

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERRI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème

**REPLACEMENT D'UNE COMMANDE PNEUMATIQUE
PAR UN VARIATEUR DE VITESSE ELECTRONIQUE D'UN
AEROREFREGIRANT AU NIVEAU DU MPP1**

Proposé et dirigé par : *Mr YAYADI (SONATRACH)*

Suivi et dirigé par : *Mlle R. KACHENOURA*

Présenté

OUASSIF Sedik

Promotion 2010

Introduction générale	1
CHAPITRE 1 présentation de l'entreprise	
1-1) Présentation de l'entreprise	4
1-2) Présentation du site de Hassi R'Mel :.....	5
1-2-1) Situation géographique :.....	5
1-2-2) Historique du champ de Hassi R'Mel	5
1-2-3) Développement du champ de Hassi R'Mel	6
1-2-4) 1-3) Installations gazières à Hassi R'Mel :.....	6
1-3-1) Les installations productrices :.....	7
1-3-2) Les installations réceptrices :.....	8
1-4) Généralités sur le gaz :.....	8
1-4-1) Les caractéristiques des produits de Hassi R'Mel :.....	8
1.4.2) Caractéristiques et propriétés du GPL :.....	9
1.5) Condensât :.....	10
1.5.1) Caractéristiques du condensât :	10
1.6) Le MPP1 :.....	10
1.7) Procédés de traitement :	10
A- Procédé PRITCHARD :.....	11
B- Procédé HUDSON :	11
1.8) Présentation du module 1 :.....	11
1.8.3) Le système de torches :.....	17
CHAPITRE 2 problématiques	
2.1) Introduction :.....	18
2.2) Types d'aeroréfrigérants :.....	19
2.3) Régulation de la température :.....	21
2.3.1) Fonctionnement du système de refroidissement :.....	21
2.3.2) Positionnement du problème :.....	23
a) <i>Conséquences de l'arrêt du système de refroidissement ou de la mauvaise régulation:</i>	23
b) <i>Inconvénients du système pneumatique:</i>	23
c) <i>Pannes fréquemment enregistrées :</i>	23
2.4) Conclusion :.....	25
CHAPITRE 3 solutions préconisées	
3.1) Introduction	27
3.2) Caractéristiques de la charge entraînée	27
3.3) Le gradateur:.....	28
3.3.1) Principe :.....	28

3.4) Variateur de fréquence :	31
3.4.1) Description :	31
a) Objectif :	31
b) Principe :	31
3.4.2) Avantages de l'utilisation des convertisseurs de fréquence :	32
3.5) Choix des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones :	34
3.6) Choix de loi de commande :	36
 CHAPITRE 4 Mise en œuvre de la loi de commande	
4-1) Introduction.....	39
<i>a) Description</i>	39
<i>b) Principe de fonctionnement</i>	40
4.1.2 Définition des enroulements de la machine asynchrone :	42
4.2 Equations de la machine asynchrone triphasée :	43
4.2.1 Equations électriques du moteur :	43
4.2.2 Equation des flux	44
4.2.3 Equation mécanique	45
4.3 Modèle du moteur asynchrone en régime permanent et schéma équivalent.....	46
4.3.1 Modélisation en régime permanent sinusoïdal.....	46
4.3.2 Schéma équivalent en régime permanent sinusoïdal.....	47
4.3.2.1 Modèle à inductances couplées.....	47
4.3.2.2 Modèle à inductance réparties.....	47
4.3.2.3 Modèle à fuites totalisées au rotor.....	49
4.3.2.4 Modèle à fuites totalisées au stator :	50
4.4 Problème posé par le moteur asynchrone.....	51
4.5 Expression du couple électromagnétique en régime permanent :	52
4.6 Caractéristiques du moteur asynchrone.....	53

4.6.1 Caractéristique mécanique.....	53
4.6.1.1 Caractéristique $C_e = f(\omega)$	53
4.6.1.2 Caractéristique $C_e = f(g)$:.....	54
4.7 Procédées de variation de vitesse.....	55
4.7.1 Commandes des machines asynchrones.....	55
4.7.1.1 Commande scalaire en couple	56
4.7.2 Grandeurs de réglage du couple en régime permanent.....	56
4.7.3 Commande à flux d'entrefer constant	58
4.7.3.1 Lois de commandes permettant le contrôle du flux :.....	58
4.7.3.1.1 Contrôle du flux à partir des courants statoriques.....	58
4.7.3.1.2 Contrôle du flux à partir des tensions statoriques	60
4.8 Système d'alimentation.....	63
4.9 Alimentation par un onduleur de tension.....	63
4.9 Mise en œuvre de la variation de vitesse	66
4.9.1 Commande en boucle ouverte	66
4.9.2 Boost manuel.....	67
4.9.3 Compensation fixe de la chute de tension $R_s I_s$	67
4.9.4 Compensation automatique de la chute de tension : boost automatique.....	68
4.9.5 Variation de la vitesse en boucle ouverte du moteur Asynchrone.....	68
4.9.6 Synoptique de commande à V_s/f_s constant en boucle ouverte.....	68
4.10 Conclusion	71
CHAPITRE 5	
<i>Produit industriel proposé</i>	72
<i>Conclusion Générale</i>	76
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	

Notre projet porte sur le remplacement d'une commande pneumatique par une commande par variateur de vitesse des moteurs asynchrones au niveau d'une batterie d'aéroréfrigérants du MPP1 SONATRACH DP. En effet nous essayerons de passer d'un système d'entraînement par moteurs asynchrones à vitesse constante des ventilateurs à pales d'inclinaison variable à un système d'entraînement à vitesse variable et pales d'inclinaison fixe.

Simple dans sa construction sans balais ni collecteurs, utilisant des matériaux standard (fer, cuivre...etc.), plutôt robuste, ne nécessitant presque pas de maintenance, d'alimentation simple, un coût relativement avantageux, la machine asynchrone s'impose par excellence dans tout les domaines qui requiert une transformation d'énergie électrique en énergie mécanique.

Mais comme à chaque chose malheur et bon, le malheur du moteur asynchrone et ses inconvénients résident paradoxalement dans ses avantages. En effet, le fait qu'il soit simple de construction et simple d'alimentation, fait que le courant et le flux sont des variables fortement couplées, contrairement à la machine à courant continu. Toute action sur l'une d'entre elles se répercute systématiquement sur l'autre, ce qui rend très compliquer sa commande. De ce fait, les possibilités de réglage de vitesse des moteurs asynchrones ont été des plus réduites, seuls les moteurs à couplage de pôles ou à enroulements statoriques séparés, permettaient de disposer de quelques vitesses fixes et les entraînements à vitesse variable restaient toujours à la merci des machines à courant continu et synchrones autopilotées.

Comme dans les applications les plus courantes, telles que le pompage et la ventilation, ou le moteur asynchrone ne peut pas être remplacé par un moteur à courant continu ou autre, et vue la particularité de l'entraînement l'utilisation des vannes pour les pompes et des pales variables pour les ventilateurs arrivaient tant bien que mal à remplacer un entraînement à vitesse variable, avec les conséquences que cela peut engendrer. Nous allons constater par la suite, dans une partie de ce travail, ou nous auront affaire à une commande pneumatique de ventilateurs, à inclinaison variable des pales, entraînées par des moteurs asynchrones dans un souci de contrôle d'une température du gaz dans un process (procédé de traitement du gaz naturel) en faisant varier le débit d'air embrassé.

Tout cela était fait sans compter sur les composants d'électronique de puissance et leur expansion qui a fait une vraie révolution industrielle comme il y en a peu, notamment dans l'entraînement à vitesse variable, ou on trouve particulièrement les convertisseurs de fréquence, qui rendent les performances des moteurs asynchrones voisines de celles des moteurs à courant continu. Aujourd'hui, couramment commandés à vitesse variable, ils peuvent ainsi être employés dans des applications jusqu'alors réservées aux moteurs à courant continu.

Les avancées méthodologiques et technologiques significatives de ces deux dernières décennies grâce aux progrès de l'électronique numérique et le développement des composants de puissance, a été bénéfique à la commande à vitesse variable des entraînements électriques. Il est possible de contrôler non seulement la

vitesse et la position mais également le couple des moteurs à induction. Donc la situation s'est retournée, on passe en effet, d'une situation où on n'avait presque pas un choix à une autre dont les possibilités sont diversifiées et les choix nombreux et autant de lois de commandes en boucle ouverte ou fermée, en contrôle scalaire ou vectoriel, et autant de dispositifs (gradateur, onduleur, cycloconvertisseurs...etc.). On aura qu'à s'en servir selon les besoins et les cahiers de charges dans la gamme des variateurs industriels commercialisés. Dans le cas présent nous sommes devant un système qui requiert effectivement un entraînement à vitesse variable, mais hélas au moment de la mise en marche de l'usine vers la fin des années 1970, la technologie existante de l'époque ne prévoit pas encore l'utilisation des variateurs de vitesse pour des moteurs asynchrones. Du coup les concepteurs ont opté pour un système d'entraînement à vitesse constante et à pales d'inclinaison variable (commande pneumatique, problématique dans les conditions climatiques d'utilisation), moins chère, plus simple avec un rendement qui semblait être satisfaisant. Mais au jour d'aujourd'hui, après tout ce qu'a été dit sur le progrès réalisé dans les dispositifs de variation de vitesse pour les moteurs asynchrones, le problème peut être contourné d'une autre façon à savoir, fixer les pales qui étaient à inclinaison variable, et varier la vitesse qui était constante, cela aura les avantages que nous aurons à démontrer par la suite. Il reste seulement à choisir la stratégie de commande, après avoir fait un constat sur les lieux et avoir vu les problèmes posés par l'ancien système sur place, on arrive avec des propositions, notamment la nécessité de recourir à un variateur de fréquence associé à une loi de commande qui se définit dans une stratégie à $(v/f \text{ constant})$. Nous essayons donc d'expliquer le pourquoi de ce choix, une technique qui s'est pourtant répondu il y a maintenant une vingtaine d'années, et qui n'est devenue techniquement viable et économique que récemment pour la régulation des variateurs de vitesse. Elle consiste à maintenir le couple maximal constant sur toute la plage de vitesse, pour que le moteur asynchrone fonctionne à couple constant quelque soit la vitesse d'où la nécessité de maintenir le flux constant, ce qui est possible au moyen d'un convertisseur statique qui délivre au moteur une tension et fréquence qui évoluent simultanément dans les mêmes proportions.

En finalité, on essaiera de proposer un produit industriel existant sur le marché ou son fonctionnement se base justement sur cette technique et permet de remplacer la commande pneumatique sans ces inconvénients.

Notre travail commence par une introduction générale, qui consiste à parler du moteur asynchrone et les possibilités offertes à son entraînement à vitesse variable puisque il (MAS) est dans le cœur de l'application. Puis nous passons au premier chapitre, où on aborde, brièvement que possible, la situation géographique du lieu d'accueil HASSI R'MEL, et dans ce même chapitre on parle de SONATRACH la structure d'accueil de la mise en situation professionnelle (MSP), puis des différentes installations existantes sur le site. Ainsi on s'étalera un peu plus sur le MODULE PROCESSING PLANT 1 (MPP1) le lieu effectif de la MSP dont on essaiera de parler un peu des différentes installations qui le composent et parlera vaguement du procédé du traitement du gaz brut (utilisé en MPP1) qui est le procédé dit de PRITCHARD à

commencer de l'arrivée du gaz brut soutiré transporté au moyen de PIPE LINES jusqu'à devenir des produits finis destinés à la commercialisation. Puis on déterminera, et c'est ce qui nous importe plus, le rôle des aeroréfrigérants, notre sujet, dans le process (procédé de traitement).

Dans un chapitre qui serait le deuxième, on parlera plus de ces aeroréfrigérants, leur rôle, leur importance, ainsi que leur fonctionnement, puis nous expliquerons les différents problèmes rencontrés, notamment au niveau de la régulation, ainsi que leurs conséquences sur le bon rendement du procédé du traitement du gaz.

Un peu plus loin, dans le troisième chapitre nous parlons des solutions qui peuvent être apportées ainsi que les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles, puis nous déclarons notre préférence à l'utilisation d'un onduleur commandé par la loi de v/f constant tout en expliquant les motivations de ce choix.

Par la suite, nous essayons de choisir un produit industriel existant sur le marché tout en justifiant les motivations du choix et après avoir fait un dimensionnement du produit.

Notre travail se terminera par une conclusion générale.

1-2) Présentation de l'entreprise :

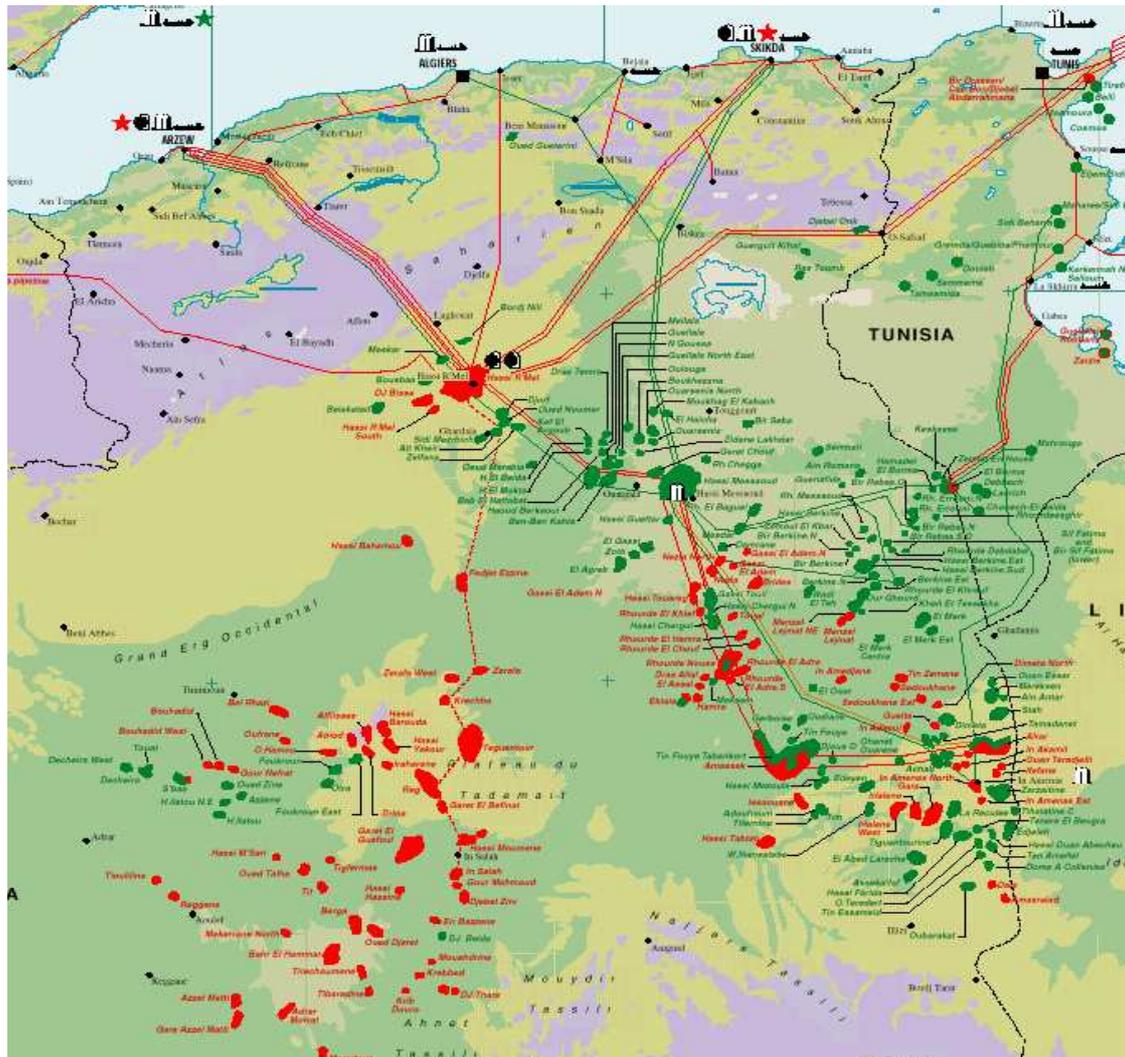
SONATRACH (Société Nationale de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures), est une [entreprise](#) publique [algérienne](#) et l'acteur majeur de l'[industrie pétrolière](#). Dès sa création en Décembre 1963, le rôle essentiel attribué à SONATRACH était de garantir un développement à l'Algérie dans le domaine des hydrocarbures secteur vital de l'économie nationale. Son objectif visait d'abord à générer des revenus externes mais aussi à faire face aux exigences et demandes futures en matière d'hydrocarbures en Algérie.

SONATRACH est la première entreprise d'Afrique, avec un chiffre d'affaire plus de trois fois supérieur à celui de [Old Mutual](#), classée deuxième. Elle est le 12^{ème} groupe pétrolier au niveau mondial, 2^{ème} exportateur de [GNL](#) et de [GPL](#) et 3^{ème} exportateur de gaz naturel.

SONATRACH a été constituée pour exploiter les ressources en [hydrocarbures](#) du pays. Ses activités diversifiées touchent toute la chaîne de production : exploration, exploitation, transport, raffinage, exportation elle s'est diversifiée dans la [pétrochimie](#) et le [dessalement d'eau de mer](#).

SONATRACH est la première entreprise d'Algérie. L'entreprise, qui emploie environ 50 000 salariés (120 000 avec ses filiales), produit à elle seule 30 % du PNB de l'Algérie. Son chiffre d'affaires s'élève à 61,2 milliards de dollars. Première entreprise d'Afrique par son chiffre d'affaires, elle a doublé celui-ci en 3 ans grâce à l'envolée du cours du brut.

Figure
carte



1.1 :

énergétique de SONATRACH

1-2) Présentation du site de Hassi R'Mel :

1-2-1) Situation géographique :

Hassi R'Mel, est la porte du désert, elle est située à 550 Km au sud d'Alger. Dans cette région relativement plate du Sahara septentrional, l'altitude moyenne est d'environ 750m.

Le climat est caractérisé par une pluviométrie faible (140 mm par an) et une humidité moyenne de 19% en été et 34% hiver. Les amplitudes thermiques sont importantes et les températures varient entre -5°C en hiver et $+45^{\circ}\text{C}$ en été, les vents dominant sont de direction Nord-Ouest.

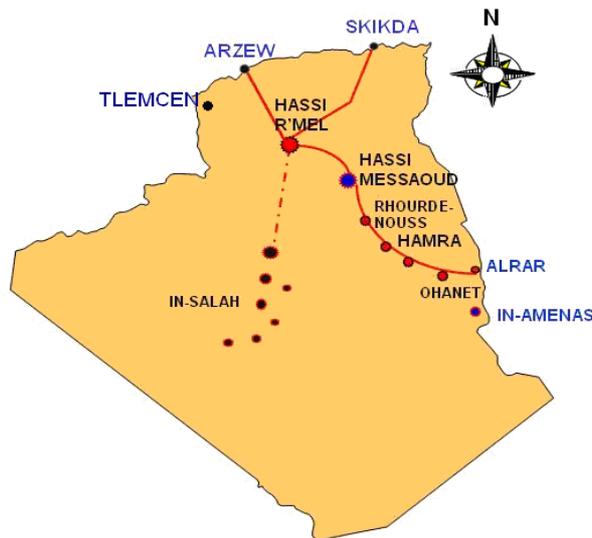


Figure 1.2 : situation géographique de Hassi R'Mel

1-2-5) Historique du champ de Hassi R'Mel :

La première campagne s'intéressant à la région a eu lieu en 1951, le forage du premier puits d'exploitation a eu lieu en 1952 à quelques Kilomètres de BERRIANE. Dans le champ de Hassi R'Mel, le premier puits HR1 a été foré en 1956 sous le sommet de l'anticlinal que constitue le gisement de Hassi R'Mel. Ce puits a mis en évidence la présence de gaz riche en condensât dans le trias gréseux sous une pression de 310 Kg/cm^2 et 90°C . La profondeur atteinte est de 2332 m, révélant la présence d'un réservoir de gaz humide. Le gisement de Hassi R'Mel est constitué de trois réservoirs :

Réservoir A :

S'étend sur tout le champ de Hassi R'Mel, son épaisseur varie sur l'ensemble du champ de 15 à 30m. Ses caractéristiques sont

- Porosité : 15%
- Perméabilité: 270.10^{-3} Darcy.
- Teneur en eau : 24%

Réservoir B:

Il est limité à la zone centrale et la zone nord du champ. Ses caractéristiques sont :

- Porosité : 15%
- Perméabilité : 250.10^{-3} Darcy
- Teneur en eau: 28%

Réservoir C:

Il s'étend sur la majeure partie du champ sauf la zone sud, c'est le plus épais des trois niveaux et le plus important. Ses caractéristiques sont :

- Porosité : 08%
- Perméabilité: 800.10^{-3} Darcy.
- Teneur en eau: 13%.

Le champ de Hassi R'Mel est d'une vaste étendue de 3500 Km^2 (70 Km de long sur 50 Km de large). Les réserves trouvées en place sont évaluées à plus de $2.8.10^{12} \text{ m}^3$.

1-2-6) Développement du champ de Hassi R'Mel :

Le développement du champ de Hassi R'Mel s'est trouvé étroitement lié au développement de l'industrie du gaz dans le monde et les importantes réserves recelées par ce gisement, plus de 2000 milliards de m^3 ont constitué un atout important pour lancer une politique d'industrie gazière de grande envergure pour le pays.

Trois étapes importantes ont marqué le développement du champ de Hassi R'Mel :

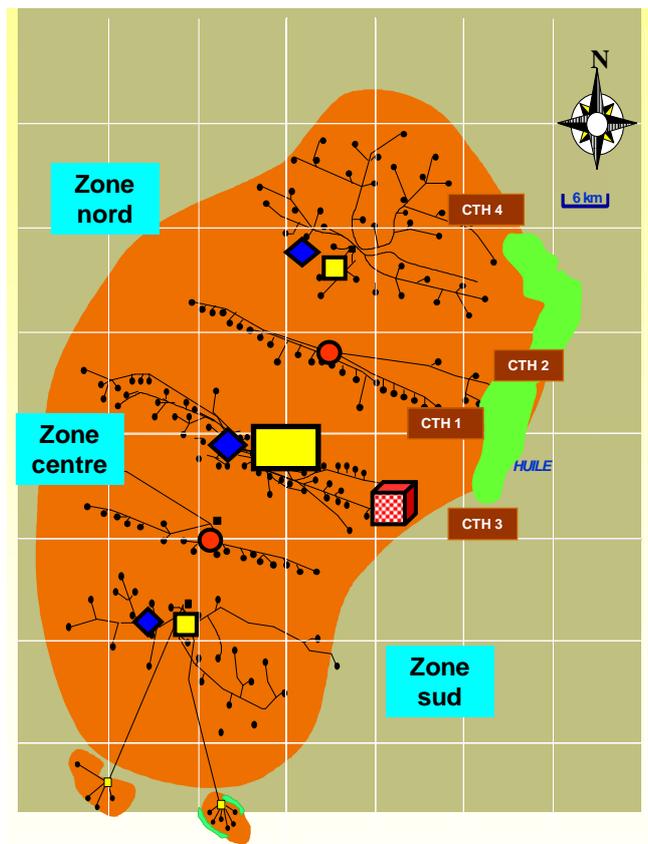
1^{ère} étape : 1961 : réalisation d'une petite unité de traitement du gaz de **1,3 milliards de m³/an**. Cette réalisation a coïncidé avec la construction de la première usine de liquéfaction du gaz, en **1964**.

2^{ème} étape : La capacité de traitement du champ de Hassi R'Mel a atteint, après la nationalisation des hydrocarbures en **1971**, **14 milliards de m³/an**.

3^{ème} étape : 1975-1980 : Cette période a permis de concrétiser un plan de développement qui concerne l'ensemble du champ de Hassi R'Mel.

1-3) Installations gazières à Hassi R'Mel :

Le plan de l'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi R'Mel est élaboré de façon à avoir une exploitation rationnelle du gisement et pouvoir récupérer le maximum de liquide. Les cinq modules de traitement de gaz (0, 1, 2,3, et 4) sont disposés d'une manière alternée par rapport aux trois stations de compression tel que présenté sur la figure 1.3 ci-après.



