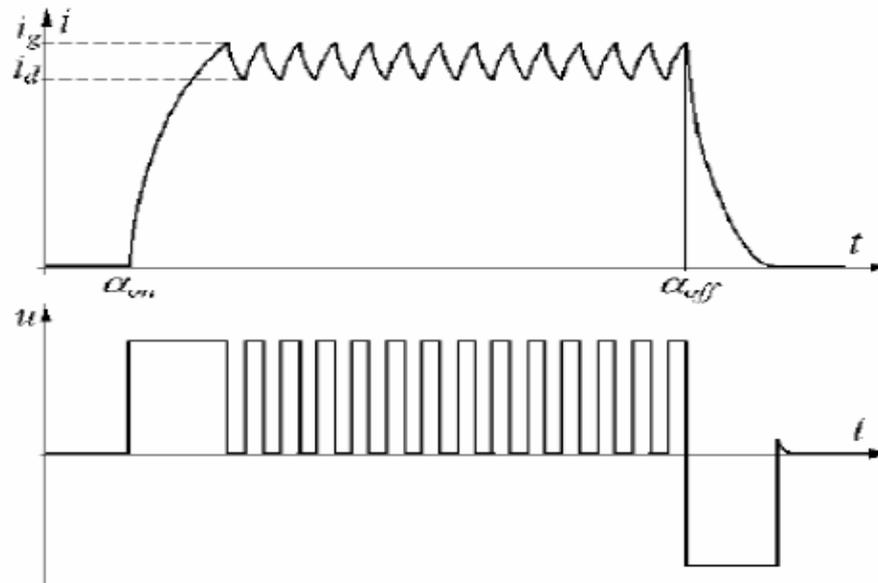
Le système de base de l'alimentation et de commutation d'une seule phase d'enroulement des MRV est représenté sur la figure. 1.7 (pont H asymétrique transistor / diode). Etant donné que la machine à reluctance variable est basée sur le principe de la variation de la reluctance et donc sur la variation de l'énergie magnétique associée au déplacement du rotor, et le sens du couple n'étant pas relatif au sens du courant qui parcourt l'enroulement de la phase, la MRV peut donc être alimentée par un convertisseur unidirectionnel.



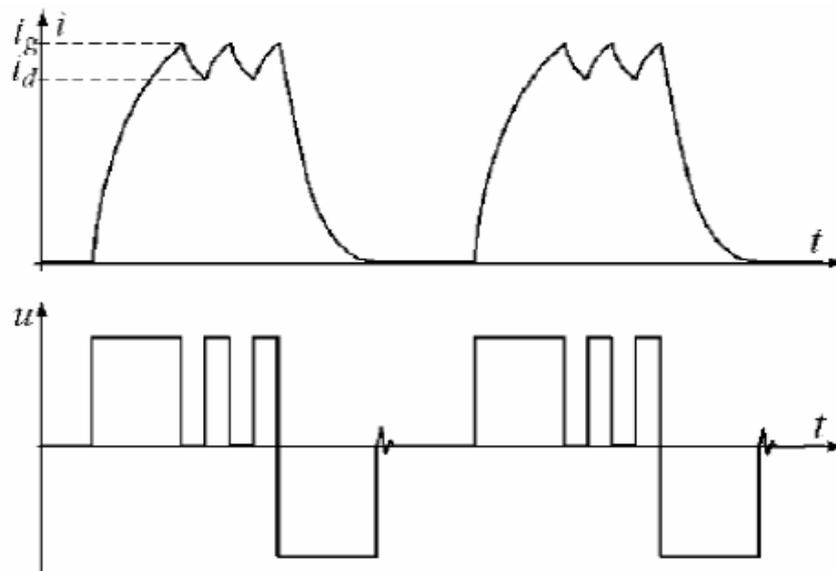
**Figure IV.9.** Pont H asymétrique pour la commutation du courant d'une phase de MRV [29]

Au cours de la période pendant laquelle l'enroulement est dans l'état d'alimentation par la source, les transistors T1 et T2 sont à la fois à l'état ON. Ceci se produit durant l'angle de conduction  $\alpha_{off}$  et lorsque simultanément il y a une augmentation du courant dans le cycle de la régulation MLI de la tension. Cependant, dans la partie du cycle MLI lorsque le courant de phase diminue, un seul transistor et une diode du pont H sont à l'état ON. Dans cet état, ils pourraient être le transistor T2 et la diode D2 du pont et dans ce cas, il y a une décroissance du courant dans le circuit dans lequel ces éléments court-circuitent l'enroulement de phase. En revanche, après que le rotor atteigne la position  $\alpha_{off}$ , les deux transistors sont désactivés et le courant dans l'enroulement se referme dans le circuit formé par les deux diodes D1 et D2 et la source d'alimentation. Cette direction du courant réalisée par les diodes se traduit par le retour de l'énergie stockée dans le champ électromagnétique vers la source accompagnée d'une décroissance rapide du courant dans l'enroulement. Nous pouvons aussi considérer une option de conversion de l'énergie mécanique au cours de cette période et il est seulement relatif au sens réel du couple électromagnétique et sa valeur. Toutefois, pour les besoins de l'explication grossière du principe de fonctionnement du moteur, on peut supposer que, dans le voisinage de la position alignée du rotor le couple électromagnétique est faible et, par conséquent, le retour de l'énergie est constitué uniquement par le retour de l'énergie stockée dans le champ électromagnétique.

