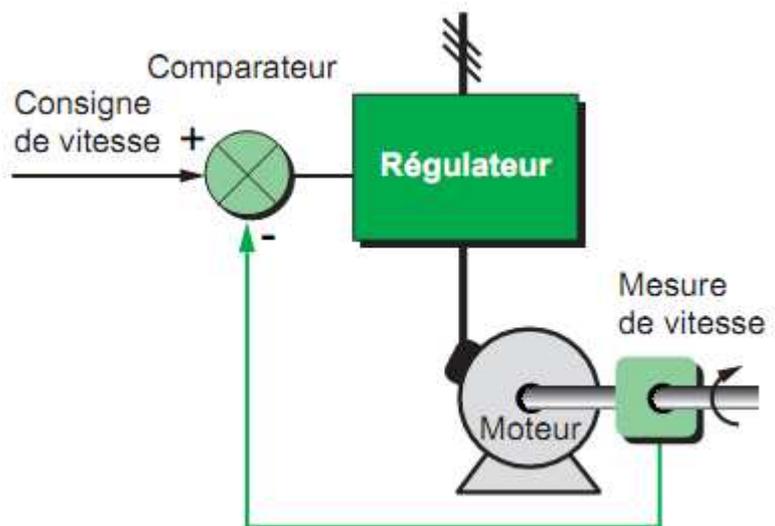


Commande électronique des moteurs à courant continu



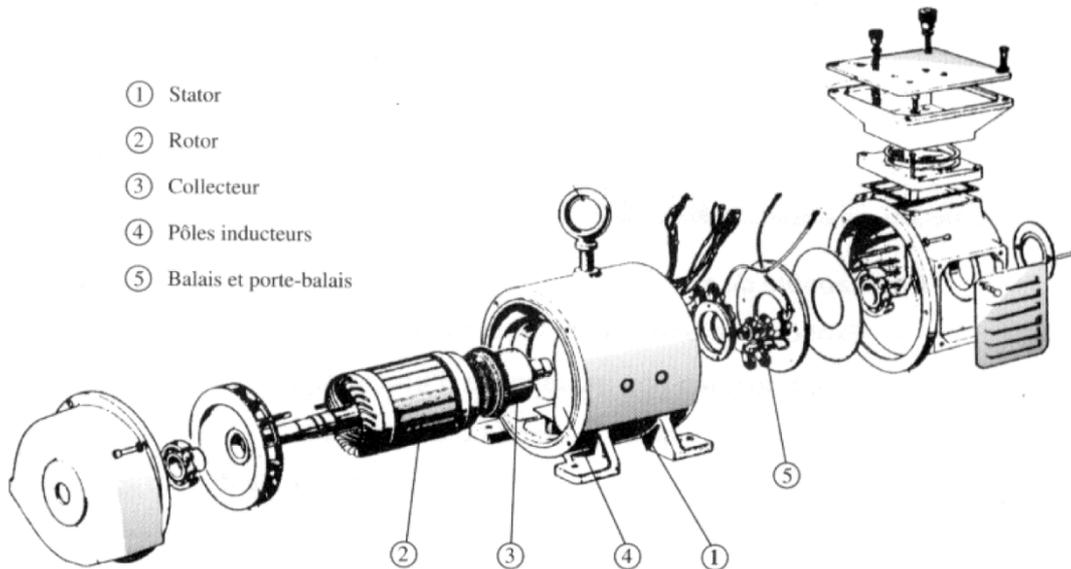
Sommaire

- Rappel sur les Moteurs à courant continu
 - ❖ Théorie de base :
 - ❖ Caractéristiques des moteurs à courant continu :
 - ❖ Choix d'un moteur à courant continu - caractéristiques mécaniques
- Fonctionnement d'un ensemble moteur-machine entraînée
 - ❖ Possibilité de fonctionnement d'un ensemble Moteur cc-Machine entraînée
 - ❖ Point de fonctionnement
 - ❖ Stabilité
 - ❖ Démarrage de l'ensemble moteur – machine entraînée
 - ❖ Caractéristiques mécaniques des machines entraînées
- Application au moteur à excitation séparée
 - ❖ Réglage de la vitesse
 - ❖ Commande de vitesse pour moteur à courant continu
 - ❖ Variateur de vitesse à redresseur contrôlé type monophasé
 - ❖ Variateur de vitesse à redresseur contrôlé type triphasé
 - ❖ Variateur de vitesse à hacheur
- Régulation de vitesse
 - ❖ Régulation par génératrice tachymétrique
 - ❖ Régulation par tension d'armature
 - ❖ Limitation de courant
- Variateur de vitesse industriel pour moteur c-c
 - ❖ Principe général
 - ❖ Inversion du sens de marche et freinage par récupération
 - ❖ Modes de fonctionnement possibles
 - ❖ Diagramme de fonctionnement
 - ❖ Rôle de la diode de roue libre
- Choix de l'ensemble convertisseur moteur selon le réseau d'alimentation et la puissance mise en jeu
 - ❖ Alimentation des convertisseurs
 - ❖ *Choix de l'ensemble convertisseur-moteur selon la puissance de la charge*

1- Rappel sur les Moteurs à courant continu

a) Théorie de base :

Constitution : (fig.1)



- ① Sur le **stator** est bobiné l'**inducteur** ④. L'inducteur crée un champ magnétique à travers le rotor. Pour créer ce champ, l'inducteur peut-être constitué de bobinages ou d'aimants permanents.
- ② Sur le **rotor** se trouve le bobinage **induit**.
Le **collecteur** ③ et les **balais** ⑤ permettent l'alimentation électrique de l'induit.

Flux magnétique

Le champ magnétique inducteur et son flux à travers les spires de l'induit peuvent être produits de deux façons différentes :

- Par un bobinage alimenté par une source de tension U_e et parcouru par un courant I_e dit courant d'excitation.
Dans ce cas le flux peut-être modifié. Il est proportionnel au courant d'excitation I_e .
- Par des aimants permanents.
Dans ce cas, le flux est constant et ne peut être modifié.

L'ensemble stator plus rotor constitue un circuit magnétique canalisant le champ magnétique crée par l'inducteur.

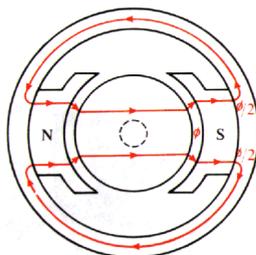


Fig.2 Ligne de champ d'un moteur bipolaire

Force électromotrice

Une bobine (l'induit ②) en mouvement dans un champs magnétique (l'inducteur ①) voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la :

$$\text{loi de Faraday } e = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Sur ce principe, l'induit de la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = K \Phi \Omega$$

Couple électromagnétique

Un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique subit la force de Laplace

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$$

Sur ce principe le rotor de la machine possède un couple que l'on nommera couple électromagnétique.

$$C_{em} = K \Phi I$$

Conservation de l'énergie

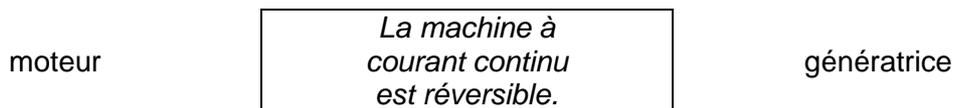
La puissance électromagnétique est la partie de la puissance électrique de la machine, convertie en puissance mécanique.

$$P_{em} = EI = T_{em} \Omega$$

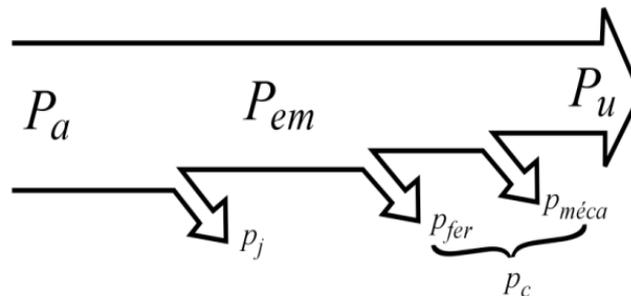
$\begin{matrix} \nearrow & \nwarrow \\ \text{forme} & \text{forme} \\ \text{électrique} & \text{mécanique} \end{matrix}$

Réversibilité

Une même machine pourra fonctionner en moteur ou en génératrice. On dit qu'elle est réversible.