- : Unités de traitement gaz
- : Station de re injection de gaz
- ◆ : Station BOOSTING
- : Anneau d'huile
- : Centre de traitement d'huile
- : Station de Récupération des Gaz Associés

Figure 1.3 :
Carte des installations mises en œuvre

Zone Centre	Zone Nord	Zone Sud
Module de traitement de gaz 0, 1 et IV et les installations communes (communs ou Phase B). Centre de Stockage et de Transfert par Facilité (CSTF). Centre National de Distribution de Gaz (CNDG). Station de Récupération des Gaz Associés (SRGA).	Module de traitement de gaz 3. Station de Compression Nord (SCN).	Module de traitement de gaz 2. Station de Compression Sud (SCS). Centre de Traitement de Gaz CTG/Djebel-Bissa. Centre de Traitement de Gaz CTG/HR-Sud.

1-3-3) Les installations productrices :

- *Module de traitement de gaz MPP :*

MPP est le diminutif de Module Processing Plant. Il désigne une usine de traitement de gaz naturel à l'échelle industrielle.

Cinq modules sont implantés sur le champ de Hassi R'Mel ; quatre ont une capacité unitaire de 60 millions de m³. Le cinquième module 0, a une capacité de 30 millions m³ ; il est le plus ancien.

Il existe deux autres centres de traitement le HR sud et Djebel Bissa de capacité de 8 et 6 millions de m³ respectivement.

Ces installations produisent :

- Le Gaz sec.
- Le GPL
- Le Condensât

1-3-4) Les installations réceptrices :

1) Le Centre de Stockage et de Transport par Facilités (CSTF) :

Le condensât et le GPL produits sont envoyés vers le (CSTF) pour être stockés et acheminés vers les terminaux par l'intermédiaire des stations de pompage.

Il comprend trois bacs de 35000 m³ et quatre de 45000 m³ pour le stockage du condensat, douze sphères de 7000 m³ pour le stockage du GPL.

2) Le Centre National de Dispatching de Gaz (CNDG) :

Le centre a pour rôle de collecter toutes les quantités de gaz produits au niveau des installations productrices et le dispatcher vers les centres de consommation nationaux et internationaux (l'Italie et l'Espagne).

3) Station de compression (Boosting) :

Les stations de compression ont pour rôle de régler la pression du gaz à une pression suffisante qui puisse vaincre la pression naturelle du gisement. La capacité de réinjection de chaque unité est de 90 millions de m³ / jour.

Le but de la réinjection est de maintenir la pression afin de récupérer le maximum de liquide.

4) La Station de Récupération des Gaz Associés (SRGA) :

Elle permet de récupérer les gaz associés initialement torchés, du centre de traitement d'huile.

1-4) Généralités sur le gaz :

Le gaz naturel est un combustible fossile, il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures trouvés naturellement sous forme gazeuse. Il représente la deuxième source d'énergie la plus utilisée dans le monde après le pétrole, et son usage se développe rapidement.

Le gaz naturel provient des couches géologiques du sous-sol où il se trouve soit seul, soit en association avec du pétrole. Il est issu de la transformation naturelle, durant des millions d'années des matières organiques.

Il est principalement composé de méthane (70% environ), un des hydrocarbures les plus simples d'un point de vue chimique. Le gaz naturel contient aussi d'autres composés, présents en proportions plus ou moins importantes selon les gisements. On y trouve des hydrocarbures plus lourds que le méthane mais aussi des composés inorganiques comme la vapeur d'eau, le gaz carbonique et des sulfures d'hydrogène (qu'il faut éliminer), et même de l'hélium. En comparaison avec d'autres énergies fossiles le [gaz naturel](#) est considéré comme une énergie plutôt propre et son état gazeux permet en outre l'obtention d'une combustion complète, les gaz de combustion qui y sont dû ne contiennent presque pas d'hydrocarbures imbrûlés et peu de monoxyde de carbone (CO).

1-4-1) Les caractéristiques des produits de Hassi R'Mel :

Caractéristiques du gaz naturel :

Le gaz naturel possède des caractéristiques le spécifiant tels que :

- **La densité :** qui est le rapport de sa masse volumique à celle de l'air dans les conditions normales de pression et de température.
- **Le pouvoir calorifique :** qui est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de volume du gaz, mesurée dans les conditions normales. Le pouvoir calorifique pour le gaz naturel s'exprime en joules par mètre cube (J/m³).

❖ Il existe deux types de pouvoir calorifique :

- **Pouvoir calorifique supérieur (PCS) :** Correspondant à la chaleur dégagée lorsque tous les produits de combustion (hydrogène ou produits d'hydrogène) sont ramenés à la température ambiante, l'eau formée étant à l'état liquide.
- **Pouvoir calorifique inférieur (PCI) :** Correspondant à la combustion du gaz dans laquelle l'eau resterait à l'état vapeur.

Le **PCI** diffère du **PCS** d'une quantité de chaleur qui est égale à la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

- ❖ **La composition chimique :** est utilisée pour l'étude de la vaporisation. Elle sert aussi à calculer certaines propriétés du gaz en fonction de la pression et de la température (compressibilité, densité) et à définir les conditions de son traitement lors de l'exploration (extraction des produits liquides).

Le gaz naturel est classé selon la nature des phases en présence dans les conditions du gisement et de surface. Ceci conduit à distinguer les types suivants :

- **Gaz sec :** ne formant pas de phase liquide dans les conditions de production, le gaz est concentré en méthane et contient très peu d'hydrocarbures lourds.
- **Gaz humide :** formant une phase liquide en cours de production dans les conditions de surface, il est moins concentré en méthane.
- **Gaz à condensât :** formant une phase liquide dans le réservoir en cours de production, la phase condensée est riche en constituants lourds. C'est le type de gaz qu'en retrouve à Hassi R'Mel.
- **Gaz associé :** comprend le gaz de couverture (phase gazeuse présente en solution dans le pétrole) et les gaz dissous.

Gaz de pétrole liquéfié (GPL) :

Le butane et le propane, définis sous le terme général de GPL ou Gaz de Pétrole Liquéfiés, sont issus à plus de 60 % des champs de gaz naturel. Pour le reste, ils proviennent du raffinage du pétrole brut.

1.4.2) Caractéristiques et propriétés du GPL :

L'appellation « Gaz de Pétrole Liquéfiés » est exclusivement réservée au propane et au Butane, car ils sont les seuls à être gazeux à pression et température ambiante (1,013 bars et 15°C) et à se laisser liquéfier sous faible pression (respectivement à 7,5 et 1,5 bars).

Le butane et le propane partagent de nombreuses caractéristiques tous les deux à leurs états naturels sont incolores, inodores (pour des raisons de sécurité, l'ajout du mercaptan qui par son odeur bien caractéristique permet de détecter sa présence), non toxiques et non corrosifs (mais dissout le caoutchouc, la graisse et l'huile). Néanmoins, ils se distinguent par deux éléments qui sont leur pression de liquéfaction (passage de l'état gazeux à l'état liquide) ainsi que leur température d'ébullition (à laquelle un liquide se vaporise).

a) Propriétés du GPL :

Le gaz pétrole liquéfié possède des propriétés le distinguant des autres hydrocarbures tels que ;

- **La tension de vapeur :** Les GPL ont une tension de vapeur à 20°C égale à 2 bars pour le butane et 8 bars pour le propane.
- **La dilatation :** à l'état liquide, ils ont un haut coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de leur stockage (les sphères ne doivent jamais être complètement remplies.)
- **La densité :** Aux conditions normales de température et de pression, les GPL sont plus lourds que l'air. Le propane commercial en est une fois et demie plus lourd et le butane commercial en phase vapeur est deux fois plus lourd que l'air
- **La température d'ébullition :** A la pression atmosphérique la température d'ébullition du propane est de -42°C°, celle de butane est de -6°C°.
- **Le pouvoir calorifique :** Les GPL offrent une puissance énergétique nettement supérieure aux autres énergies. Cette efficacité nous est indiquée par leur [Pouvoir Calorifique](#).
- **Les impuretés :** Les plus importants sont le soufre dans le GPL, la teneur en soufre est inférieure ou égale à 0,005% en masse et pour le propane l'eau constitue la plus importante impureté.

1.5) Condensât :

Le condensât est constitué d'un mélange d'hydrocarbures parafiniques, de l'iso pentane jusqu'au dodécane et plus, généralement extrait des gisements de gaz à condensât, il est sous forme liquide dans les conditions normales de température et pression.

1.5.1) Caractéristiques du condensât :

Le condensât est un liquide incolore avec une odeur d'essence, il possède un **poinds spécifique** qui est compris entre [0,7-0,8] et ses vapeurs sont plus lourdes que l'air.

Le condensât est très inflammable, car il a un point d'éclair inférieur à 0 °C, ses limites d'inflammabilité sont approximativement de 1,4 à 7,6% vol (dans l'air).

1.6) Le MPP1 :

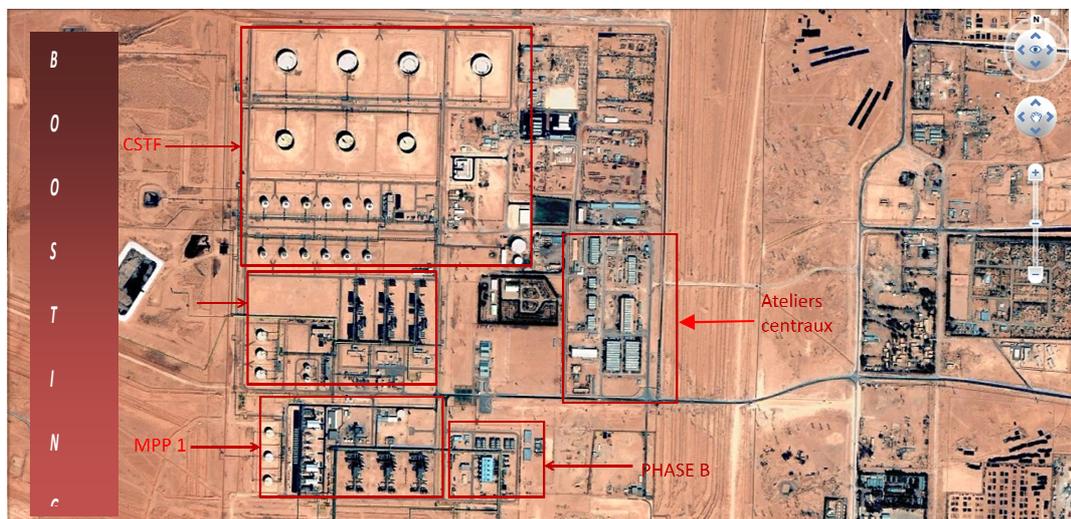


Figure 1.4 : Image satellite du site de MPP1

1.7) Procédés de traitement :

Les procédés de traitement de gaz sont différents dans le monde et le choix de l'un d'entre eux se base sur les critères suivants :

- Taux de récupération d'hydrocarbures liquides visés.
- Spécifications des produits finis.
- Coût global des investissements.
- La période dans laquelle les installations sont réalisées

Ainsi donc, pour le champ de HASSI- R'MEL, les procédés mis en œuvre sont au nombre de deux :

A- Procédé PRITCHARD :

Ce procédé est basé sur le refroidissement du gaz par échange thermique et par des détentes avec utilisation d'une boucle de propane comme système réfrigérant pour atteindre en fin de cycle des températures voisines de : -23°C . Et c'est ce procédé qui est utilisé en module 1 et on reviendra avec un peu plus de détails lorsqu'on évoquera le process par la suite.

B- Procédé HUDSON :

Ce procédé est basé sur le refroidissement du gaz par échange thermique et par une série de détentes complétées d'une détente à travers une machine dynamique appelée TURBO – EXPANDER qui permet d'atteindre un niveau de température de -40°C , le procédé HUDSON est plus moderne et permet une meilleure récupération des hydrocarbures liquides.

1.8) Présentation du module 1 :

Le MPPI a été conçu par les américains et mis en service en 1978. Sa tâche principale est de traiter le gaz brut et récupérer le maximum de **condensât**.

Le MPPI est divisé en trois trains identiques où l'on traite le gaz brut. Dans ce qui suit nous nous intéresserons uniquement au train I.

Comme tous les modules, on trouve une salle de contrôle doté du système DCS (Distribution Contrôle Système), qui assure le contrôle des trois trains ainsi que la section des utilities (unité de préparation régénération du glycol DEG ; air instrument et service ; eau de refroidissement et eau anti incendies).



Figure 1.5 : Zoom sur le site MPP1

Le traitement du gaz qui suit le procédé PRICHARD, utilisant une série d'échangeur G/G, des chiller afin de refroidir le gaz avant d'être détendu de manière adiabatique au niveau de la vanne Joule Thomson.

Les liquides récupérés sont débarrassés des légers au niveau d'un dé-éthaniseur puis fractionnés en GPL et condensât dans un dé-butaniseur.

❖ **Capacité de production :**

Le module 1 possède une grande capacité de production répartie comme suit :

- 60 millions de m³ / jour de gaz sec.
- 10 000 tonnes /jour de condensât.
- 2000 tonnes/jour de GPL.

On y trouve deux circuits, un pour les gaz et le second pour les liquides.

1.8.1) Circuit gaz :

Le module 1 est alimenté par 35 puits environ. Le gaz arrive à une température de 60 °C et 75 kg/cm² de pression. Le manifold assure la collecte (regroupement) du gaz. On trouve six collecteurs : Un à l'est et 5 à l'ouest.

Le gaz est composé de deux fractions :

➤ fraction gazeuse :

C'est la plus légère, composée essentiellement de méthane et d'éthane, de propane et de butane.

➤ Fraction liquide : on distingue deux phases :

- Condensât (hydrocarbures C₅⁺) et l'eau.

Auparavant le gaz en provenance du manifold entrait directement dans le diffuseur des trains à une pression de 130 kg/cm².

Vu l'exploitation excessive du gisement, la pression n'a cessé de chuter. Actuellement elle est de 75 kg/cm², ceci a conduit à l'installation de l'unité Boosting, à la sortie du celui-ci la pression avoisine les 100 Kg/cm².

Le gaz sortant du boosting est envoyé vers le diffuseur V201.

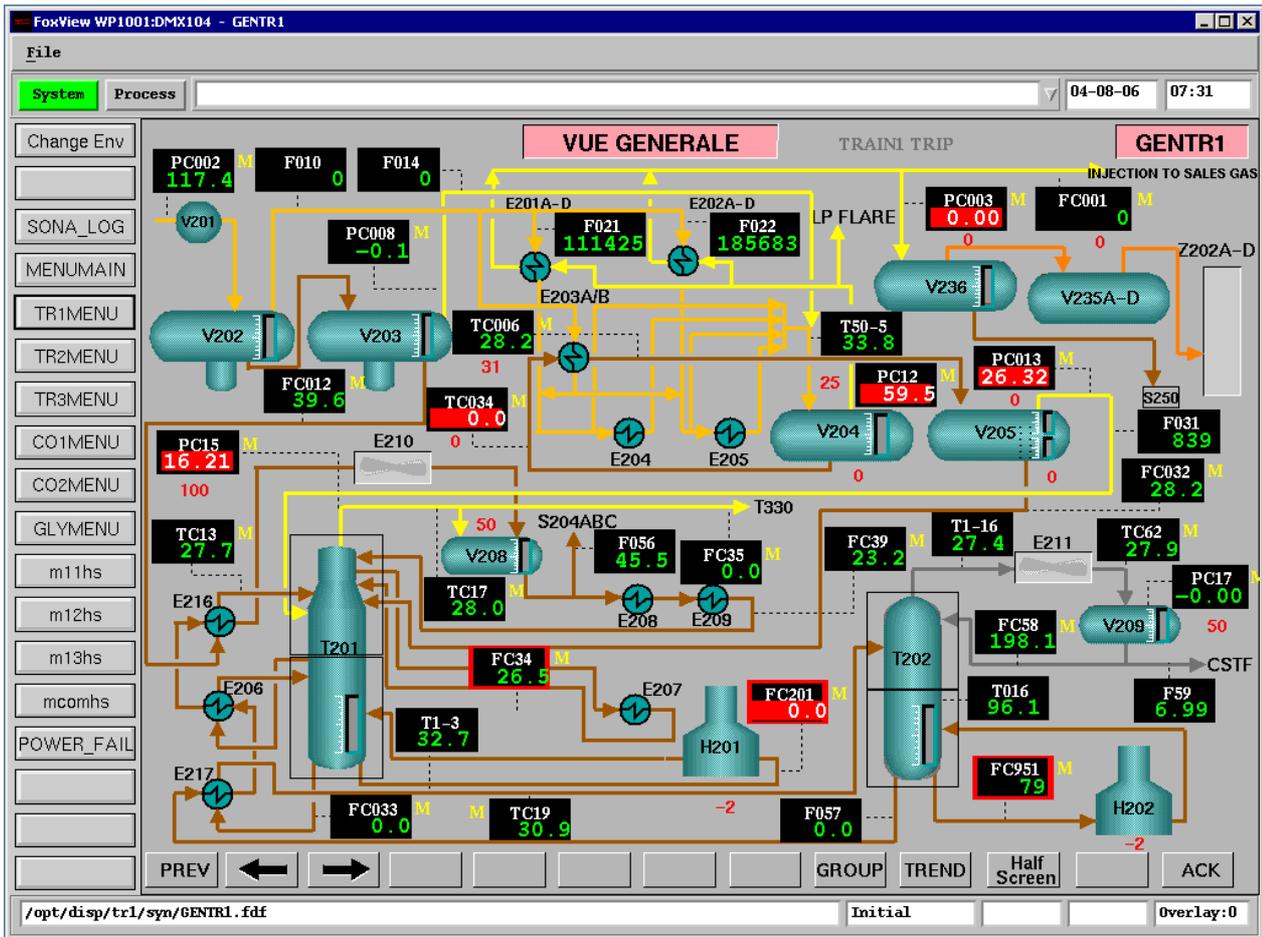


Figure 1.6 : Vue générale sur le procédé de traitement du gaz PRITCARD MPPI (train I)

a- Diffuseur V 201 :

C'est un ballon ayant comme taches l'homogénéisation de la charge et la répartition du débit entrant en provenance du boosting en trois parties égales et qui seront distribuées aux trois trains (TRAIN I, II, III)
 A la sortie du V201 il y a trois pipe-lines alimentant chacun un train à 100 Kg/cm² et 60°C.



Figure 1.7 : Zoom sur les trois trains du MPP1

b- Séparateur V202 :

C'est un séparateur tri-phasique permettant la séparation du gaz, eau, condensât par différence de densité.

Le gaz en provenance du V201 pénètre dans le V202 où il est flashé. Le gaz passe au sommet du ballon tandis que le condensât et l'eau au fond. La structure du ballon permet la bonne séparation des trois phases.

La pression et la température sont maintenues comme à la rentrée. A la sortie du V202 le gaz est acheminé vers une série d'échangeurs.

c- Batterie d'échangeurs :

Le gaz en provenance du V202 à une température de 60 °C et une pression de 100 kg/cm² pénètre dans trois batteries d'échangeurs :

- E201 : 04 échangeurs en série gaz/gaz.
- E202 : 04 échangeurs en série gaz/gaz.
- E203 : 02 échangeurs en série gaz/liquide.

Le but est de refroidir le gaz et le ramener à des températures assez faibles de l'ordre de -3°C la pression reste à 100 kg/cm².

Le gaz du V202 est réparti en 03 parties :

- **première partie :** vers le E201 du côté tube de l'échangeur cédant ses calories au gaz froid présent dans le côté calandre de l'échangeur.
- **deuxième partie :** vers le E202 de la même manière.

A la sortie des échangeurs la température atteint -2 à -3 °C.

Etant donné que le gaz renferme toujours des quantités d'eau résiduelle, il y a risque de givrage du côté tube de l'échangeur.

Pour remédier à ce problème on prévoit l'injection du glycol (antigivrant) à l'entrée du E201 et E202.

Le de- éthylène glycol présente une grande affinité pour l'eau et empêche le givrage.

- **Troisième partie :** Cette partie pénètre dans le E203 du côté tube cédant ces calories au liquide froid provenant du V204.

d- Les chillers :

Après la première série d'échangeurs le gaz passe dans des chiller E204 et E205.

Les chiller sont des échangeurs utilisant du propane liquide en provenance des communs pour le refroidissement du gaz.

Le gaz refroidi en E201 plus une partie de celui refroidi au niveau de E203 passe dans le E205. Tandis que celui refroidi en E202 plus une partie qui reste à E203 passe dans le deuxième chiller E205.

A la sortie des chillers la température du gaz atteint les -6°C -7°C, ce dernier est acheminé vers un séparateur V204.

e- Séparateur V204 :

Le gaz pénètre dans le ballon V204. A l'entrée une vanne appelée « Joule Thomson » assure une détente adiabatique du gaz, la pression chute jusqu'à 78 kg/cm² et la température à -18 °C.

Au sein du V204 on obtient deux phases ;

- Le gaz froid : il passe dans le côté calandre du E201 et du E202 pour refroidir le gaz d'entrée en cédant ces frigories à ce dernier.

Le gaz froid se réchauffe jusqu'à 60 °C, sa pression est de l'ordre de 75 kg/cm², il est ensuite acheminé vers le pipe-line gaz de vente.

- Le condensât : passe dans le côté calandre du E203 assurant ainsi le refroidissement du gaz chaud.

1.8.2) Circuit condensât :

a-Séparateur V202 :

Au niveau du V202 on sépare encore une fois l'eau, le gaz et le condensat par différence de densité. L'eau est récupérée du fond du ballon et est évacuée vers un puisard S210 puis vers zone borbier en module 0 à environ 1Km au sud.

Le condensât sortant alimente le dé-éthaniseur T201 en passant par un autre ballon où il sera détendu et mélangé au condensât provenant du boosting.

➤ **Alimentation chaude :**

Les hydrocarbures liquides (condensât et GPL) en provenance du V 202A 60 °C et 100 kg/cm² passe dans un deuxième séparateur V203 où ils sont détendus adiabatiquement jusqu'à 30 kg/cm² (à 60 °C) et sont mélangés avec les hydrocarbures liquides en provenance du boosting le tout servira à alimenter la T 201 en passant par un échangeur de préchauffage E216 du côté calandre. Du côté tube on trouve du condensât chaud issue de la T202 (dé-butaniseur). Les gaz récupérés au niveau du V203 alimentent aussi la T201. En définitif, le dé-éthaniseur à trois alimentations.

➤ **Alimentation froide :**

Le condensât récupéré ainsi que le glycol du V204 passe à travers une vanne de détente où ils sont détendus jusqu'à 25 kg/cm² et une température de -30°C. Après échange thermique au niveau du E203, le liquide passe dans un ballon de séparation du glycol V205. Ce dernier fonctionne à 25 kg/cm² et 30 °C (paramètres de séparation de glycol). Le mélange condensât, glycol est séparé par différence de densité. Le glycol est acheminé vers le S214 (unité de régénération) en passant par une vanne de détente.

Le condensât est acheminé vers le dé-éthaniseur T201 à une température de 30 °C et une pression de 25 kg/cm².

b- Dé-éthaniseur T201 :

(T TETE DE COLONNE 18°C ; T FOND DE COLONNE 168 °C ; P : 21 kg/cm² ; hauteur : 65 m ; nombre de plateaux : 34).

C'est une colonne de distillation fractionnée ayant comme tâche principale la récupération d'un maximum de gaz sec (C1, C2).

Sous l'effet de la température les légers passent en tête, tandis que les lourds (condensât et GPL) restent au fond de la colonne.

La T201, comme toute colonne de distillation, comprend trois parties :

➤ **Zone d'enrichissement :**

C'est la partie supérieure comprenant 15 plateaux. Cette partie est refroidie par deux reflux (latéral, principal). Le but du reflux est de condenser toutes les particules lourdes entraînées avec le gaz léger.

✓ **Zone de flash :**

C'est la zone d'alimentation de la colonne constituée de deux plateaux, dans laquelle pénètrent le gaz et le condensât.