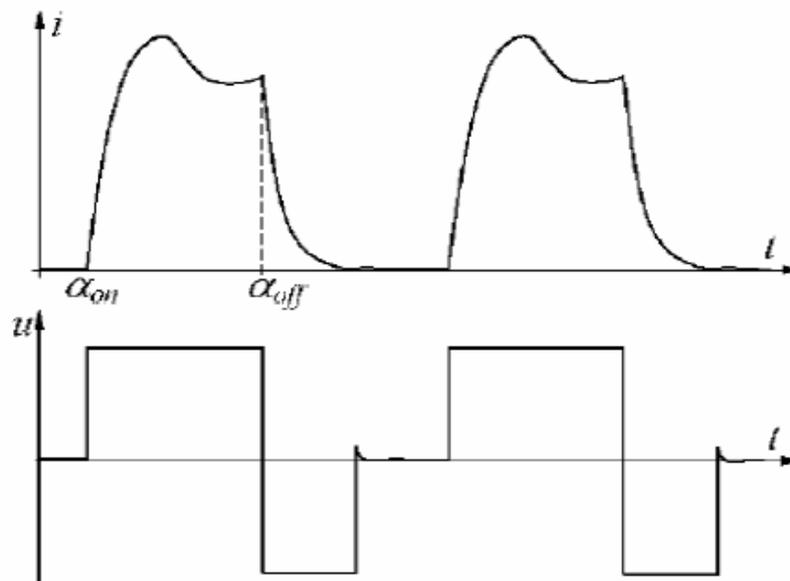
Les figures suivantes figure 1.8 et figure 1.9 sont respectivement une illustration du fonctionnement du système de commutation d'une seule phase d'enroulement pour de faibles et moyennes vitesses, alors que la figure 1.10 est pour des vitesses plus élevées.



**Figure IV.10.** Commutation de courant au cours d'un cycle de conduction d'un enroulement de phase avec une limitation de courant, pour une gamme à basse vitesse des MRV [29].



**Figure IV.11.** Commutation de courant au cours d'un cycle de conduction d'un enroulement de phase avec une limitation de courant, pour une gamme à moyenne vitesse des MRV [29].



**Figure IV.12.**Commutation de courant au cours d'un cycle de conduction d'un enroulement de phase pour une gamme à vitesse élevée des MRV [29].

#### IV.6. Equations électromagnétique du MRV

Le moteur comporte six bobines dont les noyaux sont les pôles statoriques. Comme déjà cité plus haut, chaque paire de bobines diamétralement opposées et reliées en série, forme une phase; on aura donc trois phases pour notre moteur et son comportement électromagnétique sera régi par le système d'équations (IV.8) suivant [30]:

$$\begin{cases} v_1(t) = r \cdot i_1(\theta) + \omega \cdot \frac{d.f_1(i_1, \theta)}{d\theta} \\ v_2(t) = r \cdot i_2(\theta) + \omega \cdot \frac{d.f_2(i_2, \theta)}{d\theta} \\ v_3(t) = r \cdot i_3(\theta) + \omega \cdot \frac{d.f_3(i_3, \theta)}{d\theta} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

Le système d'équations (IV.8) comporte des éléments fortement non linéaires et interdépendants. La résolution d'un tel système requiert une méthode élaborée qui permettra non seulement de déterminer le courant électrique, mais aussi le flux magnétique et la position.

#### IV.7. Equation mécanique du MRV

Afin d'étudier le comportement dynamique du MRV, le système d'équations (IV.8) sera couplé à l'équation mécanique (IV.9) suivante [31] :

$$M \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_r - f \cdot \omega \quad (\text{IV.9})$$

$T_e$  est le couple électromagnétique délivré par la machine,  $T_r$  les couple résistant,  $f$  le coefficient de frottements mécaniques,  $\omega$  la vitesse angulaire et  $M$  le moment d'inertie de la masse du rotor.

La résolution de l'équation (IV.9) nécessite le calcul du couple électromagnétique  $T_e$ . Les deux méthodes généralement utilisées pour le calcul du couple électromagnétique sont la variation d'énergie et le Tenseur de Maxwell.

Dans le cas des Réseaux de réductances, la méthode de variation d'énergie est appliquée aux niveaux des perméance d'entrefer. Le Tenseur de Maxwell présente une autre approche utilisée dans le calcul du couple dans les machines électriques. Cette méthode ne peut être appliquée dans le cas d'un réseau de perméance avec des réductances unidirectionnelles, où on ne peut accéder qu'à une des composantes de l'induction [30].

Pour ce qui est de la première méthode, le calcul du couple pourra se faire en utilisant l'énergie ou la coénergie. Etant donné que le courant est plus accessible que le flux, nous adopterons alors la coénergie comme grandeur de calcul.