Bilan des puissances



$$P_a = P_u + p_j + p_c$$

b) Caractéristiques des moteurs à courant continu :

Moteur shunt (ou excitation séparée)

■ Caractéristiques électromécaniques

Ce sont les caractéristiques qui établissent des relations entre des grandeurs électriques et mécaniques: $C_m = f(I)$ et $n = f(I)$.

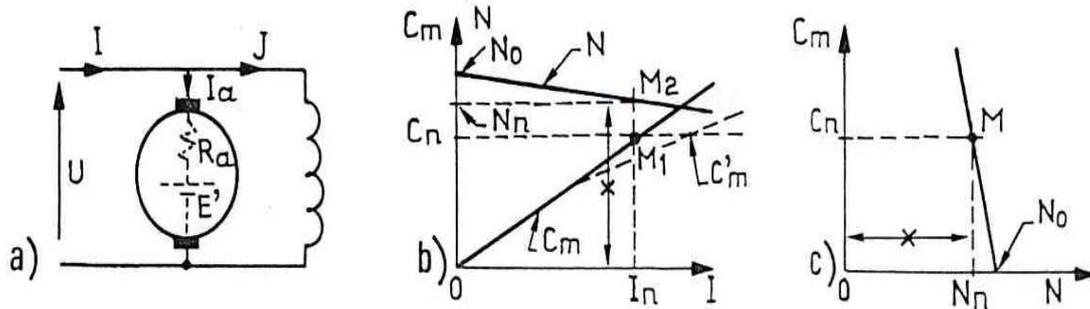


Fig.3

- Caractéristique de couple $C_m = f(I)$

On a: $I = I_a + J$ avec $J = U / R_i$

La résistance de l'inducteur R_i étant toujours élevée, le courant inducteur J peut être négligé par rapport au courant induit (fig.3.a), ce qui permet d'écrire: $I_n \approx I$

Comme le flux d'excitation est constant, dans la mesure où l'on néglige la réaction de l'induit, il vient:

$$C_m = (1/2\pi) (p/a) N \Phi I = K \cdot I_n \quad \text{avec} \quad K = (1/2\pi) (p/a) N$$

La caractéristique $C_m = f(I)$ est sensiblement une droite passant par origine.

- Caractéristique de vitesse $n = f(I)$ (fig.3.b)

Par ailleurs, on a:

$$U - R_a I = E' = (p/a) N n \Phi = K' n \quad \text{avec} \quad K' = (p/a) N \Phi$$

$$\text{d'où:} \quad n = (U - R_a I_n) / K'$$

Dans la pratique, la chute de tension dans l'induit ne dépasse pas un à deux pour cent de la tension appliquée, aussi on peut conclure:

La caractéristique $n = f(I)$ est une droite descendante de pente très faible.

- Caractéristique mécanique $C_u = f(n)$ (fig.3.c)

$$C = (1/2\pi) (p/a) N \Phi (1/R) (U - p/a N \Phi n)$$

A vide, lorsque $C = C_r = 0$, n prend une valeur n_0 telle que

$$U - p/a N \Phi n_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad n_0 = U / (p/a N \Phi)$$

La caractéristique mécanique $C_u = f(n)$ est une droite faiblement inclinée par rapport à la verticale, dont l'abscisse à l'origine est $n(I_0) \approx n_0$.

Moteur série

■ Caractéristiques électromécaniques

- *Caractéristique de couple $C_m = f(I)$ (fig.4.b)*

Les courants de l'induit et de l'excitation sont identiques ($I = I_a = J$) (fig.4.a) et si on suppose, pour simplifier, que le circuit magnétique n'est pas saturé, le flux utile est proportionnel au courant d'excitation J (ou $\Phi = \alpha I$), soit :

$$C_m = K \Phi I_a \approx K' I^2 \quad \text{avec} \quad K' = K \alpha$$

La caractéristique $C_m = f(I)$ est sensiblement une parabole qui passe par l'origine.

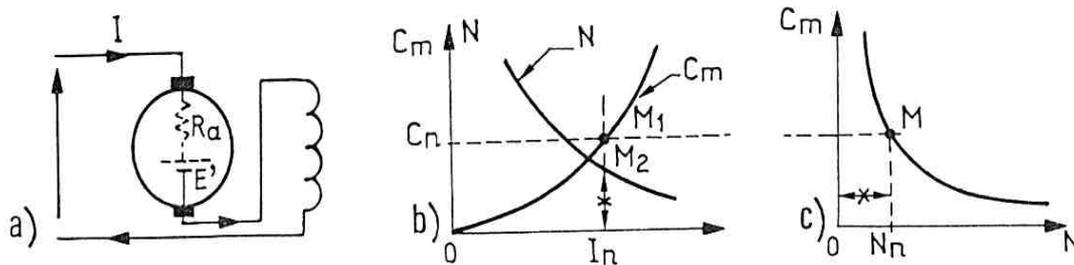


Fig.4

- *Caractéristique de vitesse $n = f(I)$ (fig.4.b)*

$$n = (1/K'') [U - (R_a + R_i) I] / I$$

La caractéristique $n = f(I)$ est la branche positive décroissante d'une hyperbole.

■ Caractéristique mécanique (fig.4.c)

En éliminant I entre les deux caractéristiques précédentes on peut obtenir graphiquement la caractéristique mécanique.

C_u diminue lorsque n augmente: le couple utile est sensiblement *inversement proportionnel* à la fréquence de rotation:

$$C_u \approx K / n \quad \text{avec} \quad K = C^{te}$$

Lorsque le couple C_r augmente le courant I appelé croît et la fréquence de rotation n décroît.

Lorsque $C_r = 0 \Rightarrow C_u = 0$ on observe alors sur la caractéristique du couple $C_m = f(I)$ que $I = I_0 \ll I_n$. La caractéristique de vitesse montre que la valeur de n qui correspondrait à I_0 serait *très supérieure* à n_n : il s'agit d'une fréquence de rotation que le moteur ne peut pas supporter : *le moteur série s'emballe à vide*.

c) Choix d'un moteur à courant continu - caractéristiques mécaniques

Pour faciliter le choix d'un moteur électrique en vue d'un entraînement donné, on distingue les deux types suivants:

- la caractéristique shunt - si la vitesse du moteur varie peu avec la charge (fig.5.a);
- la caractéristique série - si la vitesse du moteur varie beaucoup avec la charge (fig.5.b).

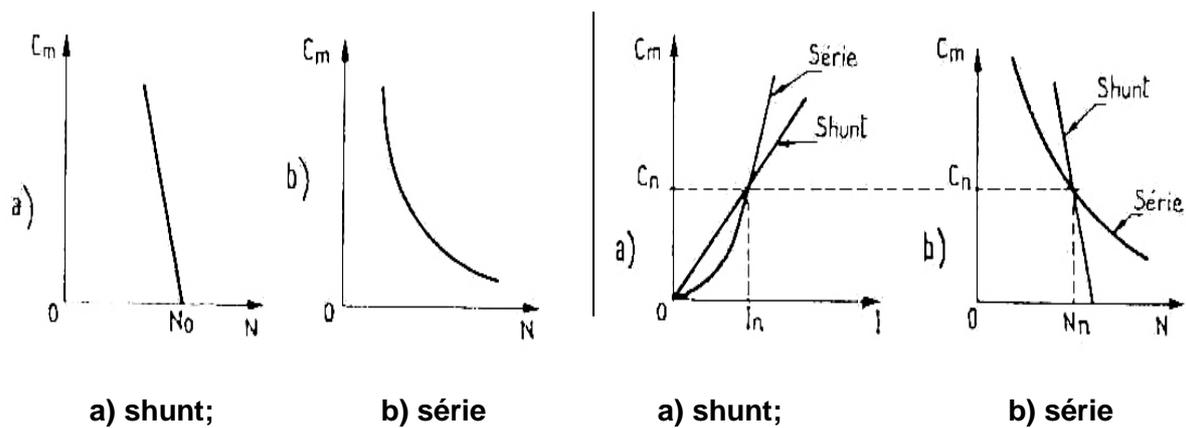


Fig. 5 Caractéristiques mécaniques

Cette nomination qui provient de l'allure des caractéristiques du moteur shunt et série à courant continu s'applique également aux moteurs à courant alternatif. C'est ainsi que le moteur asynchrone, dont la caractéristique mécanique est compliquée, présente une allure shunt dans sa partie stable car la vitesse varie peu avec la charge.