✓ **Zone d'épuisement :**

Zone inférieure de la colonne comprenant 17 plateaux, son rôle est d'évaporer les légers se trouvant au fond de la colonne grâce à des rebouilleurs principal et latéral.

❖ **Rebouilleur de la zone d'épuisement :**

✓ **Rebouilleur latéral :** Le liquide sort de la partie inférieure du 26^{ème} plateau et revient vers sa partie supérieure.

✓ **Rebouilleur principal :** Une partie du liquide est aspirée de la partie inférieure de la colonne par des pompes (P201 a/b/c dont une en marche, la deuxième en stand by et la dernière d'urgence) à une température de 160 °C puis refoulé vers le four H 201.

Le four H201 : C'est un four comprenant 12 brûleurs à fuel gaz (gaz sec). Le four est revêtu de brique réfractaire résistant à la chaleur.

Le liquide entre du haut du four à travers six passes pour optimiser la surface d'échange thermique. Il traverse la zone de convection (345°C) pour se réchauffer puis vers la zone de rayonnement (547°), il sort de la partie inférieure du H201 à une température de 170 °C.

❖ **Refroidissement de la zone de rectification :**

✓ **Reflux latéral :** le liquide est aspiré par la pompe (P 202 a/b), et refoulé vers un chiller de refroidissement E207 en fin vers le 5^{ème} plateau de la colonne.

✓ **Reflux principal :** Il est assuré par les produits froids du ballon tampon V208 refroidit au niveau des chiller E208 jusqu'à une température de 12 °C. Une fois refroidit les produits sont refoulés vers la tête de la colonne.

- ✓ **Les gaz de tête :** Les gaz de tête sortent à une température de 18 °C et une pression de 21 kg/cm², ils sont dirigés vers le collecteur gaz de tête unité des communs, où ils seront comprimés et débarrassés des traces d'humidité afin de les injecter dans le pipe-line de gaz de vente.
- ✓ **Résidu (condensât instable C 5+) :** Les résidus de la T201 sont envoyés vers la deuxième colonne T202.

c- Débutaniseur T202 :

(T TETE DE COLONNE : 60 °C ; T FOND DE COLONNE 180 °C ; P : 12 kg/cm² ; Hauteur : 40m ; nombre de plateaux : 31)

Au niveau de la T202 on sépare le GPL C₃ et C₄ du condensât C₅+. La colonne est aussi constituée de trois zones :

- ✓ **Alimentation :** Les produits du fond de la T201 débarrassés du C₁ et C₂ sont préchauffés dans l'échangeur de préchauffe E217 puis dirigés vers le dé-butaniseur T202 au 24^{ème} plateau.
- ✓ **Rebouilleur principal :** Les produits du fond de la T201 débarrassés du C₁ et C₂ sont aspirés et refoulés par la pompe (P 204a/b) à une température de 170°C vers le four H202 ayant la même conception que le H201. Le liquide suit le même chemin décrit pour le H201, passant par la zone de convection (370°C), zone de radiation (620°C) en fin il retourne à la colonne à une température de 185°C.
- ✓ **Le reflux de tête :** Les C₃ et C₄ sont récupérés en tête de la colonne et sont refroidis dans des aeroréfrigérants puis dirigés vers un ballon intermédiaire (tampon) V209.

Une partie du GPL du V209 est aspirée par la pompe P205 (a, b) à la température de 45°C puis refoulée en tête de la T202, en vue de condenser les gaz lourds C₅⁺ entraînés avec le GPL en tête de colonne.

- ✓ **Gaz de tête :** Les gaz de tête passent à travers les aeroréfrigérants E211 en vue d'un refroidissement de 60°C à 45°C, ils sont acheminés, en suite, vers le V209, une partie du GPL part vers le reflux et l'autre partie vers le stockage.
- ✓ **Le résidu de la T202 (condensât stabilisé C₅⁺) :** Le condensat stabilisé passe à travers le E217, le E206 et le E216 pour le refroidissement. Il pénètre, en suite, dans l'aeroréfrigérant E210 puis vers le V208 à une température de 30 °C.

Une partie est refoulée par la V208 pour reflux principal de la T201 l'autre partie vers stockage.



1.8.3) Le système de torche

Figure 1.8 : Colonnes de séparation

Le système de torche est utilisé pour des raisons de sécurité du module en cas de surpression, et elle se divise en trois parties :

Torches HP :

Le MPP1 comprend 12 torches HP divisé sur les trois trains.

Toutes les piqûres à travers les trains destinées aux torches HP venant du V203, V205, T201, du gaz de vente à travers la vanne de pression PV3, se réunissent dans le V236 a/b/c ou ils subissent une petite séparation de condensât par décantation, puis les gaz sont envoyés vers les quatre ballons d'alimentation des torches (V235 a/b/c/d).

Torche BP :

Le ballon d'alimentation des torches à basse pression V231 est alimenté par les ballons de basse pression (V230, V209, V208), qui sépare à son tour les liquides qui s'y trouve en l'envoyant vers le bourbier, et dégage les gaz vers la torche BP (une seule au module).

Torche TBP :

Elle est utilisée pour les gaz d'évaporation des bacs de stockage.

2.1) Introduction :

Comme nous venons de le constater les procédés technologiques dans le domaine du pétrole et du gaz comprennent essentiellement des procédés de chauffage et de refroidissement des produits soutirés. Dans la colonne de rectification on rencontre deux principaux phénomènes le transfert de matière et le transfert de chaleur ; au niveau de chaque plateau les vapeurs d'hydrocarbures lourds se condensent tandis que les hydrocarbures légers contenues dans la phase liquide s'évaporent.

Les procédés dans lesquelles la vitesse de chauffage et/de refroidissement est déterminante sont dits thermiques et les appareils utilisés sont appelés échangeur de chaleur. La force motrice de l'échange de chaleur est la différence de température.

Au tout début de l'exploitation des hydrocarbures le refroidissement était assuré par de l'eau et la plus grande quantité d'eau utilisée dans les raffineries et les unités pétrochimiques sert à la condensation et au refroidissement des produits traités.

Au tout début de l'industrie des hydrocarbures les opérations de refroidissement sont assurées par de l'eau. La consommation d'eau dans les usines atteint entre 200 à 300 millions de m³ par an, et l'utilisation d'eau comme de refroidissement cause énormément de problèmes tel que :

- _ La grande consommation d'énergie (véhiculer et refroidir l'eau).
- _ Le nettoyage des tubes entartrés (frais d'entretien et arrêt de l'unité).
- _ La pollution des nappes d'eau douce (1m³ d'eau usée pollue des centaines de m³ d'eau douce et cela nécessite la mise en œuvre de moyens techniques pour purifier cette eau).

Ceci a conduit les raffineurs à trouver d'autres fluides de refroidissement économiquement et techniquement compétitifs que l'eau.

La nouvelle technologie de refroidissement de la fin des années 70 s'avérait être performante utilisant des condenseurs et des refroidisseurs et réfrigérants à air, dans ces appareils l'échange thermique s'effectue à l'aide du passage d'air à travers la section libre du faisceau tubulaire (l'aeroréfrigérant).

L'aeroréfrigérant est un appareil qui comprend une surface d'échange constituée de tubes à ailettes placés dans des sections et un système de régulation qui sert à varier le débit d'air en agissant sur les angles des pales.

La circulation d'air est assurée par des ventilateurs qui peuvent être placés au dessous du faisceau tubulaire (tirage forcé) ou au dessus du faisceau tubulaire (tirage induit), les ailettes des tubes font croître la surface d'échange des tubes de 5 à 20 fois compensant l'insuffisance de transfert de chaleur coté air par rapport à l'eau.

Les aeroréfrigérants permettaient de moderniser les installations en augmentant la productivité, en évitant la pollution de nappes d'eau douce et en réduisant les pertes des produits.

L'espace occupé par les aeroréfrigérants atteint 1,4 à 2,45% du territoire des usines modernes tandis que les réfrigérants à eau peuvent occuper jusqu'à 15%.

En fonction de l'angle des pales du ventilateur la caractéristique aérodynamique change dans l'intervalle : débit d'air 65 10³ à 290 10³ m³/h ou de 18 à 80 m³/s la chute totale de pression 42 à 403 Pa la consommation propre 3,9 à 53 kW.

En plus simple l'aeroréfrigérant est un moteur asynchrone qui entraîne une charge qui n'est autre qu'un grand ventilateur avec des pales soient fixe ou variable afin de faire varier la température du produit circulant dans les conduites et cela selon des consignes bien déterminées selon les besoins.

2.2) Types d'aeroréfrigérants :

- **Aeroréfrigérants à tirage forcé** : se sont ceux qui sont situés au dessous du faisceau tubulaire leur système de transmission de mouvement est une courroie trapézoïdale, ils sont à pales fixes.
- **Aeroréfrigérants à tirage induit** : se sont ceux qui sont situés au dessus du faisceau tubulaire repartis en deux catégories :
 1. Aeroréfrigérant à pales fixes : se sont ceux qui sont situés sur le coté Est de la batterie ils n'ont aucune stratégie de régulation ils sont soit à l'arrêt soit en marche, la transmission de mouvement est assurée, comme celle des aeroréfrigérant à tirage forcé, par des courroies trapézoïdales.
 2. Les aeroréfrigirants à pales variables : sont ceux qui sont situés sur le coté Ouest de la batterie ils ont une régulation pneumatique qui avec de l'air comprimé arrive à faire varier le débit d'air en changeant l'inclinaison des pales d'un angle entre 13° à 45° , et c'est sur ceux là que nous allons reparler avec plus de détails par la suite.

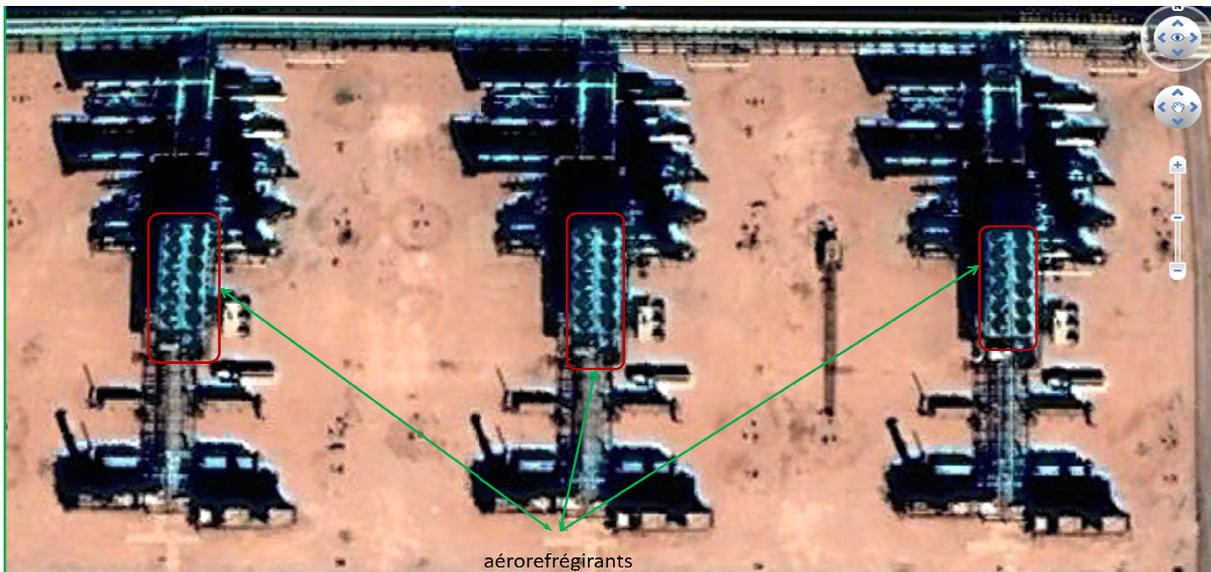


Figure 2.1 : Aeroréfrigirants image satellitaire

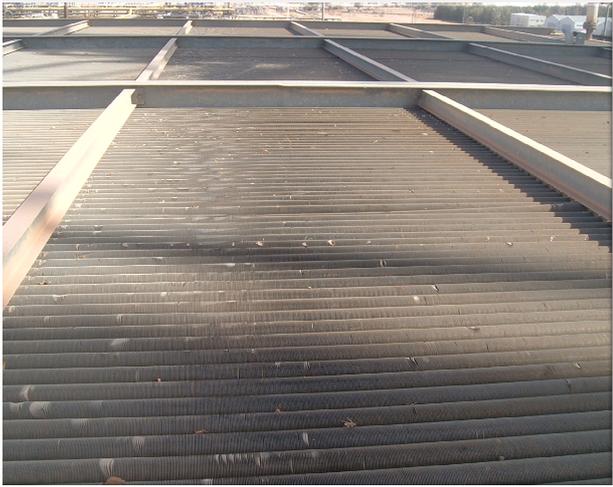


Figure 2.2 : Faisceau tubulaire



Figure 2.3 : Tirage forcé



Figure 2.4 : Tirage induit



Figure 2.5 : Pales fixes



Figure 2.6 : Pales variables

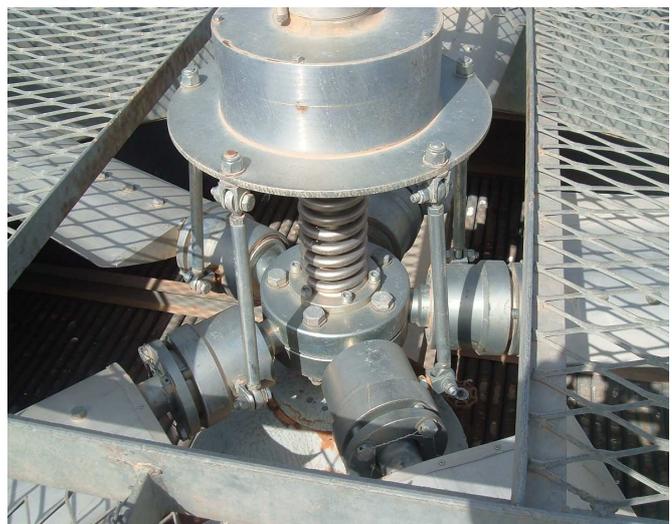


Figure 2.7 : Système de variation des pales

Ce qu'il faut retenir dans le process (procédé de PRITCHARD) c'est que toutes les opérations de refroidissement dans une gamme de température, allant de 45°C à 65°C, sont assurées via les aeroréfrigérants. Ainsi, leur rôle est plus qu'important dans le procédé de traitement du gaz.

2.3) Régulation de la température :

Dans ce qui suit lorsque on parle de régulation de température on sous entend les parties du process ou les aeroréfrigérants interviennent.



Figure 2.8 Photo du système à réguler

Lorsqu'on désire une régulation de la température du fluide à refroidir, on fait varier le débit d'air de refroidissement, en fonction de la charge thermique (température du fluide à la sortie des colonnes) et de la température ambiante. Le réglage du débit s'effectue à l'aide d'un ventilateur à ailettes variables, dont l'angle de calage des pales est réglable à l'aide d'un mécanisme pneumatique appelé positionneur.

2.3.1) *Fonctionnement du système de refroidissement :*

Le refroidissement du gaz brut jusqu'à 40°C est assuré par des aeroréfrigérants à travers des tubes des batteries d'échangeur. Le système de refroidissement d'une série de batteries d'échangeur est composé de douze ventilateurs dont six sont à pales fixes et six à pales variables. L'aeroréfrigérant à pales variables est équipé d'un dispositif de réglage automatique d'inclinaison des ailettes actionné par un mécanisme pneumatique situé sur le ventilateur.

Les ventilateurs utilisent en conjonction un capteur de température (CA) qui est situé dans le compartiment de l'échangeur de la chaleur, ce capteur détecte les variations de température et transmet un signal électrique, allant de 4mA à 20mA, à l'entrée d'un convertisseur [TT112] qui le transforme en signal de (0 à 10 V) qui sera injecté à l'entrée d'un régulateur [TIC112]. Ce régulateur compare le signal reçu avec le signal de consigne, ensuite il transmet un signal électrique allant de (0 à 10V) vers la carte électronique (2AC-V3I) cette carte convertie ce signal à un autre de (4 à 20mA) puis il est transformé une pression de (3 à 15 Psi) à l'aide d'un convertisseur courant- pression (P/I). Cette pression va agir sur le Booster qui augmente le débit d'air, qui va actionner le mécanisme du positionneur qui fait tourner l'arbre d'ailette. Avec cette variation de position des ailettes on peut avoir le débit d'air balayé ainsi souhaité.

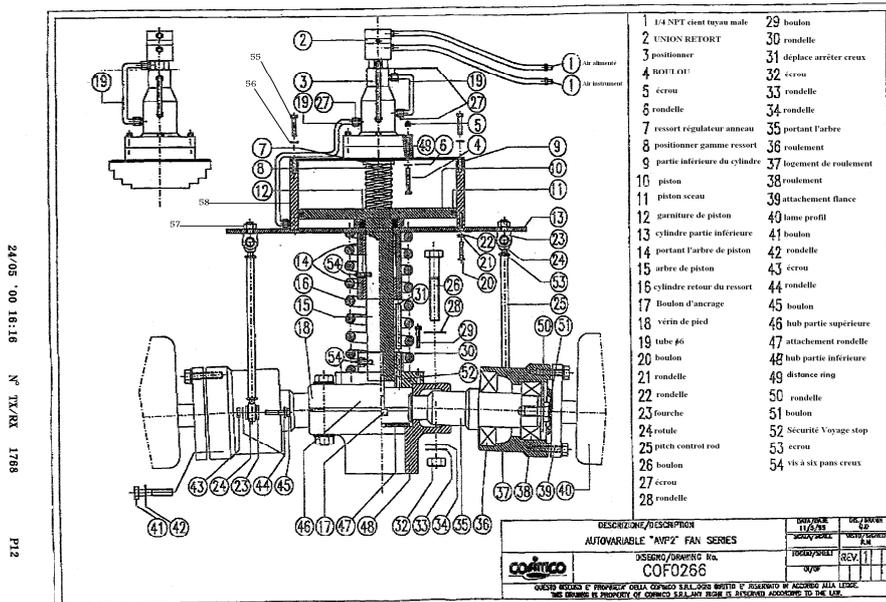


Figure 2.9 : Schéma des différentes parties d' un ventilateur à pales variables



Figure 2.10 : Aperçu sur le mécanisme qui fait varier l' angle des pales

2.3.2) Positionnement du problème :

Parmi les phases de traitement du gaz on trouve le refroidissement par des échangeurs gaz/gaz constitués par une série d'aéroréfrigérants disposés en batteries. Dans ces batteries la température de chaque produit doit être maintenue à une plage bien respectée. Si la valeur de la température sort de la plage admissible il y aura soit une mauvaise spécification du produit où déclenchement des vannes de sécurité qui vont alimenter les torches (le produit sera incinéré et perdu dans la nature).

Le système de refroidissement actuel utilise un positionneur pneumatique pour le réglage du débit d'air qui refroidit le gaz (condensât et GPL), seulement, ce système présente des anomalies, illustrés par un nombre de pannes très élevé spécialement au niveau du circuit pneumatique.

On cite à titre d'exemple un cas concret dans l'unité MPP1, la mise hors service d'un d'aéroréfrigérants est justifiée par le manque d'un positionneur indisponible qui influe sur le processus de régulation.

d) Conséquences de l'arrêt du système de refroidissement ou de la mauvaise régulation:

Si la température du gaz brut ou du GPL dépasse celle admissible, la condensation de ces produits ne sera pas suffisante, ce qui augmente la pression dans les ballons, dont la sécurité est assurée par des vannes. En cas de surpression elles s'ouvrent, dirigeant le produit vers un circuit appelé réseau torche qui a pour rôle de recevoir les gaz excédentaires et les brûler en cas d'anomalies.

e) Inconvénients du système pneumatique:

Le système présente un nombre important d'anomalies.

- Manque de fiabilité, fréquence des pannes élevée ;
- Les pièces de rechanges sont très chères et indisponibles sur le marché ;
- Pertes de puissance et rendement médiocre.
- Pertes d'air instrument.
- Frais d'entretien et de la main d'œuvre.
- Nécessite de source d'alimentation par l'air instrument.
- Nécessite un sécheur d'air.

f) Pannes fréquemment enregistrées :

D'après l'historique des aéroréfrigérants, les pannes les plus fréquemment enregistrées sont:

- L'usure des flexibles et capillaires d'air ;
- La détérioration des roulements à billes au niveau du positionneur ;
- Le bouchage des détendeurs d'air ;
- Le décalage des angles des ailettes ;
- La détérioration du raccord union rotatif ;
- Le blocage du système de positionnement des pales ;
- Le changement des bobines magnétiques au niveau du convertisseur courant pression [I/P].
- L'usure des joints rotatifs.
- Le desserrage et cisaillement des boulons de fixation.
- L'usure Silentbloc



Figure 2.11 : Photos des avaries survenues sur le système

Les images qui ont précédés sont des photos qui ont été prises sur l'un des trois trains et montrent d'une façon claire l'ampleur des dégâts que subit la commande des aeroréfrigérants.

La fiabilité des aeroréfrigérants peut se calculer d'après la fréquence des pannes enregistrées sur (RAPIER 5.0). La durée d'observation des pannes s'étend de 1997 jusqu'au début de 2004.

	Ventilateurs									
Train	Pales fixes					Pales variables				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	2	5	4	1	3	8	3	3	4	2
2	5	0	2	0	4	8	5	3	7	5
3	4	4	3	3	2	6	2	6	4	4
Total	11	9	9	4	9	22	10	12	15	11
TBF (Heures)	5575	6813	6813	15330	6813	2787	6132	5110	4088	5575

Tableau 2.1 : comparaison des fréquences des pannes entre pales fixes et pales variables.

Donc le temps de bon fonctionnement des ventilateurs à pales fixes est de (8269), il est supérieur au temps de bon fonctionnement à pales variables (4498).

NB : ces statistiques sont relevées en comparant un aeroréfrigérant à pales fixes avec un autre à pales variables elles concernent le MPP3, ceux du MPP1 étant indisponibles vue la différence entre les deux systèmes (système à pales fixes et variables) donc ils ne sont pas sujet à comparaison.

Coté économique :

La répétition des pannes qui sont devenues de plus en plus fréquentes, l'épuisement et le non approvisionnement de stock de pièces de rechange ont contraient les ouvriers qui s'occupent de la maintenance d'abandonner la réparation des systèmes défectueux et de jouer sur le nombre de moteurs à mettre en marche pour pouvoir réguler la température. C'est-à-dire sur les douze moteurs existant on augmente le nombre de moteur en service lorsque la température augmente et on le diminue dans le cas contraire, ce qui pose des problèmes évidents, des démarrages fréquents (appels de courant élevé et consommation excessive d'énergie électrique) outre l'impossibilité d'avoir un réglage fin de la température ce qui pose le problème majeur à cause des conséquences néfastes que cela implique sur le process (instabilité ou mauvaise spécification des produit GPL et condensât ou déclenchement des vannes de sécurité ; en cas d'augmentation de température ; qui vont diriger le produit vers le circuit des torches ou ils

seront brûlés au lieu d'être stockés et vendus). Outre ces inconvénients on peut aussi citer à titre de référence les prix suivants:

- Le prix d'un raccord union rotatif est : 4000 euros (€)
- Le prix d'un roulement est : 50 000 DA
- Le prix des joints spi est environ : 50 000 DA.

2.4) Conclusion :

Etant donné que le système actuel est défaillant, révolu, dépassé par le temps et présente des anomalies du point de vue technique et économique, on se propose dans ce qui suit de chercher une solution de remplacement par un autre système de régulation de température plus moderne plus fiable et plus compétitif sur le plan économique.

3.1) Introduction :

Comme nous venons de le voir, précédemment, d'après l'historique des pannes, les systèmes à pales fixes tiennent mieux que les systèmes à pales variables, donc la première idée qui vient à l'esprit est fixer toutes les pales à un angle d'inclinaison qui serait préférable au maximum de leurs inclinaison (45°) afin de tirer profit le plus possible et avoir un meilleur rendement.