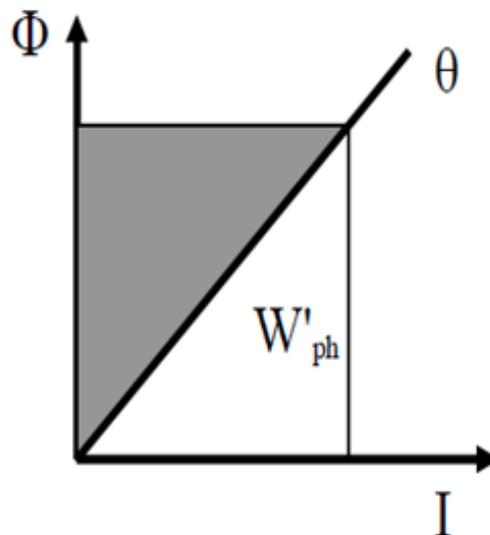
#### IV.8. Notion de coénergie

La coénergie (figure IV.10) n'a pas de sens physique proprement dit, elle représente le complément géométrique de l'aire de l'énergie magnétique par rapport à la surface du rectangle représentant le produit  $(Ni \cdot \varphi)$ . [32][33]

Prenons l'équation électrique d'une seule bobine du MRV :

$$v_1(t) = r \cdot i_1(t) + \omega \cdot \frac{d.f_1(t)}{d\theta} \quad (\text{IV.10})$$

Notons ici que pour simplifier le problème, le flux de couplage dû aux courants des autres bobines est négligeable.



**Figure IV.13** : Énergie et coénergie magnétique

En multipliant la tension de l'équation (IV.10) par le courant de bobine, nous obtiendrons la puissance instantanée fournie à la machine, donnée par :

$$p(t) = r \cdot i_1^2(t) + i(t) \cdot \frac{df_1(t)}{dt} \quad (\text{IV.11})$$

La puissance de l'équation (IV.11) contient les pertes Joule et un deuxième membre incluant la puissance mécanique et la puissance magnétique emmagasinée (principe de conservation de l'énergie).

$$i(t) \cdot \frac{df_1(t)}{dt} = T_e \frac{d\theta}{dt} + \frac{dW_{magn}}{dt} \quad (\text{IV.12})$$

D'où :

$$T_e \frac{d\theta}{dt} = i(t) \cdot \frac{df_1(t)}{dt} - \frac{dW_{magn}}{dt} \quad (\text{IV.13})$$

En simplifiant l'équation (IV.13):

$$T_e d\theta = i(t) \cdot df_1(t) - dW_{magn} \quad (\text{IV.14})$$

En écrivant l'équation (IV.14) sous sa forme variationnelle, nous aurons:

$$T_e \delta\theta = i(t) \cdot \delta f_1(t) - \delta W_{magn} \quad (\text{IV.15})$$

Le flux étant constant le terme  $i(t) \cdot \delta f_1(t)$  de l'équation (IV.15) s'annule. En appliquant le théorème des travaux virtuels, nous déduisons l'expression du couple électromagnétique lors d'un déplacement infinitésimal  $\partial\theta$  et à flux constant [34].

$$T_e = - \frac{\partial W_{magn}}{\partial\theta} \quad (\text{IV.16})$$

Dans le cas d'un déplacement à courant constant nous pouvons écrire :

$$i(t) \cdot \partial f_1(t) = \partial [i(t) \cdot f_1(t)] \quad (\text{IV.17})$$

Le couple électromagnétique s'écrira alors :

$$T_e = \frac{\partial [i(t) \cdot f_1(t)] - W_{magn}}{\partial\theta} = \frac{\partial W'_{magn}}{\partial\theta} \quad , \langle i = const \rangle \quad (\text{IV.18})$$

Le terme  $W'_{magn}$  représente une grandeur appelée « la coenergie magnétique ».

#### IV.9. Calcul du couple en utilisant la coenergie

D'après l'équation (IV.18), et pour un courant constant, l'accroissement de l'énergie est :

$$W'_{magn} = \int \Phi d(Ni) \quad (\text{IV.19})$$

$$W'_{magn} = \int N\Phi di \quad (\text{IV.20})$$

$$W'_{magn} = L(\theta, i) \cdot i \cdot di \quad (\text{IV.21})$$

En remplaçant l'équation (IV.21) dans (IV.18) et après développement nous obtenons l'équation du couple suivante :

$$T_e = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (\text{IV.22})$$

Où :

$$\frac{dL(\theta,i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2,i) - L(\theta_1,i)}{\theta_2 - \theta_1}, \quad (i = \text{const}) \quad (\text{IV.23})$$

L'équation (IV.22) montre que le couple est proportionnel au carré du courant ce qui veut dire qu'il est indépendant de la polarité du courant. Notons que cela facilitera le choix des composants du convertisseur.

#### IV.10. Les avantages et les inconvénients du MRV

A partir des caractéristiques et des équations du MRV cités plus haut, ce moteur représente des avantages et des inconvénients que nous allons détailler ci-dessous.