Afin d'analyser les propriétés de ces deux types de caractéristiques, il est intéressant de comparer les comportements de deux moteurs (fig.5), shunt et série, de mêmes valeurs nominales quand ils doivent faire face à une brusque augmentation du couple résistant. Sur la figure où sont présentées les caractéristiques mécaniques des deux moteurs, les points d'intersection donnent les valeurs nominales de chacun des moteurs.

Supposons que pour un démarrage à pleine charge nécessitant une forte accélération (démarrage d'une véhicule) on ait besoin d'un couple double du couple nominal, on constate que le moteur série le fournit avec un courant plus faible que le moteur shunt, mais en revanche sa vitesse a diminué davantage. Si cette variation de vitesse n'est pas gênante (traction, engins de levage, etc.) la caractéristique série convient parfaitement, dans le cas contraire (tours, raboteuses, fraiseuses, etc.), il faut utiliser la caractéristique shunt

2- Fonctionnement d'un ensemble moteur-machine entraînée

a) Possibilité de fonctionnement d'un ensemble Moteur cc-Machine entraînée

- Quatre possibilités sont résumées dans la courbe mécanique de la machine à cc, Il s'agit d'un fonctionnement en quatre quadrants :
 - marche en Moteur sens avant, sens arrière (Quadrant 1 & 3)
 - marche en générateur « freinage » (Quadrant 2 & 4)
- Couple de démarrage C_d permettant le choix du moteur série ou à excitation séparée
- L'évolution du couple et de la puissance en cours de fonctionnement, soit :
 - Un fonctionnement à couple constant
 - Un fonctionnement à puissance constante
- Choix du convertisseur en fonction du réseau :
 - Convertisseur monophasé ou triphasé
 - Convertisseur avec pont complet ou mixte
 - Réversibilité de fonctionnement par contacteurs ou double convertisseur
 - Adaptation de la tension au réseau, directe ou par transformateur

b) Point de fonctionnement

On détermine le point de fonctionnement M du groupe en représentant sur un même diagramme les caractéristiques mécaniques du moteur et de la machine qu'il entraîne. Au point d'intersection de ces deux caractéristiques, on a: $C_m = C_r$

c) Stabilité (fig.6)

Il est intéressant de rechercher à quelle condition le fonctionnement de cet ensemble est stable. A cet effet, supposons que pour une cause extérieure ce groupe ralentisse, il y a deux possibilités:

- Dans le premier cas, le ralentissement du groupe correspond à une augmentation du couple moteur qui devient supérieur au couple résistant (a). Dans ces conditions, à la première cause de nature externe s'oppose une cause interne qui tend à ramener le groupe à sa vitesse initiale.
- Dans le deuxième cas (b), le ralentissement du groupe provoque une augmentation du couple résistant par rapport au couple moteur, ce qui a pour effet d'accroître le déséquilibre et d'entraîner ainsi l'arrêt du groupe.

On peut traduire mathématiquement la condition de stabilité en écrivant que la pente de la caractéristique $C_m - C_r$ doit être négative, soit:

$$\Delta(C_m - C_r) / \Delta n < 0$$

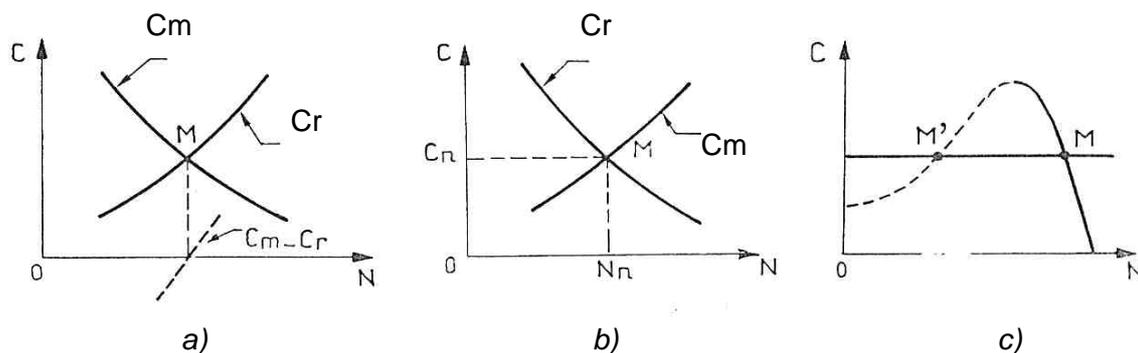


Fig. 6

Ce résultat s'applique à un moteur quelconque (continu ou alternatif). En effet, si l'on considère l'ensemble formé par un moteur asynchrone et la machine à couple constant qu'il entraîne (c), on constate qu'il y a deux points de fonctionnement possibles M et M' . De ces deux points, seul M est stable; c'est ainsi que l'on peut représenter en trait plein le domaine stable de la caractéristique.

d) Démarrage de l'ensemble moteur – machine entraînée

La connaissance des caractéristiques mécaniques du moteur et de la machine entraînée est nécessaire pour la détermination du temps du démarrage de cet ensemble. En effet, on a:

$$C_m - C_r = K \, d\Omega/dt$$

où K désigne le moment d'inertie de la partie tournante.

Dans la pratique on utilise une méthode graphique en créant des intervalles pour lesquels on peut déterminer une valeur moyenne. Pour chacun de ces intervalles on a:

$$t_1 - t_0 = [2\pi K / (C_m - C_r)] (n_1 - n_0)$$

La connaissance du temps du démarrage d'un groupe est importante car, si ce temps est trop long, il peut en résulter un échauffement excessif du moteur qui peut provoquer sa destruction. Pour éviter cet inconvénient, on doit utiliser un moteur de plus fortes dimensions.

e) Caractéristiques mécaniques des machines entraînées

La caractéristique mécanique d'une machine entraînée est en général complexe. Toutefois celle-ci peut avoir une expression mathématique simple pour certaines applications.