Reste le problème de la régulation proprement dite dont la solution proposée après avoir fixé les pales est de varier la vitesse de rotation des moteurs donc enlever tout le dispositif pneumatique et le remplacer par d'autres dispositifs plus efficaces, techniquement réalisables et économiquement compétitifs.

C'est dire qu'on passe d'un système entraîné à vitesse fixe avec inclinaison variable des pales à un système d'inclinaison des pales fixe mais cette fois avec un entraînement à vitesse variable et c'est ce que nous essayons d'atteindre dans ce qui suit.

Plusieurs solutions sont offertes dont les plus concrètes sont les variateurs de vitesse à fréquence fixes dits communément gradateurs ou variateurs à fréquence de tension d'alimentation variable (onduleurs), et afin de nous fixer sur un choix il est utile de faire le tour de la question.

3.2) Caractéristiques de la charge entraînée [6] :

Les aeroréfrigérants sont des ventilateurs entraînés par les moteurs asynchrones, et la connaissance de la variation de ses grandeurs en fonction de la vitesse s'avère très importante pour la suite du travail (couple résistant et puissance appelée).

Le couple résistant dans le cas des ventilateurs est proportionnel au carré de la vitesse et la puissance mise en jeu dans ce cas est donc fonction du cube de la vitesse.

$$Cr = kN^2$$

$$p = k'N^3$$

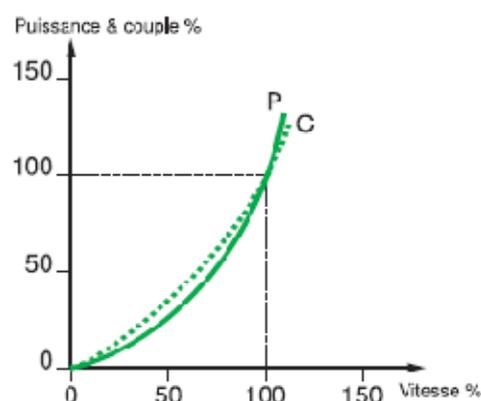


Figure 3.1 : Caractéristique du couple et de la puissance en fonction de la vitesse d'un ventilateur

Conséquences :

Les conséquences qui en découlent de cette particularité sont intéressantes et on peut les expliquer en deux exemples symétriques :

- Supposant que la vitesse est réduite de moitié, conséquences le couple se divise par quatre, la puissance appelée, elle, par huit.
- Supposant maintenant que la vitesse est doublée, cela voudrait dire que le couple serait multiplié par quatre et la puissance par huit.

Donc, un fonctionnement en sous vitesse est favorisé par la charge tandis qu'un fonctionnement en survitesse est pénalisé cette dernière.

Plusieurs techniques dédiées à la variation de vitesse existent et on les repartit sur deux catégories principales :

- Variateurs à fréquence fixe (gradateur);
- Variateur à fréquence variable (onduleur, cycloconvertisseur)

3.3) Le gradateur [2]:

3.3.1) Principe :

En négligeant la résistance statorique le couple électromagnétique (C_{em}) d'un moteur asynchrone triphasé est donné par la relation :

$$C_{em} = \frac{3pm^2V_s^2\left(\frac{R_r}{\omega_s g}\right)}{(R_r/g)^2 + (lr\omega_s)^2} \quad (3.1)$$

Avec :

g : le glissement $g = \frac{(N_s - N)}{N_s}$

Ou $N_s = \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{\omega_s}{2\pi p} = \frac{f}{p}$ est la vitesse en tr/s du champ tournant (vitesse du synchronisme) et $N = \frac{\Omega}{2\pi}$ vitesse du rotor (tr/s)

lr inductance de fuites totales par phase du rotor : $lr = \sigma L_r$

Ou σ est le coefficient de dispersion est L_r est l'inductance propre du rotor

m : le rapport de transformation du moteur

R_r : la résistance par phase du rotor

P : nombre de pair de pôles

V_s : valeur efficace de la tension par phase du stator

ω_s : pulsation statorique

Le couple électromagnétique est proportionnel au carré de la tension statorique, ainsi la variation de la tension statorique modifie la caractéristique $C_{em}(N)$ comme indiqué sur la figure 3.2. Les intersections avec la courbe $C_r(N)$ du couple résistant imposée sur l'arbre du moteur en fonction de la vitesse montrent que la vitesse évolue avec la tension.

Deux caractéristiques $C_r(N)$ ont été tracées, correspondant à :

$C_r = cte$ et $C_r = kN^2$

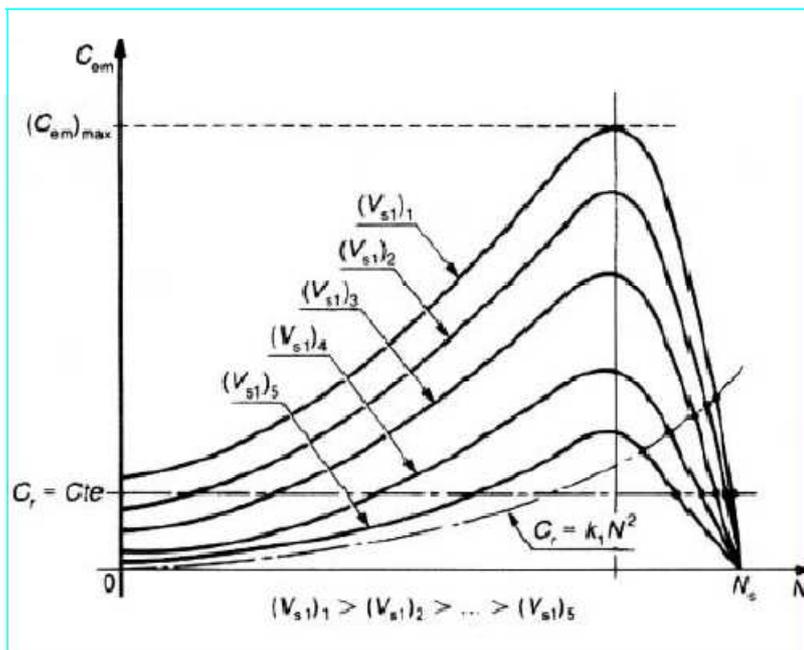


Figure 3.2 : point de fonctionnement en fonction de tension statorique

Pour faire varier l'amplitude de la tension statorique, on intercale entre le réseau et le stator un convertisseur à thyristors, appelé **gradateur**, le schéma, constitué par trois ensembles de deux thyristors montés tête-bêche, est indiqué sur la figure 3.3.a. Le réglage de V_s se fait par action sur l'angle d'amorçage α des thyristors.

Les formes idéalisées de la tension et du courant associés à la phase 1 du stator sont données sur la figure 3.3.b.

Les amorçages des semi-conducteurs sont synchronisés sur les tensions d'alimentation, de manière à maintenir sur les trois phases des signaux identiques, déphasés entre eux de $2\pi/3$.

Pour augmenter la plage de variation de vitesse, il faut utiliser des moteurs à fort glissement, c'est-à-dire des moteurs à cage très résistante. L'inconvénient réside dans leur mauvais rendement ; en effet, celui du rotor, seul, vaut $(1 - g)$. L'utilisation de moteurs asynchrones, de construction classique et auto ventilés, nécessite de prendre en compte l'évolution des pertes rotoriques en fonction de la vitesse.

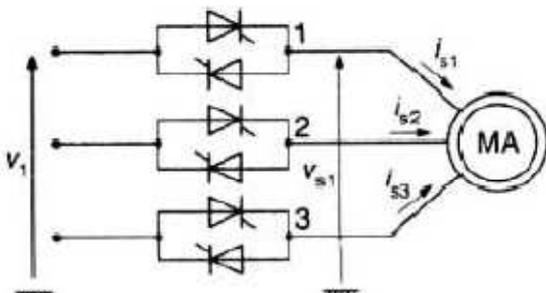


Figure 3.3.a : Trois ensembles de deux thyristors montés tête-bêche associés à une machine

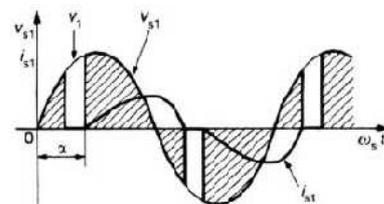


Figure 3.3.b : V_1 tension du réseau

Les parties hachurées sont délimitées par la

3.3.2) L'association gradateur-moteur asynchrone présente les avantages suivants :

- simplicité du montage ;
- faible cout ;
- commutation naturelle des composants ;
- utilisation de moteurs à cage ;
- fonctionnement dans les quatre quadrants du plan

couple-vitesse.

Mais elle est caractérisée par deux principaux **inconvénients** :

- faible variation de vitesse ;

- utilisation limitée aux faibles puissances (quelques kilowatts), en raison de la dégradation du rendement avec la diminution de vitesse (apparition d'harmonique de tension d'ordre inférieur qui engendre des harmoniques de courant donc de couple ;
- augmentation des pertes

Cette solution, en dépit des avantages qu'elle présente serait inefficace car elle est presque exclusivement utilisée dans les phases de démarrage (démarreurs progressifs), ajouter à ses inconvénients déjà énumérés rendent l'utilisation de cette technique peu souhaitable dans un régime continu de variation de vitesse, ainsi elle est inadéquate dans le cas présent. En effet, la faible variation de vitesse diminue notre pouvoir de contrôle sur la température, et les pertes considérables nous privent de la possibilité de faire des économies d'énergie à long terme.

Ceci dit, nous sommes contraints d'essayer d'autres techniques de variation de vitesse des moteurs asynchrones qui consiste en l'utilisation des variateurs de fréquence et d'essayer de voir ce qu'elle nous peut apporter de mieux.

Dans ce qui vient nous essayons d'expliquer le principe et les différentes étapes caractérisant cette technique.

3.4) Variateur de fréquence :

3.4.1) Description :

a) Objectif :

L'objectif des variateurs de vitesse de type « convertisseurs de fréquence » est d'alimenter les moteurs asynchrones triphasés de manière à obtenir des caractéristiques de fonctionnement radicalement différentes de leur utilisation normale (moteurs alimentés en direct par la tension réseau), à amplitude et fréquence constantes. Plus loin nous présenterons les avantages de ces dispositifs dans un tableau en faisant une comparaison entre un MAS alimenté par le réseau industriel et un autre alimenté via un convertisseur de fréquence.

b) Principe :

La vitesse du rotor d'un moteur asynchrone est donnée par la relation :

$$N = N_s(1 - g) = \frac{60f}{p}(1 - g)$$

g : glissement ;

f : fréquence statorique ;

p : nombre de paires de pôles

On voit clairement que toute action sur la fréquence, devient une action sur la vitesse du synchronisme donc sur la vitesse de rotation du rotor.

La solution qui consiste à faire varier la fréquence de la source d'alimentation paraît *à priori*, la plus simple pour faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone. La mise en œuvre de ce principe pour des applications industrielles utilise un **convertisseur triphasé-triphasé** qui transforme le système industriel triphasé de tensions de fréquence et d'amplitude fixes, aux légères fluctuations normales près, en un système triphasé de tensions ou de courants de fréquence et d'amplitude maîtrisées.

Les principaux types de convertisseurs employés pour les moteurs asynchrones sont des **convertisseurs indirects de fréquence**, c'est-à-dire qui utilisent un étage intermédiaire à tension ou courant continu délivrés par un convertisseur alternatif-continu (redresseur) et un convertisseur continu-alternatif (onduleur) qui consiste à fournir au moteur une onde de tension à amplitude et fréquence variables, en maintenant le rapport **tension / fréquence sensiblement constant** solution privilégiée par la plupart des industriels. La génération de cette onde de tension est réalisée par un dispositif électronique de puissance dont le schéma de principe est illustré (voire figure). Plusieurs technologies de convertisseurs reposent sur ce principe, selon que l'étage à tension ou courant continu est constitué d'une source de tension ou d'une source de courant et selon les formes d'ondes produites par l'onduleur.

Pendant des **convertisseurs directs de fréquence**, dénommés cyclo-convertisseurs, qui réalisent la conversion de fréquence sans recourir à un étage intermédiaire à fréquence nulle, sont aussi utilisés pour des cas particuliers d'entraînements par moteurs asynchrones de forte puissance (quelques mégawatts).

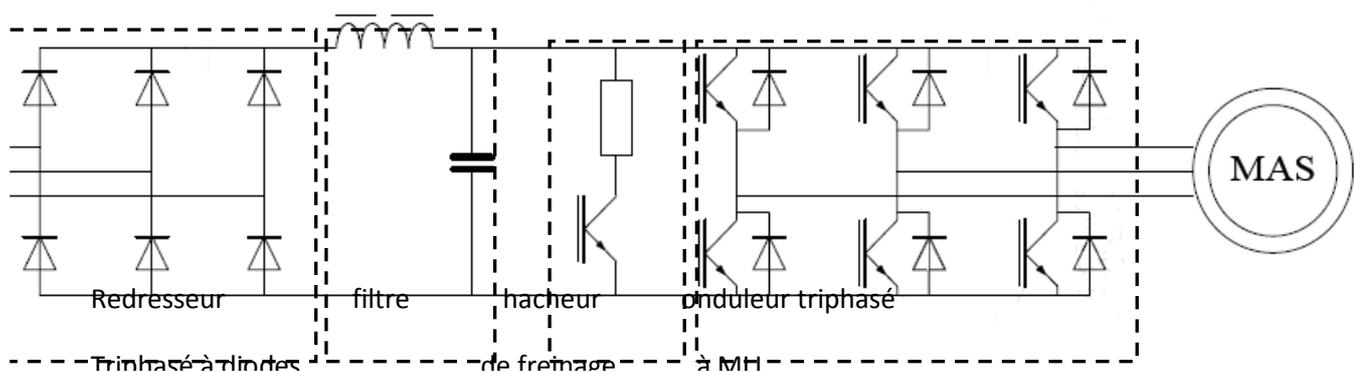


Figure 3.4 : Le schéma de principe de ce convertisseur de fréquence

Le schéma de principe de ce convertisseur de fréquence présenté sur la figure 3.4 comporte :

- un redresseur triphasé à diodes qui délivre une tension continue d'amplitude pratiquement constante (pour une tension alternative d'alimentation constante) ;
- un étage de filtrage, comportant principalement un condensateur de forte capacité ;
- Un hacheur de freinage : lors de la phase de freinage, le moteur asynchrone fonctionne en générateur et l'onduleur fonctionne en redresseur, pour récupérer cette énergie, le condensateur de filtrage se charge, ceci se traduit par une élévation de la tension à ses bornes, lorsque la tension atteint un seuil défini, le transistor est commandé pour que la résistance de freinage soit mise en service pour décharger le condensateur (l'énergie de freinage est dissipée).
- un onduleur de tension délivrant des impulsions de tension d'amplitude fixe mais de largeur variable, qui, en moyenne, restituent un système de tensions d'amplitude et de fréquence variables ; en général, la tension fondamentale est d'amplitude proportionnelle à la fréquence de façon à maintenir un flux magnétique (rapport U/f) constant dans le moteur sur toute la plage de vitesse.

L'onduleur nécessite l'utilisation d'interrupteurs électroniques de puissance entièrement commandables, c'est-à-dire dont la mise en conduction et le blocage sont maîtrisables à chaque instant ; c'est pourquoi on utilise actuellement :

- des transistors IGBT, systématiquement pour les variateurs de puissance inférieure à 200 kW environ ; les variateurs MLI à transistors IGBT deviennent de plus en plus usuels pour des puissances supérieures, atteignant 1 MW ;
- des thyristors GTO, pour des puissances de quelques centaines de kilowatts à 3 MW environ.

3.4.2) Avantages de l'utilisation des convertisseurs de fréquence :

Les principaux avantages découlant de l'utilisation des variateurs de fréquence sont illustrés dans le tableau suivant [3] en comparant les différentes grandeurs d'une machine asynchrone alimentée via un réseau industriel de tension et fréquence fixe à celles d'une machine asynchrone alimentée via un convertisseur de fréquence.

Moteur asynchrone	Usage normal	Avec variateur de vitesse
Courant de démarrage	Très élevé de l'ordre de 6 à 8 fois le courant nominal en valeur efficace. 5 à 20 fois en valeur crête	Limité dans le moteur (environ général 1.5 fois le courant nominal)
Couple de démarrage C_d	Elevé et non contrôlé de l'ordre de 2 à 3 fois le couple nominal C_n	De l'ordre de 1.5 fois le couple nominal C_n et contrôlé pendant toute

		l'accélération.
Démarrage	Brutal, dont la durée n'est fonction que des caractéristiques du moteur et de la charge entraînée.	Progressif et sans-à-coup et contrôlé
Vitesse	Varie légèrement selon la charge (proche de la vitesse du synchronisme)	Variable à partir des basses vitesses jusqu'à vitesse nominale et même au delà
Le couple max C_m	Elevé de l'ordre de 2 à 3 fois le couple nominal C_n .	Elevé disponible sur toute la plage de vitesse (de l'ordre de 5 fois le couple nominal)
Freinage électrique	Relativement complexe, nécessite des protections et un schéma particulier	Facile
Risque de décrochage	Oui en cas du surcouple $C_r > C_m$	non

Tableau 3.1 : Comparaison des caractéristiques d'un moteur asynchrone connecté directement au réseau et un moteur asynchrone connecté au

réseau via un variateur de vitesse

Si nous faisons une lecture du tableau on constate que les moteurs asynchrones alimentés à fréquence variable présentent le sérieux **avantage** à savoir de ne donner aucune surintensité appréciable lors du démarrage, car les convertisseurs permettent de régler la fréquence et la tension du moteur pendant le démarrage de sorte à n'appeler au réseau qu'un courant voisin du courant nominal.

- Ils ne nécessitent donc aucun surdimensionnement en puissance du circuit d'alimentation et peuvent démarrer aussi souvent que nécessaire sans risques de sur-échauffement.

Cependant, comme tout convertisseur électronique de puissance industriel, les variateurs électroniques absorbent au réseau des courants entachés d'harmoniques qui induisent sur le réseau d'alimentation des tensions harmoniques susceptibles de perturber le fonctionnement des récepteurs alimentés par ce même réseau.

Il faut donc veiller à ce que les harmoniques engendrés par ces convertisseurs ne polluent pas le réseau. En cas de difficultés, il existe des solutions qui permettent de résoudre les problèmes en réduisant le taux de pollution harmonique. Cela peut être soit le raccordement, lorsque cela est possible, à une source de plus forte puissance, soit l'utilisation de convertisseurs à structure adaptée, soit l'installation de filtres anti harmoniques à composants passifs voire actifs (un convertisseur

piloté de façon adéquate engendre un spectre d'harmoniques qui compense le spectre d'harmoniques perturbateurs).

L'utilisation d'un moteur asynchrone associé à un variateur de fréquence présente la particularité de pouvoir obtenir un couple nominal de la machine dans une plage étendue de vitesse et c'est cela sans doute l'avantage le plus important de variateur de fréquence. On peut définir les zones préférentielles de fonctionnement en traçant les courbes de fonctionnement dans le plan du couple-vitesse des deux moteurs dans on constatera l'étendu du domaine de fonctionnement des MAS alimentés via un convertisseur de fréquence.

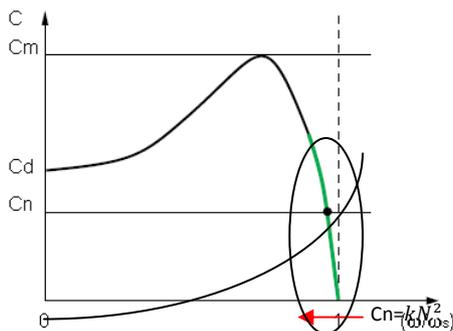


Figure 3.5 : Diagramme couple vitesse d'un moteur alimenté en direct. La zone du bon fonctionnement du moteur est limitée à la partie encadrée de la courbe.

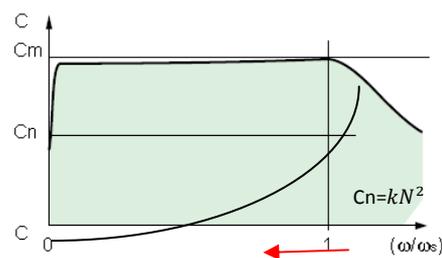


Figure 3.6 : Diagramme couple-vitesse d'un moteur alimenté par convertisseur de fréquence.

La zone de fonctionnement du moteur

3.5) Choix des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones : [2]

Les technologies d'entraînements à vitesse variable pour moteurs asynchrones sont nombreuses et viennent compléter les technologies disponibles pour les moteurs à courant continu et les moteurs synchrones. Le choix de la technologie et de la structure du convertisseur dépend de nombreux facteurs liés à l'application visée.

Parmi les principaux **facteurs techniques** de choix figurent :

- Nature de l'application ;
- la puissance et la vitesse nominales ;
- Nature de l'application ; le régime d'utilisation (utilisation en régime permanent ou intermittent) ;
- la plage de variation de vitesse et le domaine de fonctionnement dans le plan puissance-vitesse (1 quadrant, 2 quadrants, 4 quadrants) ;
- le type de machine entraînée (inertie, caractéristique de couple résistant selon la vitesse) ;

- la précision de contrôle de couple et de vitesse ;
- la tension du réseau d'alimentation ;
- les contraintes d'installation (place disponible, degrés de protection, etc.).

Plus, un critère essentiel qui est bien sûr le **coût** total d'**investissement** de l'entraînement comprenant le coût du variateur, du moteur et de leur installation.

Le coût d'exploitation de l'entraînement (maintenance, cout et disponibilité de la pièce de rechange, pertes énergétiques...etc.) est un critère supplémentaire de choix (critère économique).

Après avoir opté pour un variateur de fréquence type onduleur on se ramène à choisir une loi de commande qui va avec et là nombreuse sont les lois et le choix est multiple parmi elle la loi de commande à v/f constant, le contrôle vectoriel du flux sans capteur « *SFVC* » (*sensorless flux vectoriel control* en anglais) ou contrôle de flux avec capteur. Et le tableau suivant nous fait la part des choses concernant le choix de la loi de commande.

3.6) Choix de loi de commande :

Loi de commande	Gamme de vitesse	Précision de vitesse	Couple à l'arrêt	applications
Convertisseur de fréquence v/f constant	1 à 10 1 à 20	$\pm 1\%$	non	Pompe, ventilateur, compresseur, convoyeur, agitateur...
Contrôle vectoriel de flux sans capteur	1 à 100	$\pm 1\%$	non	Pompe doseuse, levage manutention, machine à cycle machine d'emballage et conditionnement
Contrôle vectoriel avec capteur	1 à 100	$\pm 0.01\%$	oui	Levage lourd, manutention automatisée avec précision,

Tableau 3.2 : Le choix d'une loi de commande [3]

Si nous revenons à notre cas, où les charges à entraîner sont des ventilateurs qui servent à refroidir les gaz contenus dans des conduites afin de les ramener à une température qui permet une bonne condensation ainsi qu'une bonne stabilisation, le contrôle à v/f constant paraît être la solution qui constitue l'offre

technique la plus satisfaisante. Au-delà des avantages présentés précédemment ses inconvénients n'influent guère sur le bon fonctionnement du système considéré, en effet pour pallier à l'inconvénient de la chute de tension statorique, en basses vitesses notamment, le fait d'avoir douze moteurs nous résout le problème, car nous pouvons jouer sur le nombre de machines à mettre en service en arrêtant un ou plusieurs moteurs (selon les besoins) permet aux autres d'évoluer dans des conditions correctes (pas très loin des conditions nominales). On est même pas amené à recourir à une compensation quelle qu'elle soit la chute de tension statorique, sans oublier la particularité de la charge entraînée qui n'est autre qu'un ventilateur qui exerce un couple résistant qui varie en fonction du carré de la vitesse et la puissance au cube de la vitesse ce qui veut dire concrètement et à titre d'exemple que si la vitesse est amenée à être divisée par deux le couple résistant lui le serait par quatre et la puissance par huit. On peut donc, sans inconvénient, diminuer le flux du moteur et donc la tension d'alimentation, pour une fréquence inférieure à la fréquence nominale, tout en assurant au moteur un couple de décollage suffisant même à basse vitesse, ce qui simplifie davantage le problème. Cependant, un fonctionnement prolongé à basse vitesse même à couple nominal est fortement déconseillé car les moteurs sont auto ventilés et une ventilation forcée n'est pas prévue sur ses moteurs d'où le risque d'échauffement.