##### IV.10.1. Les avantages du MRV

Le MRV ne possède ni balai, ni collecteur, ni aimants permanents, ni bobinage au rotor et les enroulements statoriques sont concentriques, ce qui réduit le coût de fabrication, des matériaux et de maintenance. Le couple du moteur étant indépendant de la polarité du courant de phase, le convertisseur requiert seulement un interrupteur par phase. Pour ce qui est de la performance, le MRV est avantageux par son rapport couple/volume et son rapport couple/inertie élevés. A titre d'exemple, le MRV présente un couple beaucoup plus grand et avec le même rendement que celui d'un moteur à induction de même volume. Son rendement est constant et maintenu sur une très large plage de vitesse. Selon la topologie, il présente une grande performance en vitesse et en accélération, une faible inertie due à la légèreté du rotor, il peut supporter des températures élevées par rapport à d'autres moteurs de même puissance. Il convient parfaitement pour une utilisation en environnement hostile, comme en haute température ou dans un milieu de fortes vibrations, et sa simplicité de construction fait sa robustesse. Il peut être allongé, rétréci, et peut être conçu pour s'adapter à l'espace disponible ce qui le rend peu encombrant. Sa configuration se prête à un emploi en tant que moteur, comme en tant que générateur. De plus, une grande partie de la chaleur est générée au niveau du stator, ce qui rend facile son refroidissement. En général, les MRV possèdent une durée de vie très longue avec une performance très fiable.

##### IV.10.2. Les inconvénients du MRV

Parmi les inconvénients du MRV, nous pouvons citer son bruit acoustique à cause des ondulations du couple. De plus, les forces radiales varient du maximum au minimum selon la position du rotor ce qui produit des excentricités mécaniques. Un autre inconvénient majeur consiste en la nécessité de l'emploi de capteur de position au rotor ou au stator afin d'alimenter les bobines à des positions précises.

## IV.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les concepts nécessaires pour comprendre le fonctionnement du MRV et sa classification parmi les moteurs électriques et les différentes topologies existantes. Nous avons précisé également la géométrie du MRV, son principe de fonctionnement et le convertisseur qui contrôle l'alimentation de phase. Le développement des équations électromagnétiques et mécaniques qui le régissent permet d'en déduire certains de ses avantages, tels que la robustesse, la simplicité et la possibilité de fonctionner sur une large gamme de vitesses et de couples. Connaissant et considérant ses nombreux avantages tels que le fonctionnement dans des conditions extrêmes, un faible coût, un entretien et une réparation faciles, nous pouvons conclure que le moteur MRV est le plus adapté aux conditions extrêmes des mines et carrières notamment la mine de fer de Boukhadra.

# **Chapitre V :**

## **Partie spécial**

## V.1.Introduction

Le moteur à a reluctance variable ne possède ni balais, ni aimant permanent et ni enroulement rotorique ce qui a focalisé l'intérêt des constructeurs et utilisateurs. Ce qui rend la structure du rotor simple, robuste, sans encombrement, d'excellentes performances dans des environnements difficiles, une capacité de surcharge élevée, faibles coûts de fabrication et un intervalle de puissance étendu.

Pour justifier l'utilisation dans des conditions difficiles telles que les mines et pour assurer une durée de vie plus longue, ce travail présente la comparaison entre l'utilisation d'un moteur asynchrone a rotor bobiné ( cas du concasseur dans la mine de Boukhadra) et un moteur a reluctance variable avec les mêmes caractéristiques du couple . Le seul inconvénient qui accompagne l'utilisation des MRV est uniquement l'ondulation de couple qui génère du bruit et de la vibration a cause de la forme saillante du rotor, notamment les rotors à grosses dents.

Le tableau 1 compare les données constructives du moteur à réluctance variable 106kw et du moteur à induction triphasé 125kw. La construction et le fonctionnement des deux moteurs ne posent pas de problème.

## V.2. Le calcul des caractéristiques du moteur MRV choisi

### V.2.1 Caractéristique du moteur choisi :

**Model: moteur HELMKE**

**Fabrication: fabrique en FRANCE**

**Type: DSOR 355 S8-079**

**Puissance: 125KW**

**Poids: 1405kg**

**Couple:  $\Delta$**

**Cos  $\varnothing$ = 0.82**

**Longueur: 1100 mm**

**Diamètre : 700 mm**



**Figure .V.1.**Plaque signalétique de MAS 125 KW

- **Inconvénients :** Nécessite au moins trois bobinages, pour obtenir un cycle complet, pas de couple résiduel, c'est-à-dire que hors tension, le rotor est libre, ce qui peut être problématique pour ce genre de moteur. La fabrication est assez délicate, les entrefers doivent être très faibles.
- **Avantage :** Peu coûteux, d'une bonne précision. Dans l'exemple, avec seulement 4 enroulements, on obtient 24 pas (on peut facilement obtenir 360 pas). Le sens du courant dans la bobine n'a aucune importance.