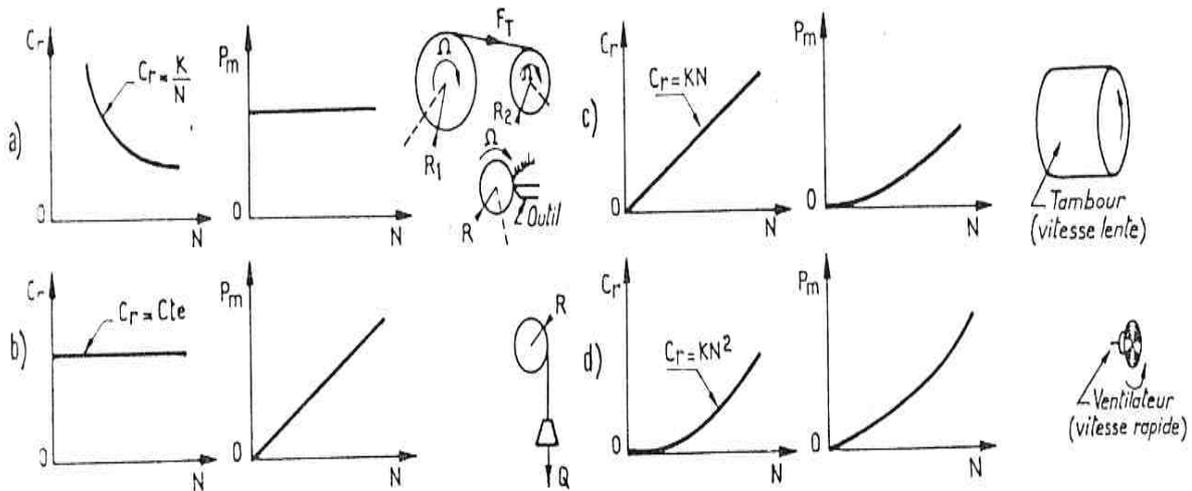


Fig. 7

- *Couple inversement proportionnel à la vitesse* (fig.7.a) - Cet entraînement $C_r = K/n$ se rencontre quand on déroule un produit (tôle, papier, fil, etc.) d'un premier tambour afin de l'enrouler sur un deuxième tambour. L'analyse des conditions démontre que cet entraînement fonctionne à puissance constante.
- *Couple constant* (fig.7.b) - Ce couple est indépendant de la vitesse, aussi la puissance reçue est-elle proportionnelle à la vitesse. Ce fonctionnement est applicable à la plupart des engins de levage.
- *Couple proportionnel à la vitesse* (fig.7.c) - Ce type d'entraînement est peu fréquent; il concerne des machines qui tournent lentement, avec des tambours de grandes dimensions (machines à polir, à rendre les tissus brillants, etc.), le frottement étant proportionnel à la vitesse.
- *Couple proportionnel au carré de la vitesse* (fig.7.d) - Cet entraînement est fréquent, car il concerne les machines qui tournent vite (ventilateurs, soufflantes, etc.), le frottement étant alors proportionnel au carré de la vitesse; pour cette raison on l'appelle couple ventilateur.

3- Application au moteur à excitation séparée

a) Réglage de la vitesse :

L'expression générale de la vitesse :

$$n = (U - R I) / K \Phi$$

Dans ces conditions on constate qu'il y a trois paramètres (R_h , Φ , U) qui peuvent être réglés. Cela donne trois possibilités suivantes :

- **Réglage rhéostatique**

Ce type de réglage a l'avantage d'être simple à réaliser, mais représente de graves inconvénients aussi bien sur le plan technique que sur le plan économique. En effet, du point de vue technique, on constate que les caractéristiques sont de plus en plus tombantes.

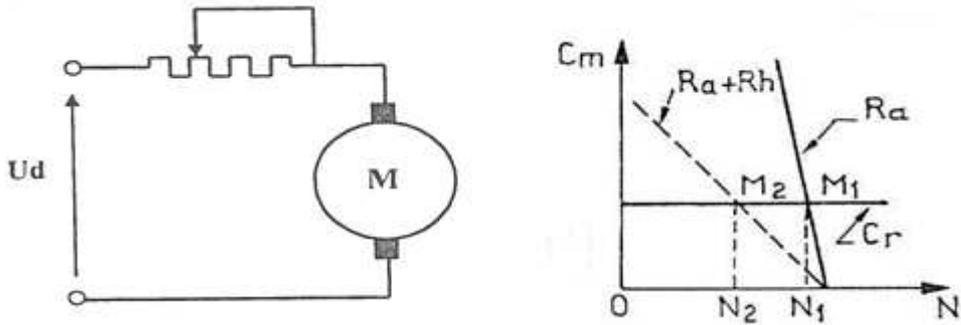


Fig. 8

- **Réglage par le flux**

Le démarrage d'un moteur shunt doit toujours être assuré avec le flux maximal (ou flux nominal) et la vitesse normale du moteur étant atteinte quand la tension nominale est appliquée aux bornes de l'induit.

Dans ces conditions, on n'a pas la possibilité d'augmenter le flux, on peut seulement le réduire en diminuant le courant J d'excitation par l'intermédiaire d'un rhéostat de champ. Si l'on se réfère à la relation de base, on constate que la diminution du flux a pour effet d'augmenter la vitesse

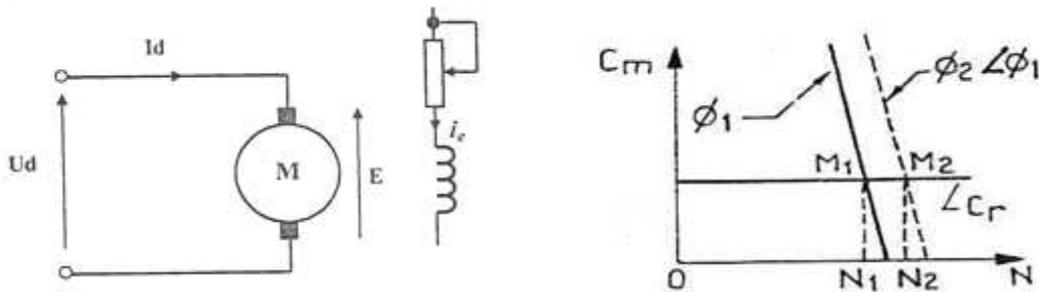


Fig.9

- **Réglage par la tension**

Ce mode de réglage, qui permet de réduire à volonté la vitesse d'un groupe (moteur et machine entraînée), est excellent d'une part du point de vue technique car les caractéristiques ne sont pas déformées (elles conservent leur allure shunt), d'autre part le rendement demeure élevé à toutes vitesses.

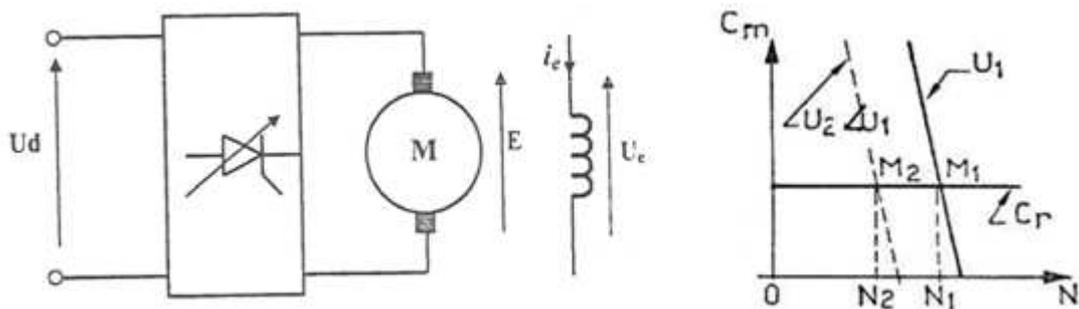


Fig.10

b) Commande de vitesse pour moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles, bien que leur construction soit plus complexe que celle des moteurs à courant alternatif. Les avantages de ces moteurs sont :

- une large gamme de variations de vitesse au-dessus et au-dessous de la vitesse de régime établi ;
- un fonctionnement avec des couples constants ou variables ;
- une accélération, un freinage et une inversion du sens de rotation très rapide, ce qui est avantageux dans le cas des appareils de levage et des machines outils ;
- une vitesse de rotation qui peut être régulée par l'intermédiaire d'un système de rétroaction ;
- la possibilité de fonctionner comme générateur lors du freinage par récupération d'énergie.

c) Variateur de vitesse à redresseur contrôlé type monophasé

Entraînement en 2 quadrants :

Les convertisseurs alternatif- continu sont les variateurs de vitesse les plus répandus pour les moteurs à courant continu, puisqu'ils utilisent directement la tension du réseau. Ils sont monophasés ou triphasés. Les ponts monophasés sont utilisés dans les variateurs de faible puissance (jusqu'à 10KW environ). Ils comprennent soit un pont complet de quatre thyristors (Fig.11) ou un pont mixte à deux thyristors et deux diodes.