Un fonctionnement en sur vitesse n'est pas privilégié, car ce qui est vrai en sous vitesse est tout aussi en sur vitesse, c'est-à-dire, et juste à titre d'exemple, si la vitesse venait de doubler le couple résistant serait multiplié par quatre et la puissance par huit accompagnés par une chute du couple moteur car pour aller en survitesse, seule la fréquence est augmentée, la tension ne suit plus pour ne pas détériorer les isolations de la machine ce qui entraîne une chute du flux, une approche à v/f n'est plus correcte, ajouter à cela les limites de résistance mécanique des pales qui ne sont pas conçues pour fonctionner au-delà de la vitesse qui leur est propre. Tout ça fait qu'on doit éviter un fonctionnement en survitesse, et de toutes les façons on ne demandera pas au variateur d'entraîner les moteurs en survitesse. On rappelle que tout au début de ce chapitre nous avons suggéré de mettre les pales à leur inclinaison maximale, c'est là tout l'intérêt, car une inclinaison max à 45° des pales plus un entraînement à vitesse nominale des moteur représente le point commun des deux techniques de régulation et correspond au balayage maximum dont l'efficacité est prouvée avec la régulation pneumatique.

La loi de commande à v/f est élaborée à partir du modèle statique (Schéma de Steinmetz) valable en régime permanent sinusoïdal. Ceci a pour conséquence que le couple électromagnétique n'est plus contrôlé lors du régime transitoire. La précision atteinte sera donc modeste. Seules les grandeurs moyennes, comme le couple électromagnétique par exemple, sont contrôlées, pas les grandeurs instantanées. Les régimes à variation lente peuvent être envisagés avec cette approche.

Nos moteurs entraînent des ventilateurs qui est une application d'entraînement électrique relativement simple qui ne nécessite pas des performances dynamiques, en outre ils sont appelés à réguler une température. Sachant que les constantes de temps thermiques sont très grandes comparativement aux

constantes de temps mécaniques, elles, à leur tour, très grandes devant les constantes de temps électriques donc, en gros on va dire qu'au moment de la variation de la température toutes les grandeurs mécaniques et bien évidemment électriques caractérisant les moteur ont atteint leurs régimes permanents respectifs, pour ces mêmes raisons, une grande précision sur la vitesse n'est pas exigée car une grandeur thermique ne subira pas une variation au tour/minute près.

Sans parler du coté économique, qui fait qu'à chaque fois qu'on s'accroche sur plus de précision et plus de performances cela s'accompagne inévitablement par une augmentation excessive du prix, en finalité des dépenses qui seront inutiles, c'est pour toutes ces raisons que nous avons opté pour la loi de commande à $v/f=\text{constante}$ qui est simple et efficace et répond à toutes nos exigences.

4-1) Introduction

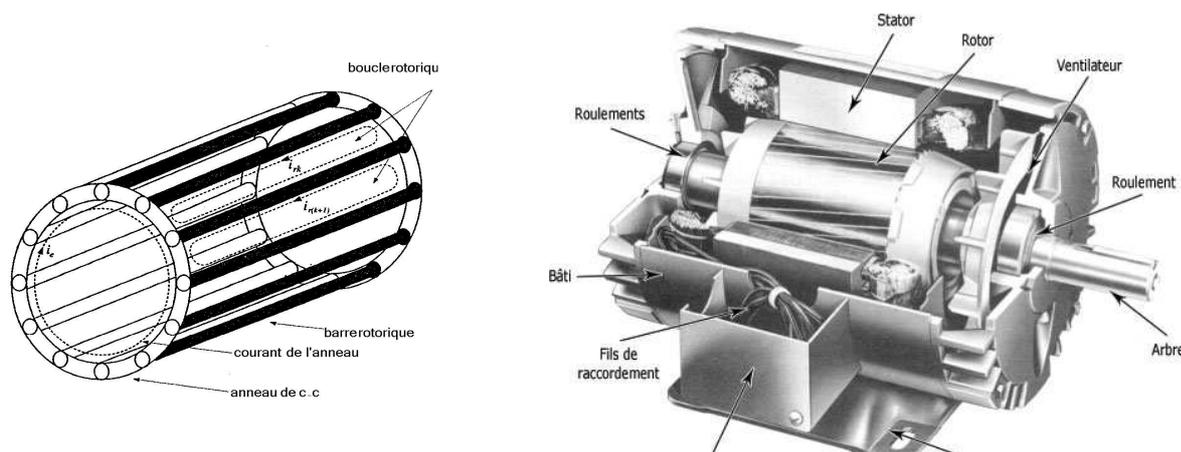
Le but de ce chapitre est de montrer comment la machine asynchrone peut être utilisée dans des applications d'entraînements à vitesse variable en se basant sur le modèle de la machine en régime permanent sinusoïdal (schéma équivalent). [9]

Le moteur asynchrone est utilisé essentiellement pour la commande en vitesse en boucle ouverte, pourtant, dans les techniques les plus développées de sa commande et selon la performance des capteurs de position utilisés (en boucle fermée), il peut servir à certaines commandes de positionnement. Mais, avant on doit décrire, même brièvement, le moteur asynchrone à cage ainsi que son mode de fonctionnement. [7]

a) Description : [4]

Un moteur asynchrone à cage se présente sous la forme d'un carter entourant le circuit magnétique, ferromagnétique, statorique et qui accueille dans des encoches l'enroulement statorique polyphasé (généralement triphasé) bobiné en fil de cuivre isolé. À l'intérieur de ce circuit magnétique, qui se présente comme un cylindre creux, sépare par un entrefer, tourne le circuit magnétique rotorique qui accueille dans ses encoches les barreaux de la cage rotorique, en aluminium coulé ou en cuivre, court-circuités à chaque extrémité par des anneaux réalisés dans le même matériau. Le circuit magnétique rotorique est traversé par l'arbre qui repose sur des paliers montés dans les flasques fixés au carter.

Le moteur asynchrone à cage est donc caractérisé par la présence d'un seul bobinage polyphasé au stator, alimenté par une source extérieure, et d'un bobinage massif en court-circuit au rotor.



b) Principe de fonctionnement : [11]

Le stator est alimenté par un système de tensions triphasé équilibré (le rotor est au repos) les lignes du champ tournant qui proviennent du stator (théorème de FERRARI) coupent les barres du rotor et engendrent une tension induite, et comme ces barres sont court-circuitées à leurs extrémités par les deux anneaux, des courants intenses circulent dans le circuit rotorique étant donné que la résistance des barres est faible.

Ces conducteurs traversés par des courants interagissent avec le flux provenant du stator ce que les soumet à des forces électromagnétiques qui tendent à les entrainer dans le sens du champ. Ces forces créent un couple qui met le rotor en mouvement.

A mesure ou le rotor accélère la vitesse de coupures des lignes du champ chute entraînant la chute de l'intensité des courants induits qui était élevée au démarrage.

La vitesse du rotor continue à augmenter mais n'atteindra jamais celle du champ tournant (synchronisme) car le flux ne couperait plus les conducteurs ce qui annulerait la tension et les courants induits. Donc la vitesse de rotation du rotor doit être légèrement inférieure à celle du synchronisme ce qui justifie l'appellation « moteur Asynchrone ».

Résumé :

Pour faire fonctionner un moteur asynchrone il faut :

- un système de tension triphasé qui crée un champ tournant.
- ce champ crée une tension induite au rotor.
- Cette tension induite au rotor donne naissance à des courants dans les barres court-circuitées placées dans l'action d'un champ magnétique.
- l'interaction entre ce champ et ces courants crée la force qui fait tourner le rotor dans le sens du champ.

En effet soit :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (4.1)$$

Où ω_s : Désigne ici la pulsation du réseau d'alimentation triphasé statorique (pulsation de synchronisme), p désigne le nombre de paires de pôles.

Les trois bobinages du secondaire (la cage d'écureuil) sont court-circuités et le rotor tourne à une vitesse Ω inférieure à celle du champ tournant $\Omega \neq \Omega_s (\Omega < \Omega_s)$.

Le rotor perçoit donc un champ glissant à la vitesse relative Ω_r égale à :

$$\Omega_r = \Omega_s - \Omega \quad (4.2)$$

D'où la fem induite dans les bobinages, serait à la pulsation:

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad (4.3)$$

Une fois de plus on constate aisément que pour que la machine développe un couple, il faut que le bobinage rotorique soit traversé par un flux variable. En régime permanent sinusoïdal (amplitudes, phases et fréquences des tensions et courants constantes), ce qui nous rappelle que le rotor doit tourner une vitesse différente (inférieure) à celle du champ statorique.

Ainsi, la vitesse angulaire du champ tournant ω_s ($\frac{d\theta_s}{dt}$) et celle du rotor ω ($\frac{d\theta}{dt}$) doivent être asynchrones pour que la machine fournisse du couple.

La différence entre ces deux vitesses, en pourcentage par rapport à celle du champ tournant, s'appelle le glissement (g), il est très faible lorsque la machine fournit son couple nominal:

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (4.4)$$

La différence des pulsations s'appelle également pulsation de glissement. Elle correspond à la pulsation des grandeurs électromagnétiques relatives au rotor (tensions, courants, flux,... etc.).

$$\omega_r = \omega_s - \omega = g \omega_s \quad (4.5)$$

D'où

$$f_r = g f_s \quad (4.6)$$

Avec f_r et f_s sont respectivement les fréquences des grandeurs rotoriques et statoriques (tensions courants flux)

$$\omega_s = p\Omega - \omega_r$$

Modélisation de la machine :

La modélisation de la machine constitue une étape incontournable que se soit lors de la conception, ou commande...etc.

On peut modéliser la machine asynchrone selon différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés, et les modèles en grandeurs de phases, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques, qui sont essentiellement utilisés pour l'étude des régimes permanents, que nous développerons afin d'aboutir à la stratégie de commande.

4.1.2 Définition des enroulements de la machine asynchrone :

Le stator de la machine est constitué de trois enroulements répartis dans l'espace et séparés d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$ radians. Le rotor que ce soit à cage d'écureuil ou bobiné, est aussi représenté de trois enroulements court-circuités sur eux même, car un système de courant triphasé symétrique s'établit lors d'un fonctionnement en régime permanent. La figure (4.1) présente la schématisation des enroulements du stator et du rotor.

La machine asynchrone est surtout utilisée comme moteur, on adoptera alors les conventions de signe suivantes [5]:

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une f.é.m positive fait circuler un courant positif.
- Le stator est considéré comme récepteur, le rotor comme récepteur.
- Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

4.2 Equations de la machine asynchrone triphasée :

4.2.1 Equations électriques du moteur :

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque enroulement du système, nous obtenons :

$$[v_s] = \frac{d}{dt} [\varphi_s] + [R_s][i_s] \quad (4.7)$$

$$[v_r] = \frac{d}{dt} [\varphi_r] + [R_r][i_r] \quad (4.8)$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où :

$[v_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T$: Tensions instantanées aux bornes des enroulements statoriques ;

$[v_r] = [v_{ar} \quad v_{br} \quad v_{cr}]^T$: Tensions instantanées aux bornes des enroulements rotoriques ;

$[i_s] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T$: Courants dans les phases des enroulements statoriques ;

$[i_r] = [i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]^T$: Courants dans les phases des enroulements rotoriques ;

$[\varphi_s] = [\varphi_{as} \quad \varphi_{bs} \quad \varphi_{cs}]^T$: Flux totalisés instantanés traversant les enroulements statoriques ;

$[\varphi_r] = [\varphi_{ar} \quad \varphi_{br} \quad \varphi_{cr}]^T$: Flux totalisés instantanés traversant les enroulements rotoriques.

4.2.2 Equation des flux

Les flux totalisés des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous forme :

$$[\varphi_s] = [l_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (4.9)$$

$$[\varphi_r] = [l_r][i_r] + [M_{sr}]^t [i_s] \quad (4.10)$$

L'isotropie et la symétrie de la machine fait que les inductances propres des phases statoriques sont égales, il en est ainsi de même pour celles du rotor.

Les matrices « L_s » et « L_r » s'écrivent alors:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

l_s, l_r : inductances propres statoriques et rotoriques ;

m_s : inductance mutuelle entre phases statoriques ;

m_r : inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor, elle s'écrit :

$$[M_{sr}] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

m_{sr} : inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

4.2.3 Equation mécanique [6]

L'étude des régimes transitoires fait intervenir en plus des grandeurs électriques (tensions, courants), les grandeurs mécaniques (vitesse, couple, inertie, frottements). Lorsque la vitesse angulaire est constante, le couple résistant appliqué (y compris celui des frottements) à l'arbre de la machine asynchrone est équilibré par le couple électromagnétique et l'équation d'équilibre des couples s'écrit [6]

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (4.12)$$

J : inertie de toutes les masses tournantes ramenées au rotor de la machine [Nm^2] ;

C_{em} : couple électromagnétique [Nms] ;

ω : vitesse angulaire du rotor [rad/s] ;

$f\omega$: Couple dû aux frottements du système d'entraînement ;

C_r : couple mécanique de la charge.

4.3 Modèle du moteur asynchrone en régime permanent et schéma équivalent

4.3.1 Modélisation en régime permanent sinusoïdal

Un régime permanent sinusoïdal est caractérisé par ses grandeurs d'alimentation sinusoïdale dont les fréquences, les amplitudes et les déphasages sont constants au niveau des grandeurs statoriques, de plus la vitesse de rotation (mécanique) reste constante.

Les tensions statoriques forment un système triphasé équilibré à la pulsation ω_s :

$$\begin{cases} v_{sa} = V_S \cdot \cos(\omega_s t) \\ v_{sb} = V_S \cdot \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{sc} = V_S \cdot \cos(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (4.13)$$

Les courants statoriques forment un système triphasé équilibré à la pulsation ω_s .

$$\begin{cases} i_{sa} = I_S \cdot \cos(\omega_s t - \beta_s) \\ i_{sb} = I_S \cdot \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} - \beta_s) \\ i_{sc} = I_S \cdot \cos(\omega_s t - \frac{4\pi}{3} - \beta_s) \end{cases} \quad (4.14)$$

Avec $\beta_s = \widehat{(i_{sa}, v_{sa})}$

Les courants rotoriques forment un système triphasé équilibré à la pulsation ω_r .

$$\begin{cases} i_{ra} = I_R \cdot \cos(\omega_r t - \beta_r) \\ i_{rb} = I_R \cdot \cos(\omega_r t - \frac{2\pi}{3} - \beta_r) \\ i_{rc} = I_R \cdot \cos(\omega_r t - \frac{4\pi}{3} - \beta_r) \end{cases} \quad (4.15)$$

Dans les expressions des flux, l'angle θ qui donne la position du rotor par rapport au stator est une fonction du temps puisque il y'a un glissement, on peut écrire $\theta = \omega t$ en supposant qu'à $t = 0$, les axes du stator et du rotor soient coïncidents, $\omega = P \cdot \Omega$ prend en compte le nombre de paires de pôles de la machine. Les éléments de la matrice des mutuelles sont aussi des fonctions du temps ; en reprenant l'équation (4.10) d'une phase, il vient :

$$\varphi_{sa} = l_s \cdot i_{as} - m_s \cdot i_{as} + m_1 \cdot i_{ar} + m_2 \cdot i_{br} + m_3 \cdot i_{cr} \quad (4.16)$$

$$i_{bs} + i_{cs} = -i_{as} \quad (4.17)$$

On pose :

$l_s - m_s = L_S$: Inductance cyclique statorique.

$$\varphi_{sa} = L_S \cdot i_{as} + (m_1 \cdot i_{ar} + m_2 \cdot i_{br} + m_3 \cdot i_{cr}) \quad (4.18)$$

Posant $(m_1 \cdot i_{ar} + m_2 \cdot i_{br} + m_3 \cdot i_{cr}) = A$; Cette quantité peut être calculée comme suit :

$$A = m_{sr} \cdot I_R [\cos(\omega t) \cdot \cos(\omega_r t - \beta_r) + \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\omega_r t - \beta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\omega_r t - \beta_r - \frac{4\pi}{3}\right)]$$

$$A = \frac{3}{2} m_{sr} \cdot I_R \cdot \cos((\omega + \omega_r)t - \beta_r) = \frac{3}{2} m_{sr} \cdot I_R \cdot \cos(\omega_s t - \beta_r) \quad (4.19)$$

On constate que A est à la même pulsation que le premier terme de φ_{sa} .

On pose :

$$M_{SR} = \frac{3}{2} m_{sr} : \text{Inductance mutuelle cyclique.}$$

Finalement, l'expression du flux devient :

$$\varphi_{sa} = L_S \cdot I_S \cdot \cos(\omega_s t - \beta_s) + M_{SR} \cdot I_R \cdot \cos(\omega_s t - \beta_r) \quad (4.20)$$

C'est l'expression du flux totalisé qui correspond à une seule phase, les flux dans les autres phases se déduisent de celle-ci.

On peut maintenant réécrire les équations de la machine en utilisant la notation complexe habituelle aux grandeurs sinusoïdales à la pulsation ω_s , pour que les équations soient plus générales, on a en omettant l'indice de phase :

$$\underline{\Phi}_S = L_S \underline{I}_S + M_{SR} \underline{I}_R \quad (4.21)$$

De même, la loi des mailles devient :

$$\underline{V}_S = R_S \underline{I}_S + j\omega_s \underline{\Phi}_S \quad (4.22)$$

Au rotor, on pourra écrire pour les flux :

$$\underline{\Phi}_R = L_R \underline{I}_R + M_{SR} \underline{I}_S \quad (4.23)$$

Ainsi que la loi des mailles :

$$0 = R_R \underline{I}_R + j\omega_s g \underline{\Phi}_R \quad (4.24)$$

En reprenant les équations précédentes, on peut écrire finalement :

$$\underline{V}_S = R_S \underline{I}_S + j\omega_s L_S \underline{I}_S + j\omega_s M_{SR} \underline{I}_R \quad (4.25)$$

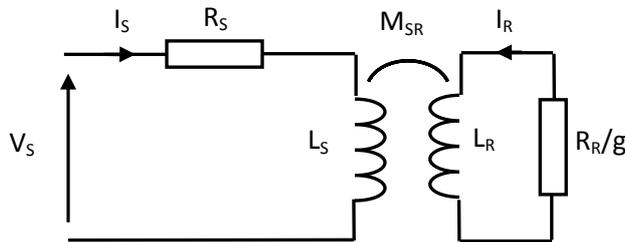
$$0 = R_R/g \underline{I}_R + j\omega_s L_R \underline{I}_R + j\omega_s M_{SR} \underline{I}_S \quad (4.26)$$

4.3.2 Schéma équivalent en régime permanent sinusoïdal

Sous le vocable schéma équivalent, on désigne un circuit électrique composé de dipôles linéaires permettant de modéliser la machine réelle. Le schéma équivalent le plus pertinent est fonction du domaine d'utilisation et du degré de précision souhaitée. Dans le cas des machines asynchrones, il comprend au minimum, une association de résistances et d'inductances.

4.3.2.1 Modèle à inductances couplées

D'après les deux dernières équations, on peut déduire le schéma suivant :



4.3.2.2 Modèle à inductance réparties

Figure (4.2) : schéma équivalent avec inductances couplées.

Les équations (4.25) et (4.26) peuvent être réécrites comme suit :

$$\underline{V}_S = R_S \underline{I}_S + j\omega_s (L_S - M_{SR}) \underline{I}_S + j\omega_s M_{SR} (\underline{I}_R + \underline{I}_S) \quad (4.27)$$

$$0 = R_R/g \underline{I}_R + j\omega_s (L_R - M_{SR}) \underline{I}_R + j\omega_s M_{SR} (\underline{I}_S + \underline{I}_R) \quad (4.28)$$

Ce qui donne le schéma de la figure (1.4) ;

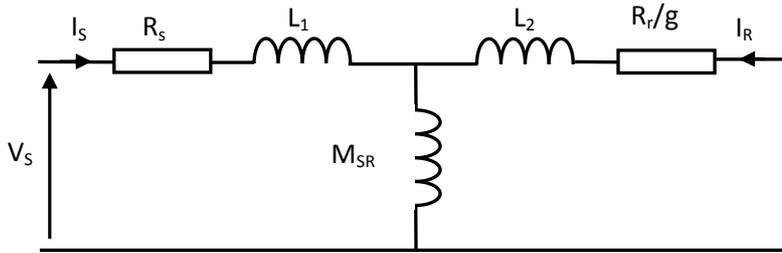


Figure (4.3) : schéma équivalent aux inductances réparties.

Où :

$$L_1 = L_S - M_{SR} :$$

Inductance cyclique de fuite statorique ;

$$L_2 = L_R - M_{SR} : \text{Inductance cyclique de fuite rotorique}$$

4.3.2.3 Modèle à fuites totalisées au rotor

On peut ramener ce schéma au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor (\acute{L}_r), ce qui nous permet d'établir le schéma de la Figure (4.4). Pour ce faire, on pose :

$$\left\{ \begin{array}{l} \acute{R}_r = \left(\frac{L_S}{M_{SR}} \right)^2 R_r \\ \acute{I}_R = \left(\frac{M_{SR}}{L_S} \right)^2 I_R \\ \acute{L}_r = \left(\frac{L_S}{M_{SR}} \right)^2 \left(1 - \frac{M_{SR}^2}{L_S L_r} \right)^2 = \sigma \left(\frac{L_S}{M_{SR}} \right)^2 L_r \\ \sigma = 1 - \frac{M_{SR}^2}{L_S L_r} \end{array} \right. \quad (4.29)$$

On obtient alors le schéma suivant :

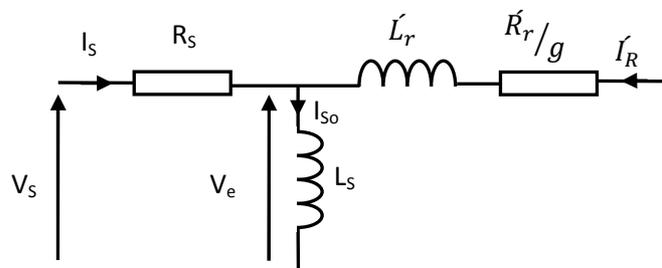


Figure 4.4 : schéma équivalent ramené au stator avec des fuites totalisées au rotor.

Ce modèle est caractérisé par :

Le terme M_{SR}/L_S représente le rapport de transformation de la machine dans le sens (stator - rotor) ($m_{s \leftrightarrow r}$). De même L_R/M_{SR} représente le rapport de transformation de la machine dans le sens (rotor - stator) ($m_{r \leftrightarrow s}$).

σ : Coefficient de dispersion de **Blondel**, il permet d'estimer les fuites de flux de la machine, généralement, on a $\sigma \leq 10\%$.

Si la machine n'a pas de fuites de flux, ces deux rapports de transformation doivent être inverses (il suffit de se souvenir que dans un transformateur classique, cela représente le rapport des nombres de spires des bobinages primaire et secondaire).

Dans ce cas on a :

$$\frac{M_{SR}}{L_S} = \frac{L_R}{M_{SR}}, \text{ ce qui conduit à } \sigma = 0.$$

On peut donc dire que le modèle est équivalent à celui de la figure 4.5 (Schéma de Steinmetz):

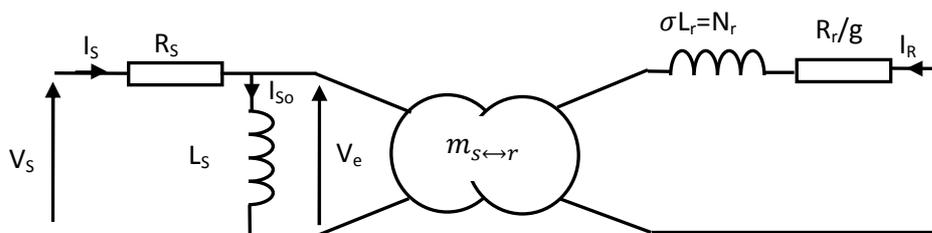


Figure 4.5 : Schéma équivalent faisant apparaître le rapport de transformation.