#### **-Calcul de consommation prix de revient du moteur choisi**

-Consommation par jour :

$$C_j = \text{puissance} \times N \text{ de poste} \times \text{prix (1KW)} = 125 \times 16 \times 4.5 = 9000,00 \text{ DA}$$

-Consommation par mois :  $C_m = C_j \cdot N_m$  ; (DA)

$N_m$  est le nombre de journée ouvrable par mois

$$C_m = 9000 \cdot 22 = 198.000,00 \text{ DA}$$

-Consommation annuelle :  $C_{an} = C_m \cdot 12 = 198.000,00 \times 12 = 2.376.000,00 \text{ DA}$

-Calcul de consommation prix de revient du MRV proposé:

-Consommation par jour :

$$C_j = \text{puissance} \times N \text{ de poste} \times \text{prix (1KW)} = 106 \times 16 \times 4.50 = 7632,00 \text{ DA}$$

-Consommation par mois :  $7632,00 \times 22 = 167.904,00$  DA

-Consommation par année :  $167.904,00 \times 12 = 2014848,00$  DA

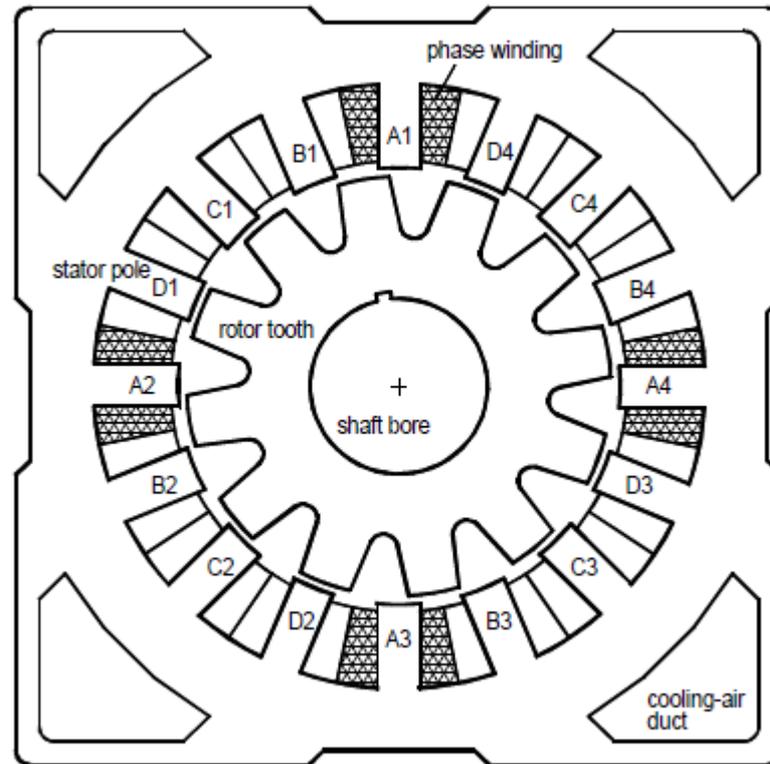
Résultat : -361152,00 Da/an

Le grand gain sur les économies de dépenses présenté ci-dessus ajouté à la qualité et le bon rendement, sans oublier le cout d'entretien très bas vu la simplicité de construction et de maintenance rend notre choix très intéressant. Le MRV consomme peu d'énergie par rapport au moteur a induction installé sur le site pour entrainer le concasseur de la mine de fer de Boukhadra. Les résultats économiques très positifs peuvent largement couvrir le prix de son achat et générer des gains supplémentaires chaque année.

**Tableau. V. 1:** Comparaison du moteur existant par rapport au MRV proposé

	Moteur a reluctance variable proposé	Moteur a induction existant
<i>Puissance de sortie nominale ; kW</i>	106	125
<i>Couple nominal ; Nm</i>	118,72	140
<i>Vitesse nominale tr/mn</i>	1500	1500
<i>Puissance de sortie a 1000tr/m</i>	136.44 kW	106.9 kW
<i>Puissance de sortie a 500tr/m</i>	45.02 kW	53.09 kW
<i>Epaisseur de l'entrefer ; mm</i>	0.46	0.55
<i>Pertes a 50Hz et épaisseur de tôle 1.5T</i>	3.98 w/kg	4,70 w/kg
<i>Poids des enroulements du stator</i>	97.05Kg de cuivre	103.27Kg de cuivre
<i>Facteur de remplissage du cuivre</i>	48.16%	56.8%
<i>Poids de l'enroulement du rotor</i>	Sans enroulement	34.9Kg
<i>Puissance par rapport au volume au point de fonctionnement nominal</i>	736.04 W/dm <sup>3</sup>	868 W/dm <sup>3</sup>
<i>Puissance par rapport au poids au point de fonctionnement nominal</i>	192.49 W/Kg	227 W/Kg
<i>Gain économique annuel en énergie</i>	361152,00 Da/an	

L'Elektrotechnisches Institut [35] a sélectionné le nouveau MRV avec 16 pôles au stator et 12 dents au rotor. C'est une machine à 4 pas d'enroulement, les 4 pôles du stator sont décalés de 90 ° les uns par rapport aux autres forment un enroulement de phase (Figure .V.2).