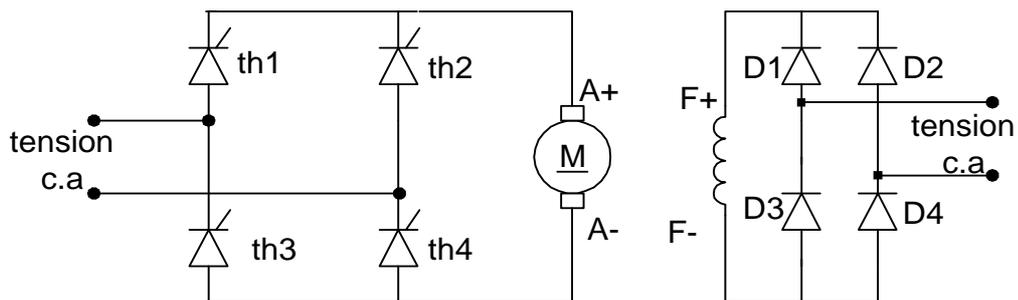


Fig.11 Redresseur à thyristors monophasés

Variateur de vitesse réversible :

Un variateur est réversible lorsqu'il permet un changement rapide du sens de marche. Cela nécessite une commande à quatre cadrants. La fig.12 représente les quatre cadrants dans lesquels un variateur réversible peut fonctionner. La vitesse est indiquée sur l'axe horizontal et le couple, sur l'axe vertical.

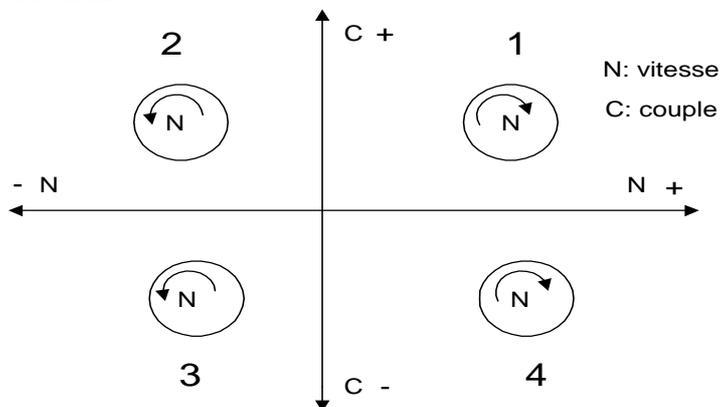


Fig.12 Représentation des quatre quadrants du couple et de la vitesse

- Premier quadrant : Le moteur fonctionne dans le sens direct. Le couple et la vitesse sont positifs.
- Deuxième quadrant : Le moteur fonctionne en sens inverse (vitesse négative) et le couple est positif (période de freinage ou récupération)
- Troisième quadrant : Le moteur fonctionne en sens inverse et le couple est négatif.
- Quatrième quadrant : Le couple est négatif et la vitesse est positive (période de freinage ou récupération).

Déroulement d'un cycle normal :

- Démarrage dans le sens direct (quadrant 1) ; freinage et récupération (quadrant 4).
- Démarrage dans le sens inverse (quadrant 3) ; freinage et récupération (quadrant 2).

Pour réaliser un variateur de vitesse réversible à quatre quadrants, on utilise le montage de la (Fig.13) qui est constitué de deux ponts à thyristors.

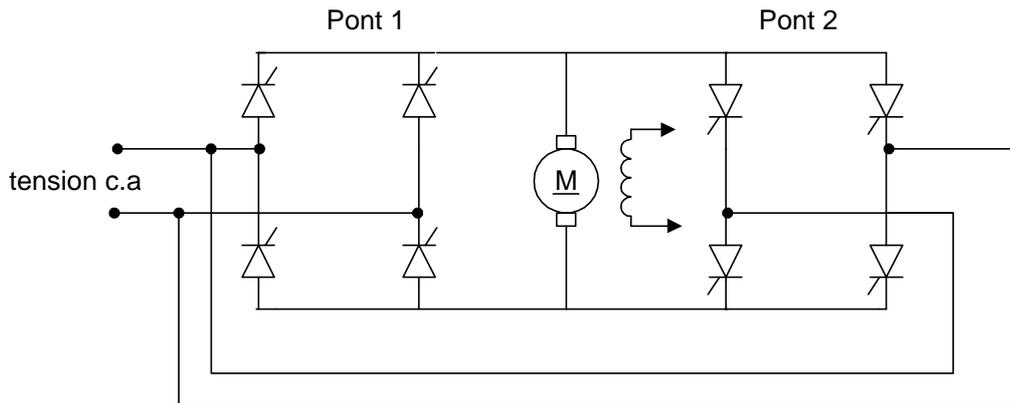


Fig.13 Redresseur réversibles à thyristors

d) Variateur de vitesse à redresseur contrôlé type triphasé

Entrainement en 2 quadrants :

Les ponts triphasés sont employés pour les puissances supérieures à 10KW. On peut choisir un pont complet à six thyristors ou mixte à trois thyristors et trois diodes.

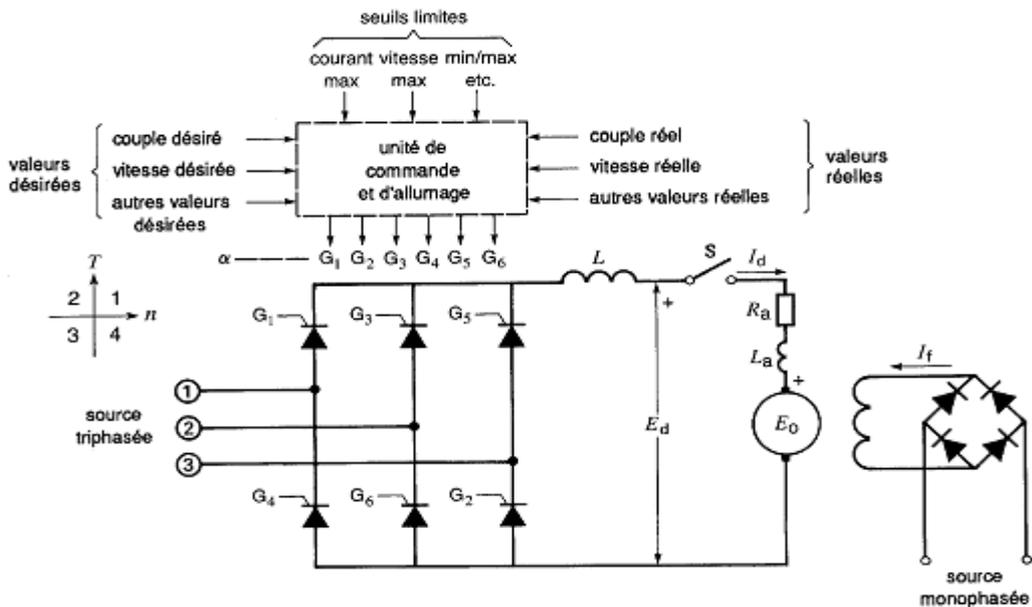


Fig.14

Entrainement en 4 quadrants :

L'analyse est analogue à celle du pont monophasé :

- Démarrage dans le sens direct (quadrant 1) ; freinage et récupération (quadrant 4).
- Démarrage dans le sens inverse (quadrant 3) ; freinage et récupération (quadrant 2).