4.3.2.4 Modèle à fuites totalisées au stator :

En procédant comme précédemment, il est possible de donner un schéma où l'on ramène les fuites au niveau du stator. Le schéma équivalent est alors le suivant :

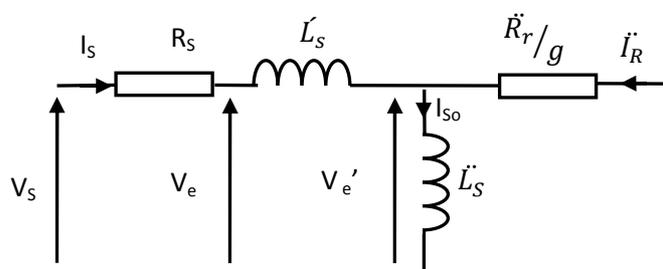


Figure 4.6 : schéma équivalent ramené au stator avec des fuites totalisées au stator.

On définit pour ce schéma :

$$\begin{cases} \ddot{R}_r = \left(\frac{M_{SR}}{L_r}\right)^2 R_r \\ \dot{L}_S = \frac{M_{SR}^2}{L_r} L_S = (1 - \sigma) \end{cases} \quad (4.30)$$

Remarque

Les pertes fer n'ont pas été prises en compte dans les schémas précédents, car en général elles sont négligeables pour un fonctionnement nominal.

4.4 Problème posé par le moteur asynchrone

Il est clair que pour les entraînements DCs et synchrone auto commutés, l'excitation est en effet produite de manière indépendante, soit par un enroulement alimenté séparément soit par un aimant permanent. Il suffit alors de varier le courant d'induit ($i_d(t)$) pour la machine DC et le courant $i_s(t)$ ou le courant $i_q(t)$ pour la machine synchrone autopilotée pour commander le couple. Mais concernant la machine asynchrone qui est d'une construction très simple et très robuste, sans balais ni aimant permanent, mettant en jeu des matériaux "standards" (fer, aluminium, cuivre, ...etc.), ses applications couvrent tous les domaines notamment en industrie, et le sud algérien réputé pour des conditions climatiques extrêmement sévères (températures entre -5°C et 50°C vent de sable dévastateur) le moteur asynchrone s'impose par excellence mais cette simplicité de construction, rend la machine asynchrone plus compliquée à commander si le but est de l'utiliser comme entraînement à vitesse variable, Car le moteur asynchrone doit absorber un courant statorique $i_s(t)$ comprenant à la fois :

- Le courant actif $i_r(t)$ qui parcourt l'enroulement rotorique, lequel fait office d'induit ;
- Le courant magnétisant $i_{so}(t)$, qui crée le champ d'excitation.

Ce qui complique plus le problème l'inaccessibilité du rotor ce qui nous amènera à modifier les équations pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator ; ajouter à cela la non-linéarité et la difficulté d'identification due à la variation des paramètres (jusqu'à 50% pour la résistance rotorique).

4.5 Expression du couple électromagnétique en régime permanent :

C'est à partir du schéma équivalent de la figure que nous allons donner l'expression du couple électromagnétique produit par la machine. Exprimons la puissance transmise au rotor.

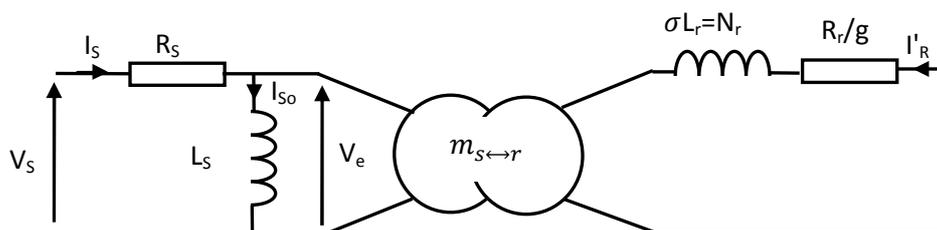


Figure 4.5 : Schéma équivalent faisant apparaître le rapport de transformation. (Schéma de Steinmetz)

$$P_e = 3 \frac{R_r}{g} \hat{I}_R^2 = C_e \cdot \Omega_s \quad (4.31)$$

Ce qui donne comme expression du couple électromagnétique:

$$C_e = \frac{3}{\Omega_s} \frac{R_r}{g} \hat{I}_R^2 \quad (4.32)$$

P_e : puissance électromagnétique ;

$$\text{On obtient ainsi : } C_e = \frac{3 p \left(\frac{M_{SR} V_e}{L_S} \right)^2}{\Omega_s} \cdot \frac{R_r/g}{(R_r/g)^2 + (N r \omega_s)^2} \quad (4.33)$$

Où encore en utilisant la variable ω_r (pulsation des courants au niveau rotorique). Le glissement a été défini dans le premier chapitre pour un fonctionnement moteur par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (4.34)$$

Il est positif pour un fonctionnement moteur, négatif pour un fonctionnement générateur, c'est-à-dire :

$$g = \pm \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (4.35)$$

Pour un fonctionnement moteur, l'expression du couple en fonction de ω_r serait donc :

$$C_e = \frac{3 p \left(\frac{M_{SR} V_e}{L_S} \right)^2}{\omega_s^2} \frac{R_r/\omega_r}{(R_r/\omega_r)^2 + (N_r)^2} \quad (4.36)$$

4.6 Caractéristiques du moteur asynchrone

4.6.1 Caractéristique mécanique

Si la machine est alimentée par le réseau, Les expressions précédentes permettent de tracer les caractéristiques mécaniques suivantes :

4.6.1.1 Caractéristique $C_e = f(\omega)$

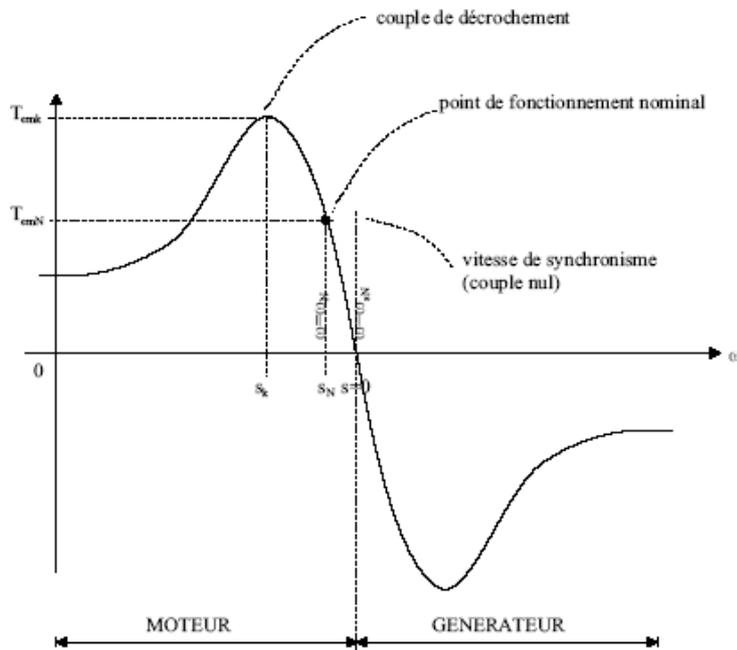


Figure 4.7 a: Caractéristique mécanique $cem = f(\omega)$.

4.6.1.2 Caractéristique $C_e = f(g)$:

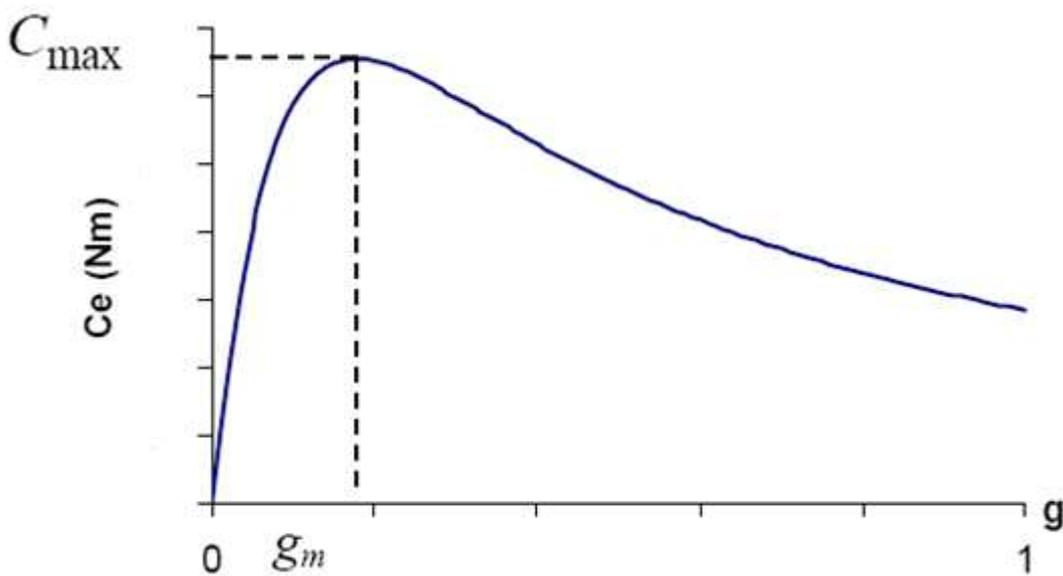


Figure 4.7 b: Caractéristique mécanique $Cem = f(g)$

D'après la caractéristique ci-dessus on constate que :

- Le glissement g intervient directement dans l'expression du couple. Le tracé de la caractéristique pour le régime sinusoïdal permanent (figure (4.7 b)), pour une tension d'alimentation $V_s(\square)$ sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constantes (comme c'est typiquement le cas lorsque le moteur est alimenté par le réseau), montre que pour de faibles valeurs de g , la courbe s'approche d'une droite.
- Le couple est comme prévu nul lorsque le glissement est égal à zéro, (il y a synchronisme). C'est uniquement dans cette zone, aux faibles glissements que la machine est exploitée. Si le glissement continue à augmenter, ce qui se produit par exemple si l'on charge graduellement la machine, il y a décrochage pour une certaine valeur de g : le couple passe par un maximum Ce_{MAX} , cette valeur dépend de la valeur de la tension d'alimentation et peut être ajustée en conséquence, pour autant que le dispositif d'alimentation le permette.
- De plus, elle est proportionnelle à l'inverse du carré de la fréquence d'alimentation, détail important lorsqu'il s'agira d'exploiter la machine à haute vitesse.

Pour les valeurs du glissement et de la pulsation rotorique respectivement égales à :

$g = g_{MAX} = \frac{R_r}{\omega_s}$, $\omega_r = \frac{R_r}{Nr}$, ainsi le couple est maximal, il est donné par :

$$Ce_{MAX} = \frac{3p \left(\frac{M_{SR}}{L_S} V_e \right)^2}{2Nr\omega_s^2} \quad (4.37)$$

4.7 Procédées de variation de vitesse

Hormis ses innombrables applications non-réglées telles que les entraînements de pompes, ventilateurs et machines de tous types d'entraînements le moteur asynchrone a envahi les domaines d'entraînement à vitesse variable notamment après l'essor qu'ont connus les convertisseurs statiques, l'électrotechnicien dispose de nombreux moyens pour réguler la vitesse du moteur asynchrone. Les progrès technologiques permettent aujourd'hui l'utilisation de nouveaux moyens pour obtenir une vitesse variable. Ces moyens exigent de leur part des convertisseurs de puissance (le plus souvent un onduleur).

4.7.1 Commandes des machines asynchrones

Les commandes scalaires sont basées en principe sur le modèle établi en régime permanent, issu des schémas équivalents donnés au chapitre précédent. Plusieurs commandes scalaires existent selon qu'on agit sur le courant ou la tension ; elles dépendent de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant).

Il existe un grand nombre de stratégies de pilotage de la machine asynchrone, toutes poursuivant l'idée de faire produire à la machine le couple le plus élevé possible, cela quelle que soit la vitesse, notamment

aux faibles vitesses (démarrage) et à grandes vitesses (supérieures à la vitesse nominale). On se limite ci-après à la présentation de quelques-uns de ces principes de commande.

4.7.1.1 Commande scalaire en couple

Un bon fonctionnement du moteur asynchrone nous conduit à contrôler le couple pour imposer la vitesse de rotation ou la position de l'arbre. On dispose pour cela de l'expression du couple électromagnétique.

$$ce = \frac{(m_{s \leftrightarrow r} V e)^2}{\Omega_s} \frac{R_r / g}{(R_r / g)^2 + (N r)^2} \quad (4.38)$$

Avec une relation faisant intervenir les paramètres de la machine et le flux statorique on aboutit:

$$ce = 3p \left(\frac{M_{SR}}{L_s} \right)^2 \Phi_s^2 \frac{R_r / \omega_r}{(R_r / \omega_r)^2 + (\sigma L r)^2} \quad (4.39)$$

Pour un fonctionnement au voisinage du synchronisme (ce qui est souvent recherché), on peut considérer que :

$R_r / \omega_r \gg (\sigma L r)^2$, on obtient ainsi :

$$ce = 3p \left(\frac{M_{SR}}{L_s} \right)^2 \Phi_s^2 \frac{R_r}{\omega_r} \quad (4.40)$$

On peut également exprimer la relation (4.40) en fonction du flux rotorique, en sachant que ($\Phi_r = \frac{M_{SR}}{L_s} \Phi_s$).

$$ce = 3p \Phi_r^2 \frac{\omega_r}{R_r} \quad (4.41)$$

Ces deux expressions permettent de calculer le couple électromagnétique, identique à celui de la partie utile de la machine.

Le but de cette étude est de pouvoir régler le couple du moteur, pour cela les expressions qui viennent d'être établies sont à exploiter pour l'élaboration d'une loi de commande.

4.7.2 Grandeurs de réglage du couple en régime permanent

Des deux expressions précédentes, il en résulte que les grandeurs de réglages du couple sont :

- La pulsation rotorique ω_r ;
- Le flux totalisé Φ_s ou Φ_r .

Mais il reste à résoudre les problèmes suivants :

- ◆ Comment imposer une pulsation rotorique, sachant que le rotor d'une MAS est inaccessible ?

- ◆ Comment imposer le flux totalisé Φ_s ou Φ_r , et à quelle valeur ?

Pour y remédier, on utilisera la relation naturelle d'autopilotage des machines à induction à savoir :

$$\omega_r = \omega_s - p \cdot \Omega \quad (4.42)$$

Avec :

- ◆ ω_s : grandeur imposable ;
- ◆ Ω : grandeur mesurable.

Quant aux flux, ils seront contrôlés à partir des grandeurs statoriques, courants ou tensions, les stratégies de commande couramment utilisées sont :

- ◆ De la vitesse nulle à la vitesse nominale, il faut maintenir le flux constant à sa valeur maximale pour minimiser les pertes (pour cette plage de fonctionnement, on disposera du couple nominale de la machine).
- ◆ Pour des vitesses supérieures à la vitesse nominale, on garde la tension nominale pour ne pas user les isolations de la machine et on augmente la fréquence statorique pour augmenter la vitesse ce qui a pour conséquence la diminution du flux dans la machine (pour cette plage de fonctionnement, on disposera de la puissance apparente nominale de la machine.).

On en déduit le synoptique d'une commande en couple donnée par la figure (4.8) :

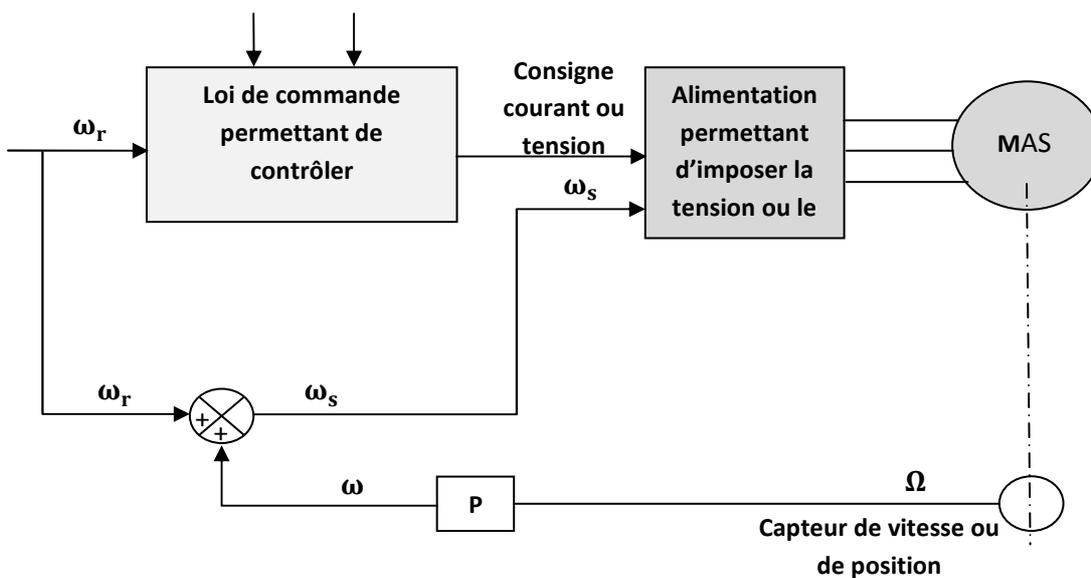


Figure 4.8 : Schéma global du principe de contrôle en couple du moteur asynchrone.

4.7.3 Commande à flux d'entrefer constant :

4.7.3.1 Lois de commandes permettant le contrôle du flux :

Quelle que soit la méthode de pilotage mise en œuvre, l'exploitation de la machine asynchrone dans une large gamme de vitesses nécessite une alimentation dont la tension (ou le courant) et la fréquence soient aisément variables. Pour les entraînements à courant alternatif d'une certaine précision, que la machine soit asynchrone ou synchrone auto-commutée, c'est le convertisseur statique, appelé également convertisseur de fréquence, qui est utilisé.

Les équations qui suivent montreront qu'une des bonnes stratégies consiste à maintenir le flux principal, ou flux d'entrefer constant.

4.7.3.1.1 Contrôle du flux à partir des courants statoriques

On cherche à établir les relations entre les flux et le module du courant statorique. A partir du schéma équivalent ramené au stator avec inductance de fuites ramenée au rotor, on aboutit à la relation suivante :

$$\underline{I_S} = \frac{\Phi_s}{L_s} \sqrt{\frac{1 + j\tau_r\omega_r}{1 + j\sigma\tau_r\omega_r}} \quad (4.43)$$

Soit en module :

$$I_S = \frac{\Phi_s}{L_s} \sqrt{\frac{1 + (\tau_r\omega_r)^2}{1 + (\sigma\tau_r\omega_r)^2}} \quad (4.44)$$

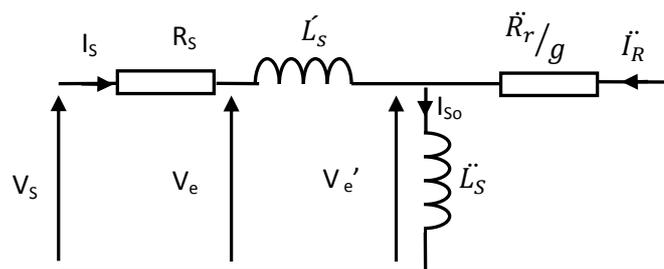


Figure 4.9 : schéma équivalent ramené au stator avec des fuites totalisées au stator.

L'utilisation du schéma équivalent ramené au stator avec inductance de fuite localisée au rotor, offre une expression du courant statorique en fonction du flux rotorique :

$$\underline{I_S} = \frac{\Phi_r}{M_{sr}} (1 + j\tau_r\omega_r) \quad (4.45)$$

Soit en module :

$$I_s = \frac{\Phi_r}{M_{sr}} \sqrt{1 + (\tau_r \omega_r)^2} \quad (4.46)$$

Pour des caractéristiques plus similaires dans la zone utile, il apparaît plus simple de contrôler le flux rotorique. La figure (4.10) illustre cette loi de réglage, pour une machine donnée, il faut préciser la valeur efficace du courant devant circuler dans les enroulements statoriques pour maintenir le flux rotorique à sa valeur nominale.

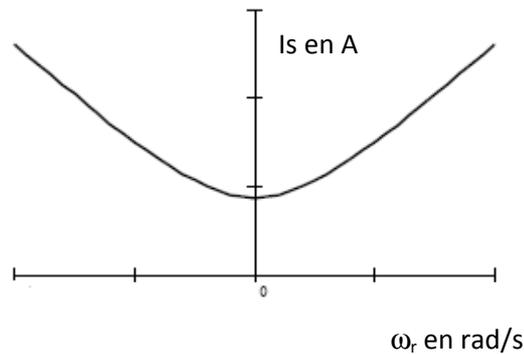


Figure 4.10 : Courant statorique en fonction de la pulsation rotorique à flux rotorique constant.

Pour contrôler le courant statorique, il est possible d'utiliser :

- Un commutateur de courant à diodes d'isolement ;
- Un onduleur de tension piloté en courant qui fait partie de l'ensemble de la figure (4.10).
- Un gradateur triphasé.

Pour la partie commande, elle doit suivre un courant de consigne dont :

- L'amplitude permet de maintenir le module du flux constant ;
- La pulsation est ω_s .

4.7.3.1.2 Contrôle du flux à partir des tensions statoriques

- **Mise en évidence de la tension d'entrefer**

Pour ce faire :

- ◆ On reprend le schéma équivalent de la figure (4.6) :

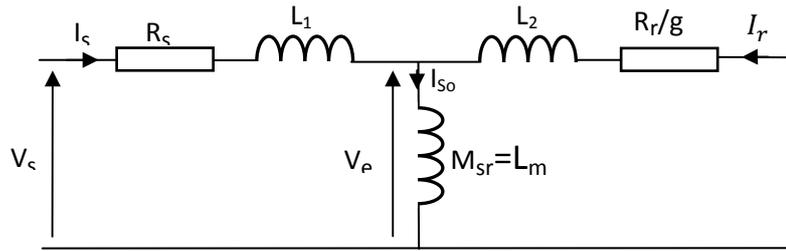


Figure 4.11 : Schéma équivalent aux inductances de fuites réparties.

D'après le schéma équivalent du moteur de la figure ci-dessus, La tension d'entrefer V_e s'exprime en écriture complexe :

$$\underline{V_e} = \underline{V_s} - (R_s + j\omega_s L_1) \underline{I_s} \quad (4.47)$$

V_e : tension induite par phase ou tension d'entrefer;

I_{s0} : courant magnétisant.

Ainsi que l'expression du couple :

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{1}{\omega_s} \frac{R_r}{g} I_r^2 \quad (4.48)$$

Le courant rotorique peut être obtenu du même schéma en négligeant la tension induite $(j\omega_s L_1 \underline{I_r})$ par le flux de fuite rotorique figure (4.12).

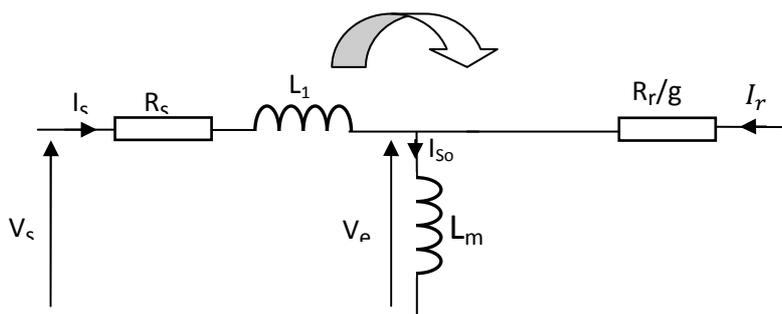


Figure 4.12 : Schéma équivalent avec inductance de fuite rotorique négligée.

L_m : Est appelée inductance magnétisante, cette appellation peut être justifiée par ce qui suit.

Le courant rotorique sera donc :

$$\underline{I_r} \approx \frac{-\underline{V_e}}{R_r/g} = -\frac{j\omega_s L_m \underline{I_{s0}}}{R_r/g} \quad (4.49)$$

Soit en module :

$$I_r \approx \frac{\omega_s L_m I_{so}}{R_r/g} \quad (4.50)$$

Le couple a donc pour valeur approximative:

$$cem \approx \frac{3}{2} p L_m I_{so} I_r \approx Kc I_r \quad (4.51)$$

Si l'on parvient à contrôler le courant magnétisant I_{so} , en le maintenant à une valeur constante, on voit que l'expression du couple se simplifie puisqu'elle devient proportionnelle avec la composante active du courant rotorique I_r , la constante de proportionnalité étant Kc .