**Figure .V.2.** Coupe schématique transversale du Moteur à réluctance variable choisi

Cette conception a été proposée par l'auteur dans [35], Comparé au moteur à réluctance triphasé ; la machine à 4 phases nécessite le même nombre de puissance ou même moins. Les quatre pôles de phase divisent davantage les forces uniformément autour du périmètre du moteur, ce qui réduit le bruit. Si seulement deux pôles opposés appartiennent à un enroulement de phase comme par exemple dans l'enroulement 4 phases MRV8/6, les forces s'appliquent sur deux positions seulement. Le MRV16/12 à 4 phases divise les forces jusqu'à quatre pôles. Par conséquent, ce sont environ deux fois moins que les forces du MRV8/6. De plus, le MRV16/12 génère moins de bruit que le MRV8/6. Ces résultats sont prouvés par mesures comparatives réalisées avec un MRV 8/6 pôles de 15 kW au niveau de la société Oulton.

Les auteurs de l'article [36] ont comparé un MRV6/4 avec un MRV12/8 et ont montré que l'utilisation de la machine avec plus de pôles est meilleure pour des couples plus élevés qui est dû à la liaison de flux et à l'étréitesse bobines d'enroulements. Le premier provoque un couple plus élevé, le dernier une résistance thermique inférieure du contact enroulement-matériaux ferromagnétiques.

### V.2.2. Avantages de la restitution du moteur existant par le MRV proposé

A la base de comparaison des résultats représentés dans le Tableau 2, Les avantages de la machine à induction triphasée sont le faible niveau sonore et une technique largement répandu et une grande disponibilité ainsi qu'une meilleure accélération. Le moteur à réluctance variable est caractérisé par une haute sécurité de fonctionnement après la défaillance d'un ou plusieurs phases motrices. Lorsqu'une telle panne se produit, le moteur

continue de fonctionner sous charge, et il peut être accéléré ou freiné. Cependant, Malgré l'inconvénient des ondulations du couple ; pour juger du rapport puissance par volume et respectivement puissance par masse, les éléments suivants peuvent être évalués pour 1500 tr/min : La partie active du MRV est, par rapport au moteur à induction triphasé avec la même puissance nominale, est d'environ 10% plus petit et 10% moins lourd. Si la tôle d'acier magnétique mince est utilisée pour le MRV, les coûts de production augmentent, la partie active de la MRV devient 30% plus petit et 10% plus léger. (Pour cela la tôle d'acier magnétique et les enroulements ont été considérés comme partie active.) Pour une plage de vitesse d'environ 1500 tr/min le MRV peut offrir des avantages pour certaines applications. L'échauffement du rotor est très faible, l'échauffement de la MRV est très favorisée comparé à la machine a induction qui présente énormément de pertes joules dues aux enroulements rotoriques qui sont inexistant dans le MRV.

Le MRV présente l'avantage d'une construction très simple, d'une grande fiabilité, d'un prix de construction réduit (52% par rapport au prix du moteur asynchrone et seulement 30% par rapport au moteur synchrone à aimants permanents [37] et réduit le poids (85% du poids du moteur a aimant permanent et 73% du poids du moteur asynchrone). L'emplacement des enroulements au stator favorise la dissipation thermique et élimine le besoin de systèmes de refroidissement supplémentaires. Le coût de la partie alimentation est relativement élevé par rapport aux autres solutions. Les avantages et les inconvénients des quatre moteurs de traction électrique sont résumés dans Tableau 2 [38].

Chaque moteur est noté sur une échelle de 0 à 5. 5 étant la meilleure réponse au critère. Comme on peut le voir, le SRM est une solution compétitive pour la traction électrique, avec un faible poids, un très haut rendement et un faible coût de fabrication.

**Tableau .V. 2 :** Comparaison entre les 04 types de moteurs électriques

Désignation	Moteur a courant continu	Moteur a induction	Moteur Brush-less	MRV
Fiabilité	2	4	5	4.5
Poids	2	4	4.5	5
Cout	5	4	3	4
Total	9	12	12.5	13.5

### V.3.Conclusion

Le grand gain sur les économies de dépenses présenté ci-dessus ajouté à la qualité et le bon rendement, sans oublier le cout d'entretien très bas vu la simplicité de construction et de maintenance rend notre choix très intéressant. Le MRV consomme peu d'énergie par rapport au moteur a induction installé sur le site pour entrainer le concasseur de la mine de fer de Boukhadra. Les résultats économiques très positifs peuvent largement couvrir le prix de son achat et générer des gains supplémentaires chaque année.

A la base de comparaison des résultats représentés dans le Tableau 2, Les avantages de la machine à induction triphasée sont le faible niveau sonore et une technique largement répandu et une grande disponibilité ainsi qu'une meilleure accélération. Le moteur à réluctance variable est caractérisé par une haute sécurité de fonctionnement après la défaillance d'un ou plusieurs phases motrices. Lorsqu'une telle panne se produit, le moteur

continue de fonctionner sous charge, et il peut être accéléré ou freiné. La partie active du MRV est, par rapport au moteur à induction triphasé avec la même puissance nominale, est d'environ 10% plus petit et 10% moins lourd. Si la tôle d'acier magnétique mince est utilisée pour le MRV, les coûts de production augmentent, la partie active de la MRV devient 30% plus petit et 10% plus léger. L'échauffement du rotor est très faible, l'échauffement de la MRV est très favorisée comparé à la machine a induction qui présente énormément de pertes joules dues aux enroulements rotoriques qui sont inexistant dans le MRV.