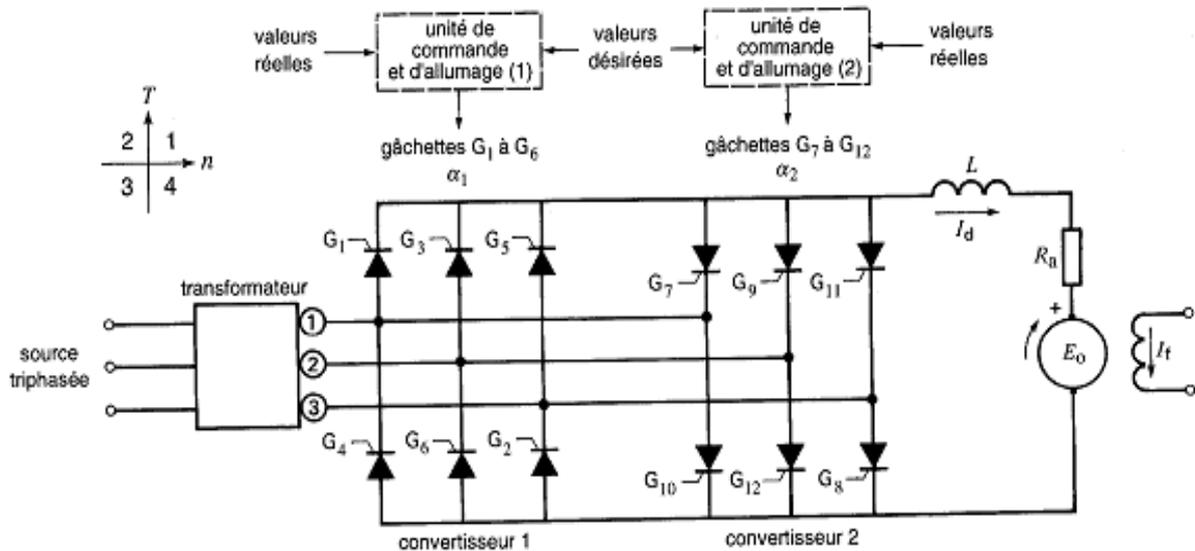


Fig.15

e) Variateur de vitesse à hacheur

Pour des variateurs de faible puissance, ou des variateurs alimentés par une batterie d'accumulateurs, le circuit de puissance, parfois constitué de transistors de puissance (hacheur), fait varier la tension continue de sortie en ajustant le temps de conduction. Ce mode de fonctionnement est dénommé MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

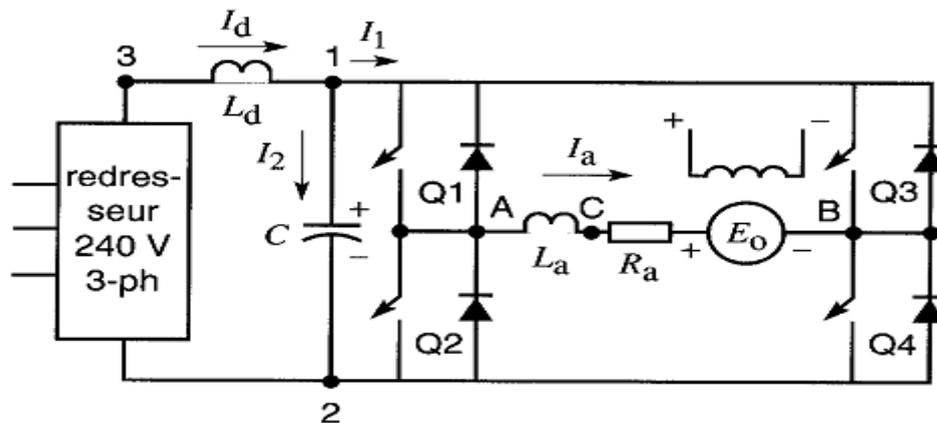


Fig.16

4- Régulation de vitesse

Les variateurs de vitesse permettent non seulement de contrôler la vitesse et d'inverser le sens de rotation, mais aussi d'asservir la vitesse, soit en la maintenant égale à une valeur déterminée, quel que soit le couple résistant exercé sur l'arbre. Le schéma synoptique de la (fig.17) présente les principaux éléments d'un variateur de vitesse pour un moteur c.c à excitation séparée.

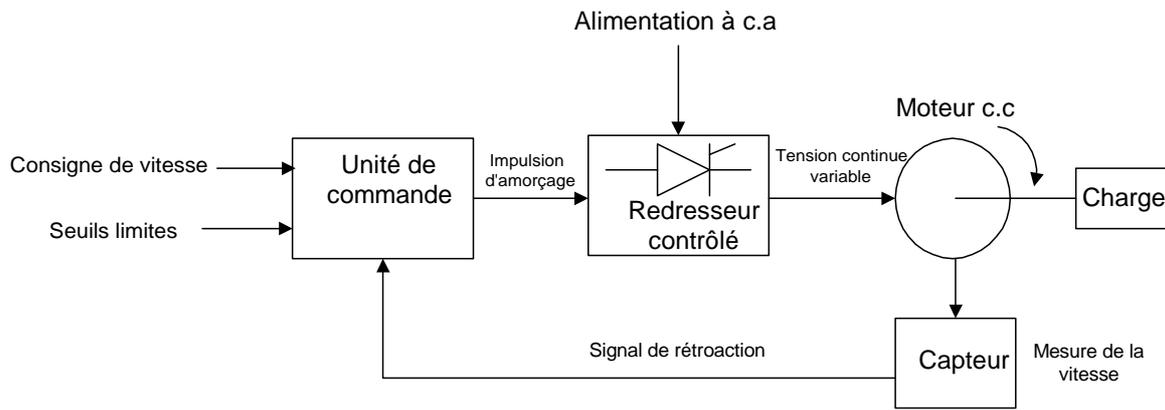


Fig.17 Diagramme synoptique d'un variateur de vitesse pour un moteur à c.c

Le système comprend :

- un module de commande qui est constitué d'un régulateur de vitesse, un circuit d'amorçage à thyristors et des circuits pouvant régler la vitesse de rotation, l'accélération, la décélération, le courant d'induit maximum et le couple maximum. Tous ces réglages peuvent se faire à l'aide de potentiomètres s'il s'agit de carte analogique ou d'un microprocesseur dans le cas de variateur numérique.
- un capteur de vitesse transmettant un signal proportionnel à la vitesse du moteur. Ce capteur est soit une génératrice tachymétrique qui est entraînée par le moteur ou un disque codé, utilisé pour le comptage associé à un convertisseur fréquence-tension.
- un module de commande qui ajuste l'angle d'amorçage des thyristors en fonction de la vitesse du moteur.

On retrouve deux méthodes permettant la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu, soit :

- par génératrice tachymétrique ;
- par tension d'induit ou f.c.é.m.

a) Régulation par génératrice tachymétrique

Celle-ci, placée en bout d'arbre du moteur, fournit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation. Le régulateur agit pour que cette tension (la vitesse de rotation) soit égale à la tension de consigne. Cette méthode permet d'avoir une très grande précision, de 0,1% pour une variation de charge importante.

La fig.18 montre les différents éléments d'une boucle de régulation utilisant une génératrice tachymétrique.

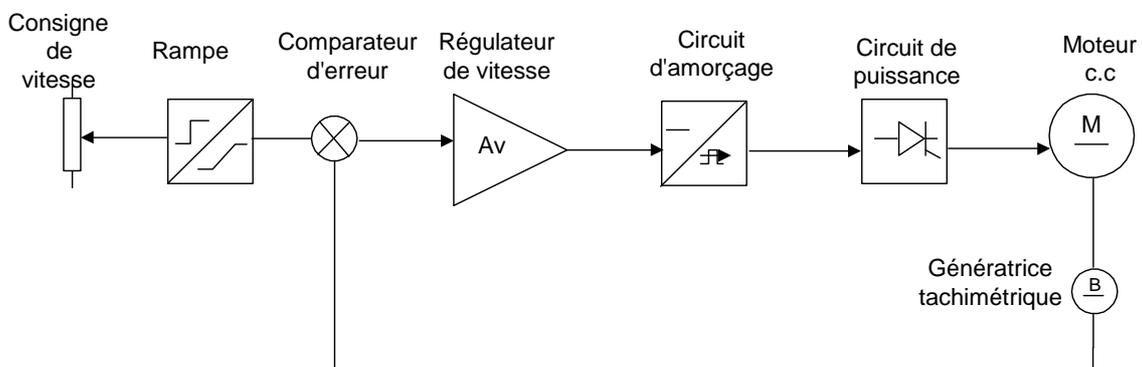


Fig.18 Asservissement de vitesse d'un moteur c.c

b) Régulation par tension d'armature

Avec cette méthode, la variation de vitesse est mesurée par la tension d'induit du moteur (f.c.e.m.) (fig.19). Un circuit de compensation (R.I) est nécessaire à cause de la résistance interne du moteur. La précision obtenue pour la vitesse est de 1 à 2% ; la précision devient mauvaise pour les faibles vitesses.