Notant encore, que maintenir le courant magnétisant I_{so} constant revient à imposer un flux d'entrefer Φ_e constant puisque :

$$\underline{\Phi}_e = L_m \underline{I}_{so} \quad (4.52)$$

Et :

$$Kc = \frac{3}{2} p L_m I_{so} = \frac{3}{2} p \Phi_e \quad (4.53)$$

Cette expression nous fait penser au couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée.

Le flux Φ_e joue donc le rôle du flux d'inducteur, il a pour tâche de magnétiser la machine. Pour maintenir le flux constant dans l'entrefer, respectivement le courant magnétisant I_{so} à une valeur constante, il faut que la tension "d'entrefer" V_e évolue proportionnellement à la fréquence d'alimentation f_s , en effet :

$$\underline{V}_e = j\omega_s L_m \underline{I}_{so} = j\omega_s \underline{\Phi}_e \quad (4.54)$$

Soit en module :

$$V_e = \omega_s \Phi_e \quad (4.55)$$

Maintenir Φ_e constant est possible si :

$$\frac{V_e}{\omega_s} = \Phi_e = \text{constante} \quad (4.56)$$

Cette expression montre bien que la tension qui intervient directement dans le calcul du couple est une grandeur inaccessible, les bornes du moteur permettent uniquement d'imposer la tension statorique V_s et la fréquence f_s .

- Hypothèse de la loi de commande V_s/f_s constant

En première approximation, on peut négliger la chute de tension statorique, en régime nominale et à grandes vitesses cette chute de tension due principalement à la résistance statorique est très faible, quelques

volts, devant la tension d'alimentation V_s , sans oublier d'attirer l'attention sur les limites de validité de cette approximation qui s'arrêtent en basses valeurs de tension d'alimentation qui seront discutées dans ce qui suit.

$$\underline{V}_s - \underline{V}_e = (R_s + j\omega_s L_1) \underline{I}_s \quad (4.57)$$

Et admettre que :

$$\underline{V}_s \approx \underline{V}_e \quad (4.58)$$

On peut ainsi donner le schéma de la figure (4.13).

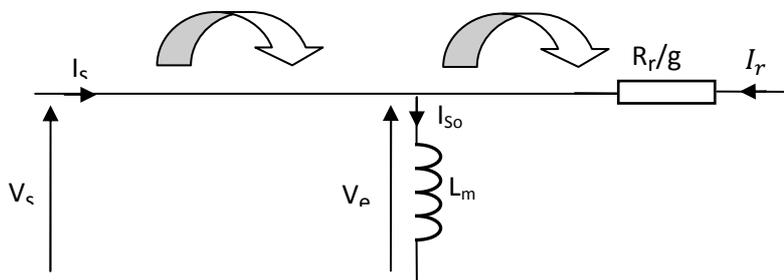


Figure 4.13 : Schéma équivalent avec chute de tension statorique négligée.

En se référant au même schéma ci-dessus la tension d'entrefer est égale :

$$\underline{V}_s \approx \underline{V}_e = (j\omega_s M_{sr}) \underline{I}_{s0} \quad (4.59)$$

La relation (4.60) peut être exprimée uniquement avec les grandeurs statoriques :

$$\frac{V_s}{\omega_s} = \Phi_e = \text{constante} \quad (4.60)$$

Ou bien :

$$\frac{V_s}{2\pi f_s} = \Phi_e = \text{constante} \quad (4.61)$$

Enfin l'expression se simplifie à la loi de commande :

$$\frac{V_s}{f_s} = \Phi_e = \text{constante} \quad (4.62)$$

Le schéma de la figure (4.14), obtenu dans le cadre d'une approximation et simplification, nous a permis d'aboutir à une loi de commande aussi simple que possible mais surtout facile à mettre en œuvre. La limite de validité de cette approximation peut être constatée aux basses vitesses où la chute de tension

statorique (ohmique) devient problématique, car la tension d'alimentation V_s est de valeur modeste puisque celle-ci évolue proportionnellement avec la fréquence f_s .

En faisant varier la tension V_s et la fréquence f_s dans le même rapport (à une valeur constante égale en principe au rapport des valeurs nominales), permet d'imposer le courant magnétisant, par conséquent, le flux d'entrefer à sa valeur nominal. La figure (4.15), donne l'évolution de la tension efficace statorique en fonction de la fréquence (pulsation) statorique.

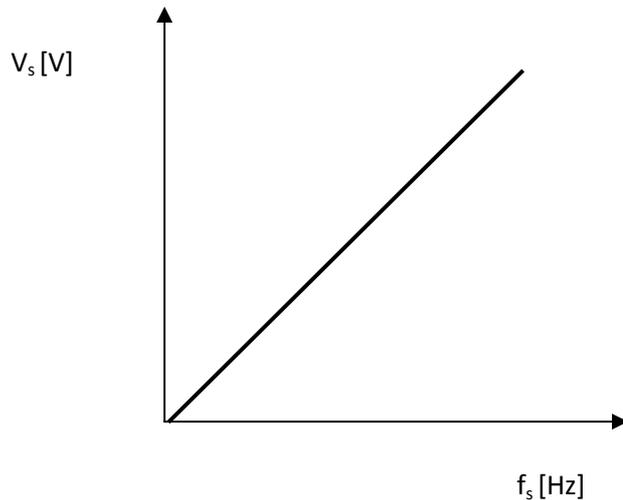


Figure 4.15 : Tension statorique en fonction de la fréquence statorique à flux d'entrefer constant.

Ce qu'il ne faut pas perdre de vue jusque là c'est de mettre l'accent sur les points suivant :

- la stratégie de commande visant à obtenir n'importe quel couple à n'importe quelle vitesse consiste donc à imposer le flux principal, (flux dans l'entrefer), dans la mesure du possible, au moyen de la valeur V_s et selon la relation : $\frac{V_s}{f_s} = \Phi_e = \text{constante}$.
- La mise en œuvre de la loi de commande donnée par l'équation (4.62) au moyen d'un convertisseur statique, serait élaborée, dans ce qui suivrait où une solution est adaptée pour palier à l'inconvénient de la chute de tension statorique. il s'agira d'une commande en boucle ouverte.

La commande d'un moteur asynchrone peut se faire aussi à partir d'un convertisseur statique alimenté par une source de tension continue constante ou redressée. Les onduleurs de tension permettent d'imposer aux enroulements statoriques de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglables en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique (GTO, transistors bipolaire, MOSFET, IGBT, etc.).

Dans les années 90, le transistor IGBT a complètement relancé la construction des onduleurs utilisés dans les alimentations des moteurs à courant alternatif asynchrones et synchrones. Facile à commander, sa grille étant assimilable à un circuit de charge d'un condensateur, il présente les principaux avantages d'un transistor bipolaire et d'un transistor MOSFET.

4.4 Système d'alimentation

L'alimentation du moteur asynchrone est constituée en général de deux étages connectés l'un à l'autre par un circuit intermédiaire constitué d'une inductance et /ou d'un condensateur. Alimenté par un réseau triphasé, le premier étage est un redresseur et le deuxième étage est un onduleur de tension. La source d'alimentation triphasée est supposée symétrique, d'une tension à amplitude et fréquence imposées et constantes. Le redresseur et le filtre de tension doivent être dimensionnés convenablement afin de les associer à l'onduleur de tension alimentant le moteur. La figure (4.16) illustre le schéma synoptique d'un moteur asynchrone à vitesse variable et de son alimentation. A partir d'un réseau d'alimentation standard (220/380V, 50HZ) après redressement et filtrage, la tension U_c (étage continu) est appliquée à l'onduleur.

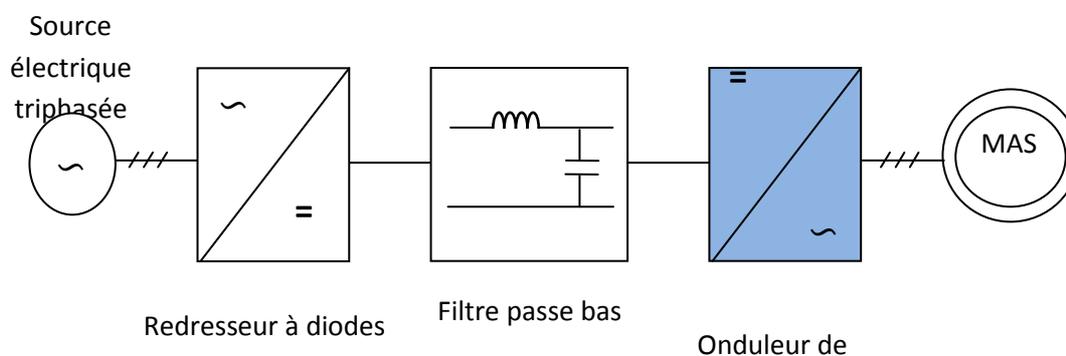


Figure 4.16: Schéma global d'un MAS à vitesse variable et de son alimentation.

A présent on essaiera de traiter de manière récapitulative ce qui a été évoqué précédemment, notre intérêt se portera sur l'onduleur de tension et ses stratégies de commande associées, à savoir la modulation vectorielle qui présente des avantages intéressants par rapport à la modulation classique (sinus triangle). Le même onduleur assure au moteur asynchrone un fonctionnement dont le rapport (V/f) constant).

4.5 Alimentation par un onduleur de tension

Pour réaliser un onduleur triphasé classique alimenté par une source de tension continue (munie d'un filtrage capacitif), dont le récepteur est une charge alternative qui se comporte comme une source de courant (le stator d'une machine à courant alternatif), on a besoin de six interrupteurs bidirectionnels en courant. Il faut aussi disposer donc de diodes rapides et performantes, montées en antiparallèle avec les transistors IGBT.

Cette configuration permet d'imposer aux moteurs des courants présentant une faible distorsion harmonique et conduit ainsi à l'élaboration des systèmes d'entraînements à base de moteurs à courant alternatif à hautes performances. Les techniques dites (Modulation de Largeur d'Impulsions, *MLI*) ou (en anglais Pulse Width Modulation, *PWM*) sont utilisées. Ces stratégies de commande des onduleurs s'appuient sur les performances en fréquence de découpage permises par les composants électroniques utilisés.

4.6 Mise en œuvre de la variation de vitesse

Jusqu'ici l'onduleur de tension a été traité en tant que convertisseur de l'électronique de puissance, la stratégie de la modulation vectorielle nous a permis d'améliorer considérablement ces performances, mais la tâche technique qui est réservée à ce même convertisseur est celle d'un variateur de vitesse. L'étude effectuée précédemment d'une stratégie de commande possible nous a permis d'aboutir au résultat de la relation (4.62).

4.6.1 Commande en boucle ouverte

Pour des exigences moyennes en précision et dynamique, il est possible de commander le moteur asynchrone dans une large plage de vitesse en boucle ouverte, donc sans capteur de vitesse figure 4.17.

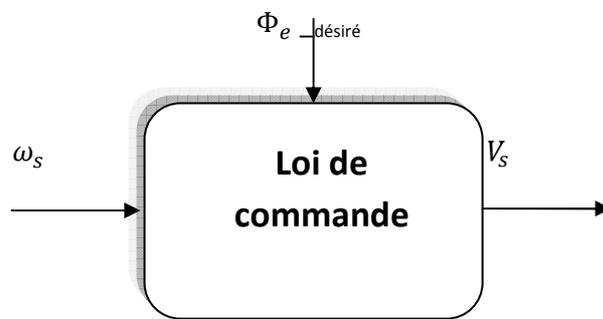


Figure 4.17: *Synoptique de commande en boucle ouverte.*

Tant que la tension délivrée par le variateur peut évoluer, dans la mesure où le flux dans la machine est constant rapport (V/f constant), le couple moteur sera grossièrement proportionnel au courant et le couple nominal de la machine pourra être obtenu sur toute la plage de vitesse souhaitée.

Toute fois, à des fréquences et des tensions faibles, le terme lié à la chute de tension statorique ne peut plus être négligé, en particulier la chute de tension au niveau de la résistance statorique.

Pour maintenir le flux constant quelque soit la charge du moteur et donc quel que soit le courant absorbé, le rapport (V/f constant) n'est pas suffisant. Des solutions ont été adaptées pour y remédier, parmi lesquelles on peut citer :

4.6.2 Boost manuel

Il consiste à adopter une loi (tension/fréquence) avec augmentation fixe de la tension à basse fréquence. Cet ajustage est parfois appelé "boost manuel" figure (4.18). La tension appliquée au moteur n'est pas fonction de sa charge. Cet ajustage permet d'obtenir un couple élevé à basse vitesse, mais présente l'inconvénient de maintenir un courant élevé dans le moteur à vide avec risque de saturation et de surcharge [12].

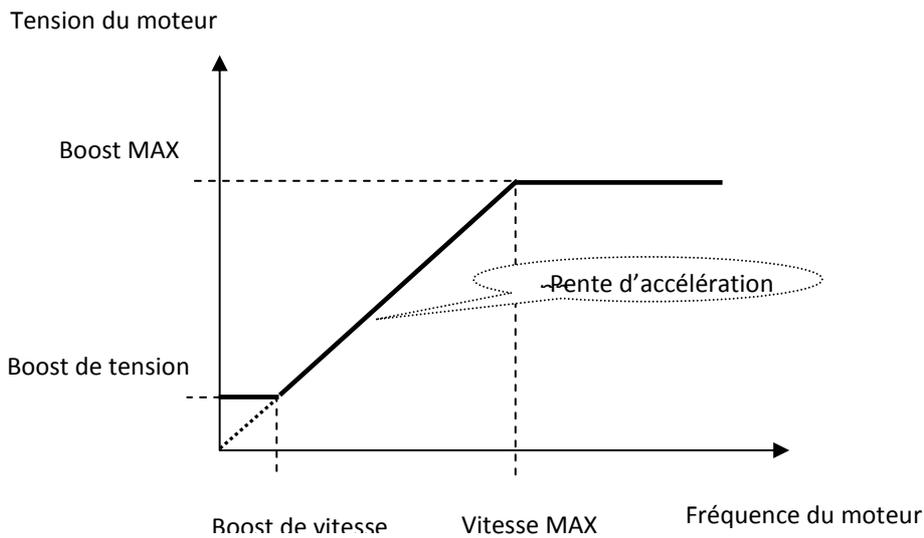


Figure 4.18 : Loi $V/f = \text{constant}$ avec boost [13].

4.6.3 Compensation fixe de la chute de tension $R_S I_S$

Elle consiste à délivrer au moteur une tension avec compensation fixe de la chute de tension, c'est à dire sans prendre en compte le courant statorique réellement consommé par le moteur. La figure montre la nouvelle caractéristique avec compensation de $R_S I_S$ [12]:

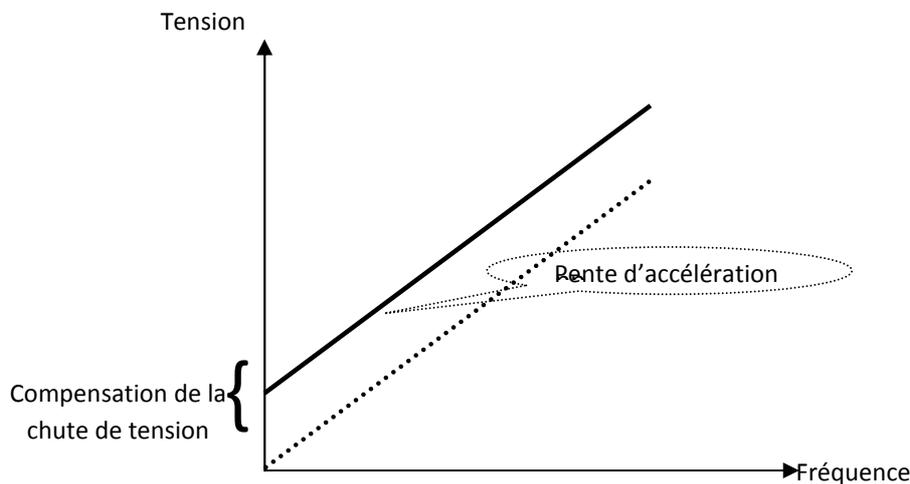


Figure 4.19: Loi $V/f = \text{constant}$ avec compensation de la chute de tension statorique.

4.6.4 Compensation automatique de la chute de tension : boost automatique

Il consiste à délivrer au moteur une tension avec compensation automatique de la chute de tension $R_S I_S$. A une vitesse donnée, la tension fournie au moteur varie en fonction de la charge. Cet ajustage est

appelé “boost automatique”. Un réglage permet de faire varier le coefficient, c’est-à-dire compenser au plus juste la chute de tension $R_S I_S$ du moteur utilisé figure (4.20).

Cet ajustage permet d’obtenir un couple élevé, à basse vitesse, tout en ayant un courant faible à vide. Par contre, il présente l’inconvénient d’un temps de réponse plus lent. Un excès de compensation peut également conduire à une suralimentation entretenue du moteur [12]:

- Augmentation de la charge;
- Augmentation de la tension;
- Augmentation du courant.

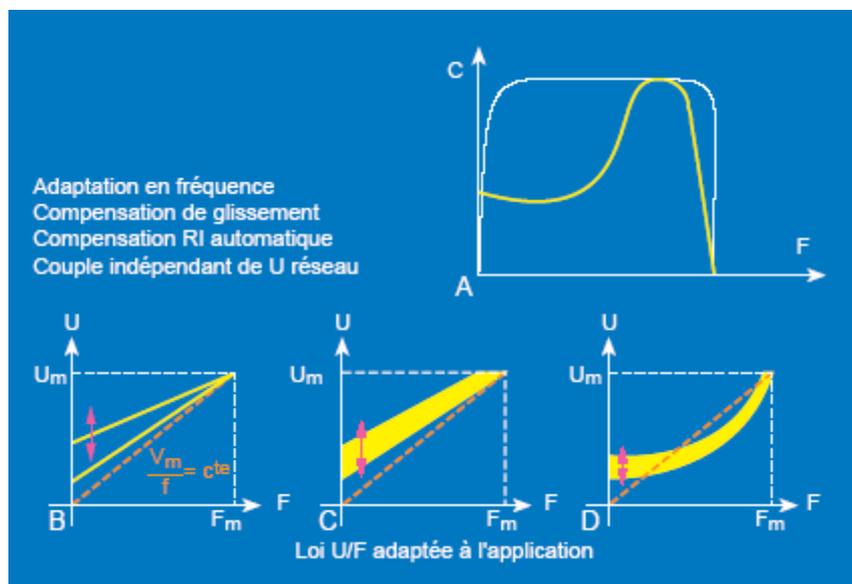


Figure 4.20 : Loi $V/f = \text{constant}$ avec compensation automatique de la chute de tension [12].
Statorique.

4.6.5 Variation de la vitesse en boucle ouverte du moteur asynchrone

Le rapport est généralement choisi le plus proche possible du rapport V_{sn}/f_{sn} où V_{sn} et f_{sn} sont respectivement la tension et la fréquence nominale au stator du moteur (fournis par le réseau), pour pallier à l’inconvénient de la chute de tension statorique aux basses vitesses, on réalise un boost en basse valeur de la fréquence f_s en imposant une tension V_s constante jusqu’à environ 25% de ω_{sn} . Ensuite, l’onduleur suit la loi où le rapport V_s/f_s est constant [14][15], (voir figure (4.21)).

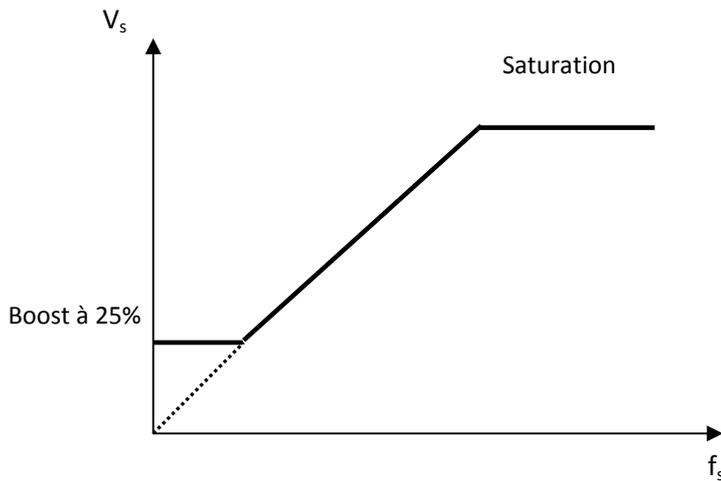


Figure 4.21 : Loi de commande d'un onduleur alimentant un moteur asynchrone.

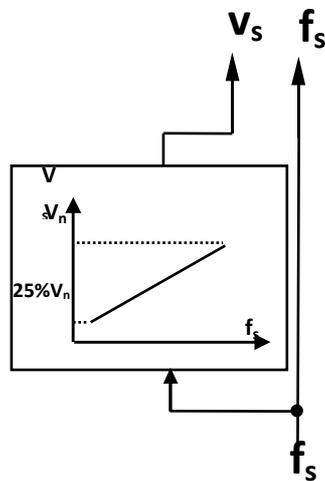


Figure 4.22: Boost à 25% de la tension V_n .

4.6.6 Synoptique de commande à V_s/f_s constant en boucle ouverte

On déduit le synoptique d'une commande en boucle ouverte représenté sur la figure 4.23. Il suffit pour cela d'alimenter la machine à fréquence variable, au moyen d'un convertisseur statique. Contrairement au cas du moteur synchrone où la fréquence de l'alimentation impose directement la vitesse de rotation [16].

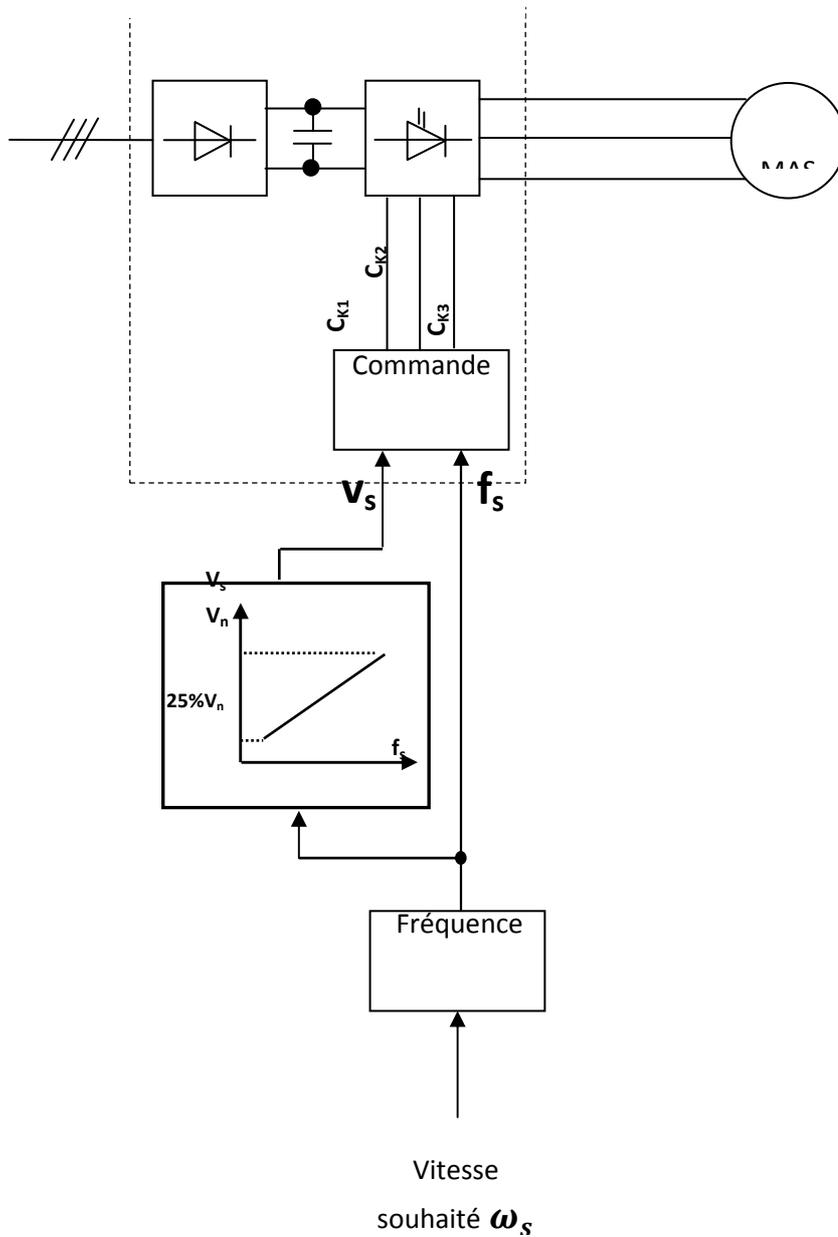


Figure 4.23 : Synoptique de commande en boucle ouverte du moteur asynchrone.