Le MRV présente l'avantage d'une construction très simple, d'une grande fiabilité, d'un prix de construction réduit (52% par rapport au prix du moteur asynchrone et seulement 30% par rapport au moteur synchrone à aimants permanents [37] et réduit le poids (85% du poids du moteur a aimant permanent et 73% du poids du moteur asynchrone). L'emplacement des enroulements au stator favorise la dissipation thermique et élimine le besoin de systèmes de refroidissement supplémentaires.

Le MRV est une solution de choix pour l'action électrique, avec un faible poids, un très haut rendement et un faible coût de fabrication.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Le concassage par écrasements comme dans le cas de la mine de Boukhadra « concasseur a conne », rempli bien sa fonction de réduction des dimensions moyennes de la roche. Néanmoins on a remarqué que certains gabarits font coincer le conne du concasseur et bloquent son fonctionnement ; c'est pour cette raison que l'opérateur a souvent recours à la variation du rhéostat monté en série avec le circuit du rotor pour augmenter le couple ou la vitesse et décoincer le concasseur. À cause de cela, l'entreprise minière a monté un brise roche sur le haut du concasseur pour procéder à la défragmentation de la roche hors gabarit.

Dans ce travail, nous avons introduit les concepts nécessaires pour comprendre le fonctionnement du MRV et sa classification parmi les moteurs traditionnels et les différentes topologies existantes. Nous avons précisé également la géométrie du MRV, son fonctionnement et les convertisseurs et alimentations phase qui le contrôlent. Le développement des équations électromagnétiques et mécaniques qui le régissent permet d'en déduire certains de ses avantages, tels que la robustesse, la simplicité et la possibilité de fonctionner sur une large gamme de vitesses et de couples.

Connaissant et considérant ses nombreux avantages tels que le fonctionnement dans des conditions extrêmes, un faible coût, un entretien et une réparation faciles, nous pouvons conclure que le moteur est le plus adapté aux conditions extrêmes des mines et carrières.

Le grand gain sur les économies de dépenses présenté au dernier chapitre 475.200,00 Da/an, ajouté à la qualité et le bon rendement, sans oublier le coût d'entretien très bas vu la simplicité de construction et de maintenance rend notre choix très intéressant. Le MRV consomme peu d'énergie par rapport au moteur à induction installé sur le site pour entraîner le concasseur de la mine de fer de Boukhadra. Les résultats économiques très positifs peuvent largement couvrir le prix de son achat et générer des gains supplémentaires chaque année.

En comparant les résultats de comparaison, répertoriés dans un tableau au dernier chapitre nous concluons ce qui suit :

- Les avantages des moteurs à induction triphasés sont un faible bruit, des applications techniques étendues, une haute disponibilité et une bonne accélération.
- Le moteur à réluctance variable se caractérise par une sécurité de fonctionnement élevée après la défaillance d'une phase du moteur.
- Cependant, malgré les lacunes de l'ondulation du couple, par rapport à un moteur à induction triphasé de même puissance nominale, la partie active du MRV est environ 10 % plus petite et environ 10 % plus légère.
- Si le MRV utilise des tôles d'acier magnétiques minces, le coût de production augmentera et la partie active du MRV sera 30 % plus petite et 10 % plus légère.
- L'échauffement du rotor de l'MRV est très faible, il est très favorisé comparé à la machine à induction qui présente énormément de pertes joules dues aux enroulements rotoriques et qui sont inexistantes dans le MRV.

- L'emplacement des enroulements au stator favorise la dissipation thermique et élimine le besoin de systèmes de refroidissement supplémentaires
- L'MRV a une structure très simple, la fiabilité est élevée et le coût est réduit (52% inférieur au prix du moteur asynchrone, 30% inférieur au prix du moteur synchrone à aimant permanent et réduction de poids (85 % du poids du moteur à aimant permanent) et asynchrone 73 % du poids du moteur.
- Par rapport à d'autres solutions, le coût de l'alimentation est relativement élevé, mais les avantages qui peuvent être obtenus grâce à notre étude économique sont largement compensés.

MRV est une solution électrique compétitive caractérisée par un poids léger, un rendement élevé et un faible coût de fabrication.