La mesure est prise à partir d'un réseau résistif ou d'une carte électronique d'isolation.

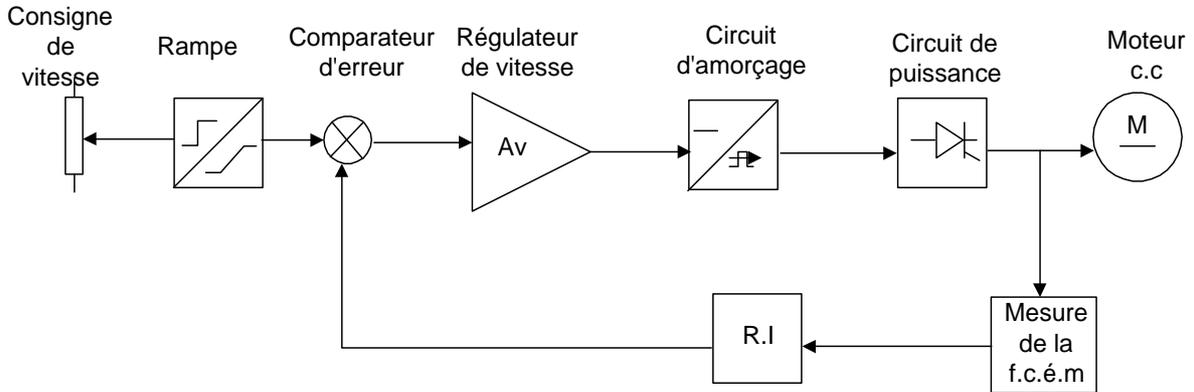


Fig.19 Régulation par force contre-électromotrice

c) Limitation de courant (fig.20)

Pour protéger le moteur contre les surcharges, un dispositif de commande maintient le courant d'induit en dessous d'une valeur limite. Lorsque la valeur limite est atteinte, les impulsions de gachette sont retardées, entraînant une baisse de tension de sortie du pont redresseur. Cette valeur limite de courant est déterminée en fonction du couple maximal souhaité et de l'intensité maximale autorisée dans le moteur.

Les principales méthodes de mesure de courant sont :

- les transformateurs de courant alternatif ;
- les capteurs à effet Hall ;
- les résistances en série avec l'armature du moteur.

Ces dernières sont peu employées, car elles empêchent l'isolation galvanique entre le circuit de commande et celui de puissance.

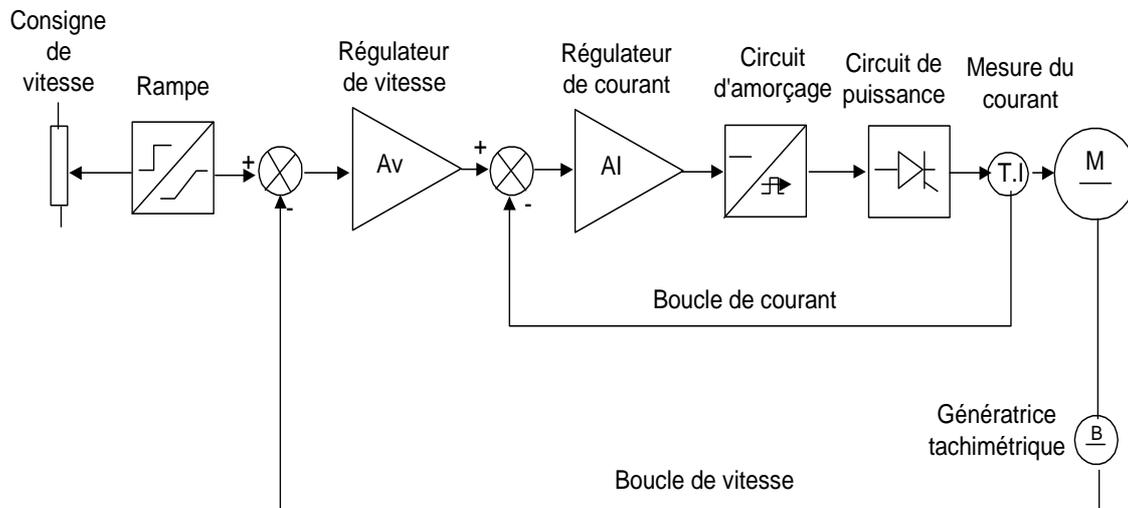


Fig.20 Asservissement avec limitation de courant

5- Variateur de vitesse industriel pour moteur c-c

a) Principe général

Les variateurs de vitesse électronique sont alimentés sous une tension fixe à partir du réseau alternatif et fournissent au moteur une tension continue variable. Un pont de diodes ou un pont à thyristors, en général monophasé, permet l'alimentation du circuit d'excitation.

Le circuit de puissance est un redresseur 6 thyristor pour un entraînement en 4 quadrants.

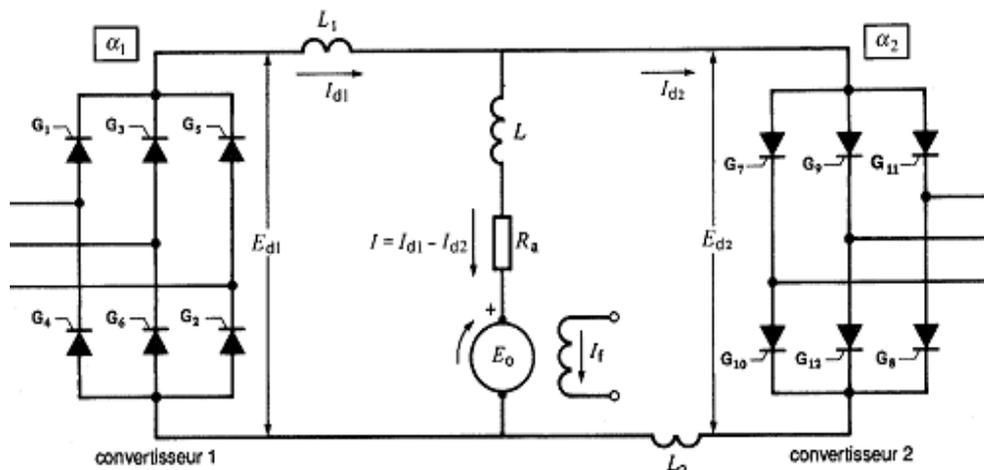


Fig.21

La tension à délivrer devant être variable, ce redresseur doit être du type contrôlé, c'est-à-dire comporter des composants de puissance dont la conduction peut être commandée (thyristors). La variation de la tension de sortie est obtenue en limitant plus ou moins le temps de conduction pendant chaque demi-période. Plus l'amorçage du thyristor est retardé par rapport au zéro de la demi-période, plus la valeur moyenne de la tension est réduite et, de ce fait, la vitesse du moteur plus faible (rappelons que l'extinction d'un thyristor intervient automatiquement quand le courant passe par zéro).

b) Inversion du sens de marche et freinage par récupération

Pour inverser le sens de marche, il faut inverser la tension d'induit. Ce peut être réalisé à l'aide de contacteurs (cette solution est maintenant obsolète) ou en statique par inversion de la polarité de sortie du variateur de vitesse ou de la polarité du courant d'excitation.

Cette dernière solution est peu usitée en raison de la constante de temps de l'inducteur.

Lorsqu'un freinage contrôlé est désiré ou que la nature de la charge l'impose (couple entraînant), il faut renvoyer l'énergie au réseau. Pendant le freinage, le variateur fonctionne en onduleur, en d'autres termes la puissance qui transite est négative.

Les variateurs capables d'effectuer ces deux fonctionnements (inversion et freinage par récupération d'énergie) sont dotés de deux ponts connectés en antiparallèle

Chacun de ces ponts permet d'inverser la tension et le courant ainsi que le signe de l'énergie qui circule entre le réseau et la charge.

c) Modes de fonctionnement possibles

Fonctionnement dit à « couple constant »

À excitation constante, la vitesse du moteur est fonction de la tension appliquée à l'induit du moteur. La variation de vitesse est possible depuis l'arrêt jusqu'à la tension nominale du moteur qui est choisie en fonction de la tension alternative d'alimentation.