4.7 Conclusion

En imposant au moteur un rapport V_s/f_s constant, la fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$T(conv) = A_o = V_s/f_s \tag{4.63}$$

$$A_o = \frac{220}{50} = 4.4$$

Produit industriel adéquat : [17]

En faisant le tour des firmes qui proposent des variateurs de vitesse et en faisant une petite analyse on s'aperçoit que *Schneider Electric, Télémécanique* présente des produits adaptés à chaque besoin, et en fonction des conditions de service (climatiques notamment), par exemple l'ATV71 est conçu pour le levage et la manutention, tandis que pour notre besoin télémécanique propose Altivar 61, une des offres techniques les plus intéressantes. Le variateur Altivar 61 est un convertisseur de fréquence pour moteurs asynchrones triphasés de 0,75 kW à 660 kW. Il est dédié aux applications les plus courantes, il est surtout utilisé dans des applications tels que :

- La Ventilation ;
- La Climatisation ;
- Le pompage.

L'Altivar 61 permet de réduire les coûts d'exploitation en optimisant la consommation d'énergie. Des options complètes et nombreuses permettent son adaptation et son intégration dans les installations électriques. En effet, spécialement conçu pour les entrainements à vitesse variable des pompes et ventilateurs (C_r proportionnel au carré de la vitesse soit $C_r = kN^2$) et possédant une gamme de puissance étendue, se basant essentiellement sur une loi de commande à v/f constant ainsi que sur un Contrôle Vectoriel de Flux (CVF) sans capteur de position ni de vitesse et une commande dite économie d'énergie font de lui un des choix les plus privilégiés.

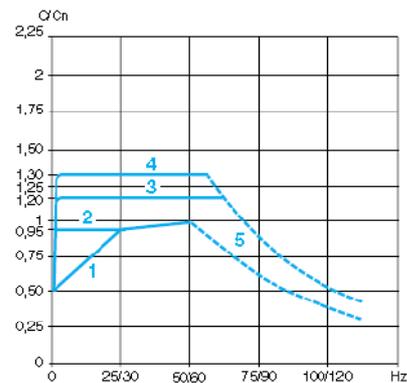
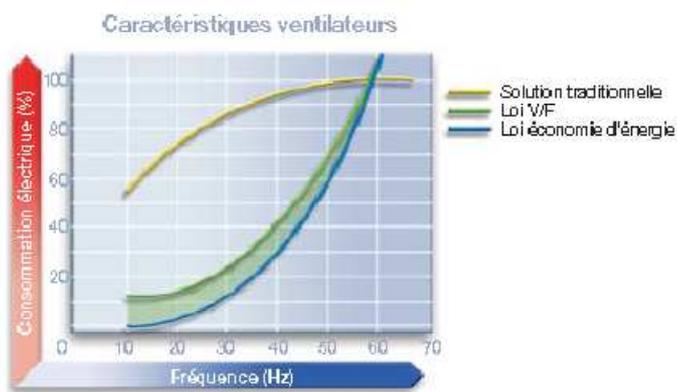


Figure (5.1) consommation électrique en fonction de la fréquence

Figure (5.2) couple développé en fonction de la fréquence d'alimentation

Alimentation

- 1 Moteur autoventilé : couple utile permanent
- 2 Moteur motoventilé : couple utile permanent
- 3 Surcouple pendant 60 secondes maximum pour ATV 61Wppppp (varianteurs UL Type 12/IP 54)
- 4 Surcouple pendant 60 secondes maximum pour ATV 61Hppppp (varianteurs UL Type 1/IP 20)
- 5 Couple en survitesse à puissance constante

En regardant de plus près la courbe (1) représentée sur la figure (5.2) on s'aperçoit qu'à 25 Hz le moteur développe pas moins de 95% de son couple nominal, c'est plutôt rassurant (rappelant que notre charge est un ventilateur), ainsi, à cette vitesse le couple résistant étant une fonction du carré de la vitesse, si la vitesse est divisée par deux le couple lui est réduit au quart et la puissance elle est divisée par huit, donc chutent considérablement, ce qui permet à nos moteurs d'évoluer de façon optimale.

Cette courbe confirme néanmoins qu'un fonctionnement en sur vitesse n'est pas à l'ordre du jour, car une chute du couple de la machine est quasi exponentielle, ajouter à cela le fait que le couple résistant augmente considérablement, car dans cette configuration, lorsque la vitesse double, le couple est multiplié par '4' et la puissance par '8', ainsi que les problèmes que peuvent poser les pales des ventilateurs qui probablement ne pourront pas résister à un tel régime de fonctionnement.

En outre, l'ATV61 se distingue aussi par le pouvoir d'association de moteurs en parallèle sous certaines contraintes, à titre d'exemple, le courant nominal du variateur doit être supérieur ou égal à la somme des courants des moteurs à alimenter. Dans notre cas, au lieu de procéder à l'achat de six ou douze appareils un seul peut s'avérer suffisant d'autant plus que la gamme de puissance le permet. En effet, nous avons douze moteurs pour chaque batterie d'aéroréfrigérants dont six ont une puissance de 40 HP (environ 30Kw) pour l'entraînement à pales variables ce qui donne une puissance totale de 240 HP (180KW environ) et six moteurs de 30 HP (22Kw environ). En se limitant à la commande des moteurs initialement à pales variables la puissance mise en jeu et de 240HP (180KW environ) est largement inférieure à la limite fixée par le constructeur qui est de l'ordre de 900HP (660KW), plus une option de commutation entre les moteurs mis en parallèle. Un point primordial concernant notre système qui fait que le variateur peut arrêter, si besoin il y a, un ou plusieurs moteurs mis en parallèle et surtout une façon de lutter contre les fonctionnements en sous vitesse. Mais aussi l'écart relatif de durée de fonctionnement entre chaque ventilateur peut être programmé, ce qui permet de mieux répartir les durées de fonctionnement et donc de réduire l'usure des ventilateurs. En effet si l'écart de fonctionnement cumulé entre un ventilateur en fonctionnement et un ventilateur à l'arrêt dépasse l'écart relatif programmé, le premier ventilateur est arrêté puis remplacé par le second, en plus de ça si un ventilateur est en défaut celui-ci n'est pas pris en compte et les conditions de mise en service et d'arrêt sont assurées par les autres ventilateurs fonctionnels. [17]

Il est possible pour chaque ventilateur :

- d'afficher la durée d'utilisation ;
- de remettre le compteur à zéro ;
- de mémoriser les durées de fonctionnement.

Lors d'une utilisation en parallèle de plusieurs moteurs, deux cas sont possibles :

Les moteurs sont de **puissances équivalentes**, (seuls les six à pales variables sont commandés) dans ce cas les performances de couple restent optimales après réglage du variateur, ou les moteurs sont de **puissances différentes** (les douze moteurs de la batterie sont commandés), seulement dans ce cas, les performances de couple ne seront pas optimales pour l'ensemble des moteurs.

Dans le cas d'utilisation des moteurs en parallèle, la protection de surcharge intégrée au variateur ne peut pas assurer la protection de chaque moteur, en effet, l'un des moteurs peut se trouver en surcharge, alors que le courant absorbé par l'ensemble des moteurs ne dépasse pas le courant nominal du variateur. Les moteurs doivent donc être protégés individuellement par un relais thermique chose déjà assurée dans le cas présent.



ATV 61WD30N4C

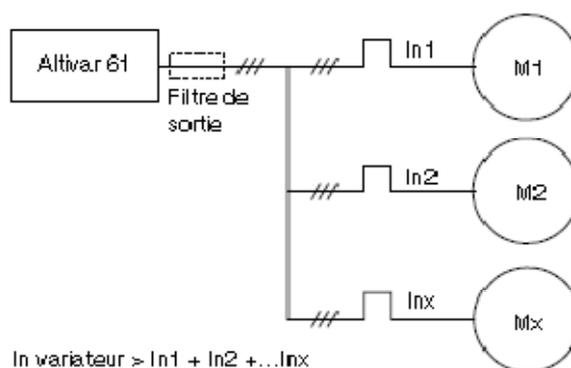
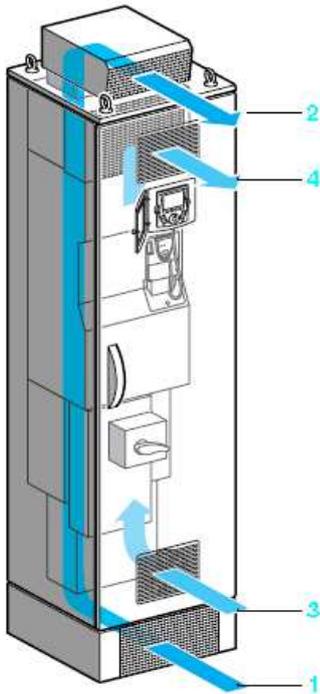


Figure (5.2) Association de moteurs en parallèle

Autre avantage intéressant pour ce genre d'appareils, leur aptitude à évoluer dans des conditions climatiques assez sévères car ils peuvent fonctionner à une température ambiante de 50°C à 60°C en les dotant d'un kit de ventilateur qui brasse l'air autour des cartes électroniques empêchant ainsi la formation des points chauds tout autour ce qui constitue un autre atout qui favorise leur adoption connaissant les conditions climatiques spécifiques du sud algérien.



2 Sortie d'air via une grille IP 54 en face avant, située sur le toit de

4 Sortie d'air par une grille IP 54 avec filtre en partie haute de la porte

3 Entrée d'air par ventilateur avec filtre IP 54 sur la partie basse de la porte de

1 Entrée d'air via une grille IP 54 en face avant, située sur le socle,

L'objectif escompté de ce mémoire est le remplacement de la commande pneumatique dans une batterie d'aéroréfrigérants, problématique et causant des pertes qui ne peuvent être ignorées, par un dispositif de variation de vitesse. Initialement proposé pour faire des économies d'énergie (diminution des pertes propres, élimination des systèmes de dissipation d'énergie et les pertes associées) les variateurs de vitesse permettent aussi de supprimer les surintensités de démarrage, de les faciliter notamment pour des charges à forte inertie et obtenir un couple de démarrage supérieur au couple minimal sans avoir à surdimensionner le moteur en vue des seuls démarrages, allonger la durée de vie des moteurs (par élimination des démarrages brutaux, diminution de vitesse et pertes plus faibles à une vitesse et/ou couple réduit,...), et diminuer le bruit acoustique de ces derniers. Mais l'intérêt est tout aussi important au niveau de la charge entraînée avec une meilleure adaptation de la vitesse (de l'air brassé par les pales) au travail à effectuer, une modification rapide de la vitesse qui s'adapte mieux au processus, et la suppression des à-coups au démarrage. Cela nous permet d'affirmer que le simple fait de recourir au remplacement de la commande pneumatique par un variateur de vitesse résout, non seulement, les problèmes posés par la technique de régulation mais aussi les problèmes posés par les moteurs eux-mêmes (à-coups, pertes d'énergie électrique, durée de vie des moteurs qui se voit rallongée) qui ne constituaient pas des préalables tout au début, dont le résultat peut en effet être plus que satisfaisant.

Après avoir fait un constat des problèmes posés par le circuit pneumatique qui ne peuvent être résolus qu'avec la mise en place d'un dispositif de variation de vitesse dont les techniques sont nombreuses et les stratégies diverses, notre choix s'est porté sur l'utilisation d'un variateur de fréquence avec une loi de commande à v/f constant, une technique répandue il y a une vingtaine d'années mais qui est toujours d'actualité et représente une des solutions privilégiées par les industriels dans le cas des moteurs à induction. Elle consiste à maintenir le couple maximal constant pour que le moteur asynchrone fonctionne dans une plage de vitesse allant de 25% à 100% de la vitesse nominale.

Comme le problème est pratique, la solution doit l'être aussi, donc un choix dans les gammes des produits industriels existants s'impose, un choix qui étant intimement lié à la nature de la charge entraînée et aux performances visées, conditions climatiques. Toute définition et recherche d'un variateur de vitesse doivent passer par une analyse des exigences fonctionnelles de l'équipement puis des performances requises pour le moteur lui-même. La documentation des fournisseurs de variateurs de vitesse fait également abondamment mention de couple constant, couple variable, puissance constante, contrôle vectoriel de flux, variateur réversible... Ces désignations caractérisent toutes les données nécessaires pour retenir le type de variateur le plus adapté. Un choix incorrect de variateur peut conduire à un fonctionnement décevant. De même, il faut tenir compte de la gamme de vitesse souhaitée pour choisir convenablement l'association moteur / variateur.

Toutes les informations réunies dans un Cahier Technique doivent permettre d'aboutir à un bon choix en consultant la documentation des constructeurs ou, ce qui est encore plus sûr, en s'adressant, avec toutes les précisions nécessaires, à des spécialistes pour sélectionner le variateur apportant le meilleur rapport performances/ prix.

[1]: [Moteurs et charges *Explication de l'influence du fonctionnement des moteurs et des charges sur leur comportement électrique.*

Source : www.Shnieder.fr

[2][Technique de l'ingénieur] **Alimentation des machines asynchrones**

par **Bernard de FORNEL** *Docteur ès Sciences Ingénieur ENSEEIHT*

Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse D 3 620

[3][Cahier technique n°204 protection BT et variateur de vitesse (convertisseur de fréquence) Merlin Gerin Modicon Square D Télémécanique J. Schonek

Y. Nebon]

[4] **J.L Dalmasso**, « cours d'électrotechnique », Edition BELIN, 1985

[5] **P. Barret**, « Régimes transitoires des machines tournantes électriques » Edition Eyrolles, Paris, 1987.

[6] **N. Khenfer**, « Machine asynchrone : ses modèles, son identification et sa commande »,

Thèse de Doctorat, I.N.P de Lorraine (France), Octobre 1995.

[7] **Michel ETIQUE**, « entrainements réglés », Yverdon-les-Bains, mars2006

[8] : Moteurs et charges *Explication de l'influence du fonctionnement des moteurs et des charges sur leur comportement électrique]*

Source : <http://www.iai.heig-vd.ch/~mee/>.

[11]ÉLECTROTECHNIQUE Théodore W Gilbert SYBILLE 4eme edition ed de boeck 2005

[12] « Départs Moteurs » et « les techniques de commande du moteur asynchrone »,

Source : www.Shnieder.fr

[13]: **Zhenyu Yu and David Figoli**, « AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240 » APPLICATION REPORT, April 1998,

[14] **Michel Pinard**,« COMMANDE ELECTRONIQUE DES MOTEUR ELECTRIQUES », DUNOD, Paris, 2004.

[15] : **Michel Pinard**, « CONVERTISSEURS ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE », Commande. Description. Mise en œuvre, DUNOD, Paris, 2007.

[16] : **Gabriel Buche**, «commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel MTLAB/SIMULINK »,PFE, (C.U.E.F.A).

[17] Automatismes et contrôle **Démarrateurs progressifs et variateurs de vitesse** Catalogue

2007/2008 (document schneider electric)

Tables de conversion entre unités usuelles

Longueur				
Unité	m	in.	ft	yd
1 mètre (m)	1	39,37	3,281	1,094
1 pouce (in. ou ")	0,0254	1	0,0833	0,02778
1 pied (ft ou')	0,3048	12	1	0,3333
1 yard (yd)	0,9144	36	3	1

Surface				
Unité	m ²	sq.in.	sq.ft	sq.yd
1 mètre carré (m ²)	1	1550	10,764	1,196
1 pouce carré (sq.in.) (in ²)	6,4510 ⁻⁴	1	6,94410 ⁻⁴	7,74610 ⁻⁴
1 pied carré (sq.ft) (ft ²)	0,0929	144	1	0,111
1 yard carré (sq.yd) (yd ²)	0,8361	1296	9	1

Volume					
Unité	m ³	dm ³	cu.in.	cu.ft	cu.yd
1 mètre cube (m ³)	1	1000	61024	35,3147	1,3079
1 décimètre cube (dm ³) (litre)	0,001	1	61,024	0,0353	0,0013
1 pouce cube (cu.in.) (in ³)	1,63910 ⁻⁴ ou 0,0164	0,0164	1	5,78710 ⁻⁴	2,14810 ⁻⁴
1 pied cube (cu.ft) (ft ³)	0,0283	28,32	1728	1	0,0370
1 yard cube (cu.yd) (yd ³)	0,7646	764,6	46656	27	1

Masse			
Unité	kg	oz	lb
1 kilogramme (kg)	1	35,27	2,205
1 once (oz)	0,028	1	0,0625
1 livre (lb)	0,454	16	1

Pression				
Unité	Pa	MPa	bar	psi
1 pascal (Pa) ou 1 newton par mètre carré (N/m ²)	1	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	1,4810 ⁻⁴
1 mégapascal (MPa) ou 1 newton par mm ² (N/mm ²)	10 ⁶	1	10	145,04
1 bar (bar)	10 ⁵	0,1	1	14,504
1 poundweight par pouce carré (l. b/in. ²) (psi)	6895	6,89510 ⁻³	0,06895	1

Tables de conversion entre unités usuelles (suite)

Vitesse angulaire

Unités	rad/s	tr/min
1 radian par seconde (rad/s)	1	9,549

1 tour par minute (tr/min)	0,105	1
----------------------------	-------	---

Vitesse linéaire

Unités	m/s	km/h	m/min
1 mètre par seconde (m/s)	1	3,6	60

1 kilomètre par heure (km/h)	0,2778	1	16,66
------------------------------	--------	---	-------

1 mètre par minute (m/min)	0,01667	0,06	1
----------------------------	---------	------	---

Puissance

Unités	W	ch	HP	ft.lbf/s
1 watt (W)	1	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$1,341 \cdot 10^{-4}$	0,7376

1 cheval (ch)	736	1	0,9863	542,5
---------------	-----	---	--------	-------

1 horse-power (HP)	745,7	1,014	1	550
--------------------	-------	-------	---	-----

1 ft.lbf/s	1,356	$1,348 \cdot 10^{-4}$	$1,313 \cdot 10^{-4}$	1
------------	-------	-----------------------	-----------------------	---

Force

Unités	N	kgf	lbf	pd
1 newton (N)	1	0,102	0,225	7,233

1 kilogramme-force (kgf)	9,81	1	2,205	70,98
--------------------------	------	---	-------	-------

1 pound weight (lbf)	4,448	0,453	1	32,17
----------------------	-------	-------	---	-------

1 poundal (pd)	0,138	0,0141	0,0311	1
----------------	-------	--------	--------	---

Energie-travail-chaleur

Unités	J	cal	kWh	B.t.u.
1 joule (J)	1	0,24	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$9,48 \cdot 10^{-4}$

1 calorie (cal)	4,185	1	$1,163 \cdot 10^{-6}$	$3,987 \cdot 10^{-4}$
-----------------	-------	---	-----------------------	-----------------------

1 kilowatt-heure (kWh)	$3,6 \cdot 10^6$	$8,60 \cdot 10^6$	1	3412
------------------------	------------------	-------------------	---	------

1 British thermal unit (B.t.u.)	1055	252	$2,93 \cdot 10^{-4}$	1
---------------------------------	------	-----	----------------------	---

Moment d'inertie

Unités	kgm ²	lb.ft ²	lb.in ²	oz.in ²
1 kilogramme-mètre carré (kgm ²)	1	23,76	341,7	540,75

1 livre-pied carré (lb.ft ²)	0,042	1	144	2304
--	-------	---	-----	------

1 livre-pouce carré (lb.in ²)	$2,237 \cdot 10^{-4}$	$6,944 \cdot 10^{-6}$	1	16
---	-----------------------	-----------------------	---	----

1 once-pouce carré (oz.in ²)	$1,829 \cdot 10^{-5}$	$4,94 \cdot 10^{-7}$	0,0625	1
--	-----------------------	----------------------	--------	---

Une sélection dans la gamme des puissances

Altivar 21 : solutions HVAC

Solutions IP20 et IP54 - Réseau : triphasé de 220 à 480 V

Moteur		Variateur	
KW	HP	Références*	Encombrement L x H x P (mm)
0,75	1	ATV2 1H075..	107 x 148 x 150
1,5	2	ATV2 1H115..	107 x 143 x 150
2,2	3	ATV2 1H122..	107 x 143 x 150
3	-	ATV2 1H130..	142 x 184 x 150
4	5	ATV2 1H140..	142 x 184 x 150
5,5	7,5	ATV2 1H155..	142 x 184 x 150
7,5	10	ATV2 1H175..	180 x 232 x 170
11	15	ATV2 1H111..	180 x 232 x 170
15	20	ATV2 1H115..	245 x 320,5 x 190
18,5	25	ATV2 1H118..	245 x 320,5 x 190
22	30	ATV2 1H122..	240 x 420 x 210
30	40	ATV2 1H130..	240 x 420 x 210
37	50	ATV2 1H137..	240 x 520 x 244
45	60	ATV2 1H145..	240 x 520 x 244
55	75	ATV2 1H155..	320 x 630 x 260
75	100	ATV2 1H175..	320 x 630 x 260

Les variateurs Altivar 21 et Altivar 61 existent en version IP20 et IP54 adaptables à vos installations.

Pour tout renseignement complémentaire, reportez-vous au catalogue Schneider Electric ou demandez conseil à votre agence commerciale.



* En fin de référence, préciser :
MB pour 220V
N4 pour 480V

Altivar 61 : solutions de pompage et ventilation pour les infrastructures et l'industrie

Solutions IP20 et IP54 - Réseau : triphasé de 220 à 690 V

Moteur		Variateur	
KW	HP	Références*	Encombrement L x H x P (mm)
0,75	1	ATV6 1H075..	130 x 230 x 175
1,5	2	ATV6 1H115..	130 x 230 x 175
2,2	3	ATV6 1H122..	130 x 230 x 175
3	-	ATV6 1H130..	155 x 260 x 187
4	5	ATV6 1H140..	155 x 260 x 187
5,5	7,5	ATV6 1H155..	175 x 265 x 187
7,5	10	ATV6 1H175..	175 x 265 x 187
11	15	ATV6 1H111..	210 x 265 x 213
15	20	ATV6 1H115..	230 x 400 x 213
18,5	25	ATV6 1H118..	230 x 400 x 213
22	30	ATV6 1H122..	240 x 420 x 236
30	40	ATV6 1H130..	240 x 520 x 266
37	50	ATV6 1H137..	240 x 520 x 266
45	60	ATV6 1H145..	320 x 620 x 290
55	75	ATV6 1H155..	320 x 620 x 290
75	100	ATV6 1H175..	320 x 620 x 290
90	125	ATV6 1H190..	320 x 820 x 377
110	150	ATV6 1H111..	320 x 820 x 377
132	200	ATV6 1H113..	360 x 102 x 377
160	250	ATV6 1H115..	340 x 110 x 377
220	300	ATV6 1H122..	440 x 110 x 377
250	400	ATV6 1H125..	595 x 110 x 377
315	500	ATV6 1H131..	595 x 110 x 377
400	600	ATV6 1H140..	800 x 130 x 377
500	700	ATV6 1H150..	800 x 130 x 377
630	900	ATV6 1H160..	1120 x 130 x 377
800	1100	ATV6 1H180..	1120 x 130 x 377

* En fin de référence, préciser :
MB pour 220 V
N4 pour 480 V
Y pour 690 V