# **Bibliographie**

---

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] document de la DED.
- [2] debourdiou ,1956 arcelormétal D.E.D BK ;rapportgeologique de la mine de BOUKHADRA ,dévision d'étude et developpement année 2014,pp.07.
- [3] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-moteur-asynchrone-principe-de-fonctionnement>
- [4] Les moteurs électriques Isabelle Chênerie, Patrick Ferré chenerie@cict.fr, patrick.ferre@lget.ups-tlse.fr
- [5]<https://slidetodoc.com/communication-technique-le-moteur-asynchrone-triphas-leon-6/>
- [6]<http://bts.crsa.rascal.free.fr/Techno/cours/Le%20moteur%20asynchrone%20triphase%E9.pdf>
- [7]<http://siteelectrotechnique.free.fr/Documents%20GE1/a%20dossiers%20techniques%20serie%204/TP5%20cours%20moteur%20eleve.pdf>
- [8] G.Grellet,G.Clerc, « Actionneurs électrique, principe, modèles, commande. » collection électromécanique . Edition eyrolles 2000.
- [9] L Baghli, « Modélisation et commande des machine asynchrone » , commande IUFM De lorrain UHP , 03/04.
- [10]. Alia Salim et Guedda Smail. Commande vectorielle d'une machine à induction. Thèse de master en commande électrique de l'université Echahid Hamma Lakhdar d'el-Oued 2018.
- [11]. Z. Djaghout. Notes de cours de commande de l'université Badji Mokhtar-Annaba.
- [12]. Abdelkrim Hamza et El Gharbi Kamel. Commande direct du couple DTC-SVM d'une machine asynchrone. Thèse de master en commande des systèmes électriques de l'université Mohamed Boudiaf-M'sila 2016.
- [13] : DJEZAIRI Omar, Promotion : juin 2008, L'influence du mode de concassage sur les Caractéristiques de fabrication des granulats. Département de Génie Minier, école nationale polytechnique/2008.
- [14] : Cour de préparation mécanique des roches (3eme année mine et géologie) ; Mr Akim. A.2016.
- [15] : N° 4/ 4ème trimestre 1999- ISSN (société de l'industrie minérale) Les techniques de l'industrie minérale. *Concassage*. (1999). N ; 622/29.4
- [16] : Lafarge, Centre de viviers, service formation EdSE, connaissances cimenteries; Concassage. 2016.
- [17] : photos sur le cite, [www.le-type-de-concasreur.com](http://www.le-type-de-concasreur.com). 2019.

- [18] : FLS midth introduction aux programmes de formation .concassage ; 2019.
- [19] : photos sur le cite, <https://ucpcdn.thyssenkrupp.com> . 2021.
- [20]. Lotfi Ben Amor : Commande non linéaire d'un moteur a reluctance variable. Thèse de Doctorat, Montréal 1996.
- [21] D. Ilea, "Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers", thèse de doctorat École Centrale De Lille,2011.
- [22] B. Multon, « Moteurs Pas-a-Pas », E. N.S. Cachan, mai 2004, ISBN : 2-909968-64-2.
- [23] Dan Ilea , " Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers", Thèse de Doctorat, Université Lille Nord-de-France, Oct 2011.
- [24] B. Multon , ENS de cachan Antenne de Bretagne notes de cours Agrégation génie Electrique " Moteurs pas à pas ", 2004.
- [25] P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, P.T. Blenkinsop, J. Corda, and N.N. Fulton, "Variable-speed switched reluctance motors", IEE Proceedings, Vol. 127, N°4, pp. 253-265, July 1980.
- [26] J. Chalmers, L. Msaba, " Design and field-weakening performance of a synchronous reluctance motor with axially laminated rotor ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, N°5, pp. 1035 - 1041, Sep-Oct 1998
- [27] R.E. Betz, R. Lagerquist, M. Jovanovic, T.J.E. Miller, R.H. Middleton " Control of synchronous reluctance machines", IEEE Transactions on, Industry Applications, Vol.29, N°6, pp.1110 - 1122, Nov-Dec 1993.
- [28] B. Multon, DEA. Conception actionnaire " Cas d'une machine à aimant permanents à f.m.m. trapézoïdales alimentée en courants rectangulaires ", Université Paris-Sud, ENS Cachan.
- [29] S.Mouellef, "Contribution A L'étude D'une Machine A Reluctance Variable
- [30] CYR. Charles „Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques“, *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'arts et métiers Paris , France , 2007.*
- [31] G.G.Lopez, C.Kjaer and J.E.Miller, "A new sensorless method for switched reluctance motor drive", IEEE Trans. on industry appl, Vol. 34, No. 4, pp 832-840, Jul/Aug 1998.
- [32] B.NEDJAR, " Modélisation basée sur la méthode des réseaux de perméances en vue de L'optimisation de machines synchrones à simple et à double excitation.", thèse de doctorat ENS CACHAN 2011.

- [33] Y. Deshayes, J.C. Gianduzzo et F. Cazaurang, « Energie Magnétique et Conversion Electromécanique », chap.7 LST3EEA-PEA 503, Université Bordeaux 1.
- [34] E.D. K. Fankem, "Etude De Différentes Structures D'actionneurs De positionnement Pour L'aéronautique ", thèse de doctorat, Uuniversité De Lorraine , 2012
- [35]J. Wolff , H. Späth.: SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH 16 STATOR POLES AND 12 ROTOR TEETH. Elektrotechnisches Institut, Universität Karlsruhe, Germany 1997, Vol.3; p.558 -563
- [36]Lovatt, H.C.; Stephenson, J.M.: Influence of number of poles per phase in switched reluctance motors. Proc. IEE, 139, No. 4, 1992, p. 307-314
- [37]Dan, I., 2011 'Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers', Ecole Centrale de Lille et l'université technique de Cluj- Napoca, roumanie, These de doctorat, N°183
- [38]Xue, X.D., Cheng, K.W.E., Cheung, N.C., (2008) 'Selection of electric motor drives for electric vehicles' , in Australasian Universities Power Engineering Conference, Paper P-170 pp. 1-6