Le couple moteur est proportionnel au courant d'induit et le couple nominal de la machine peut être obtenu de manière continue à toutes les vitesses.

Fonctionnement dit à « puissance constante »

Lorsque la machine est alimentée sous sa tension nominale, il est encore possible d'augmenter sa vitesse en réduisant le courant d'excitation. Le variateur de vitesse doit dans ce cas comporter un pont redresseur contrôlé alimentant le circuit d'excitation. La tension d'induit reste alors fixe et égale à la tension nominale et le courant d'excitation est ajusté pour obtenir la vitesse souhaitée.

d) Diagramme de fonctionnement

Les différentes possibilités de fonctionnement d'un entraînement alimenté par un variateur à thyristors peuvent être expliquées à l'aide d'un diagramme couple(M)-vitesse(n): (diagramme de fonctionnement).

Fonctionnement en régime à 1 quadrant

Le pont travaille en redresseur et le fonctionnement en régime moteur est possible soit dans le sens de rotation horaire (1er quadrant) ou antihoraire (3e quadrant).

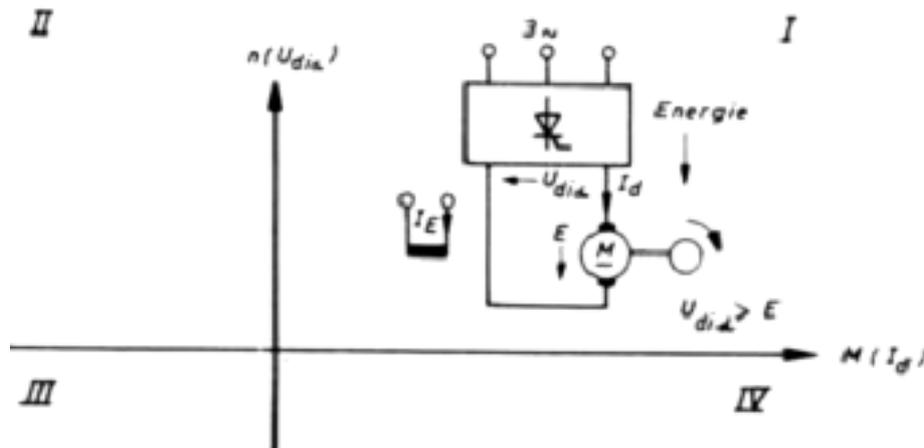


Fig.22

Fonctionnement en régime à 2 quadrants

Le pont travaille en redresseur et en onduleur. Le fonctionnement en régime moteur est possible dans le sens horaire et en régime générateur dans le sens antihoraire (1er et 4e quadrant)

Ou en régime moteur dans le sens antihoraire et générateur dans le sens horaire (2e et 3e quadrant).

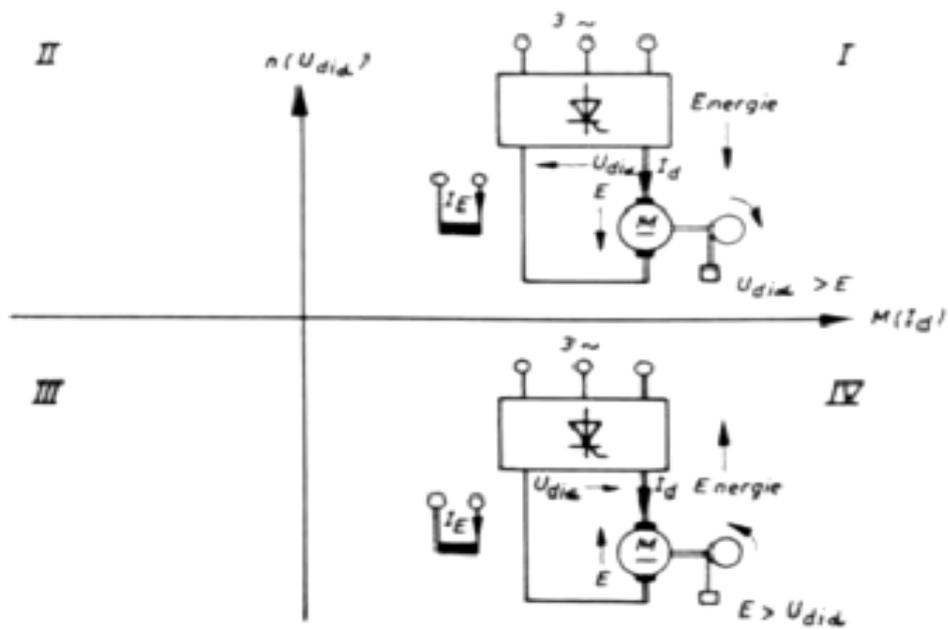


Fig.23

Fonctionnement en régime à 4 quadrants

Le pont travaille en redresseur et en onduleur, le fonctionnement en moteur et générateur étant possible dans les deux sens de rotation.

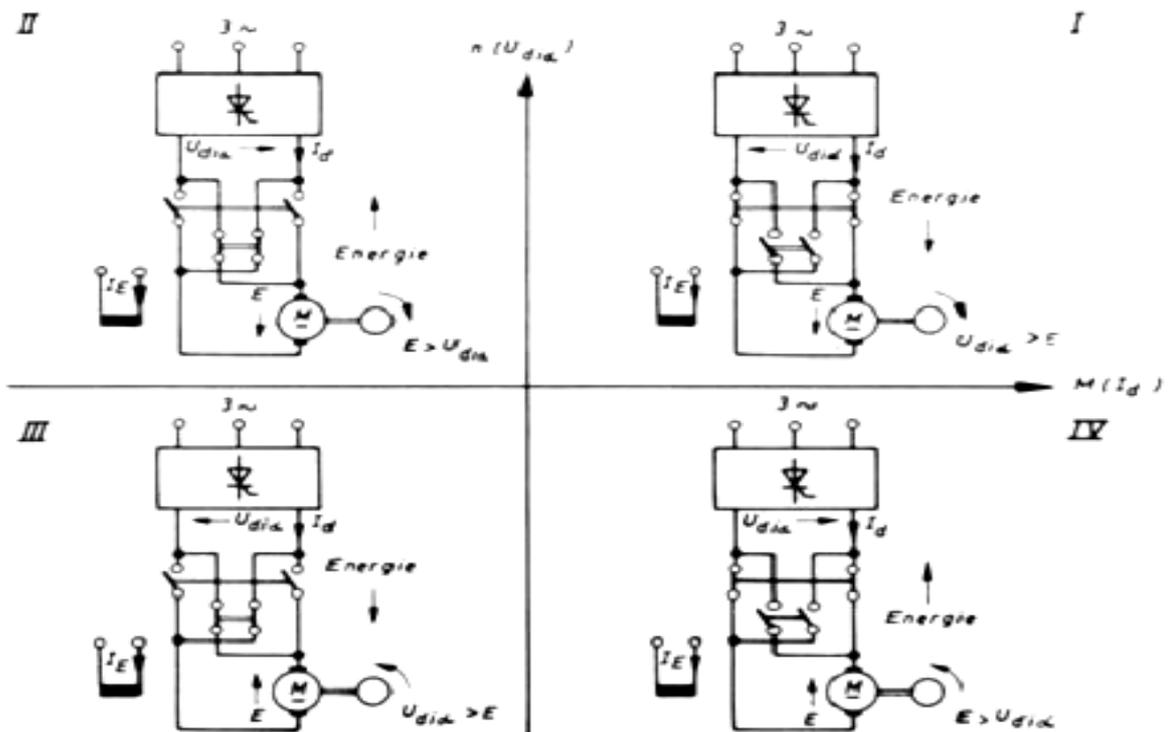


Fig.24

La figure suivante montre un couplage avec courant de circulation, à l'aide de deux ponts à thyristors et des inductances de circulation de courant.

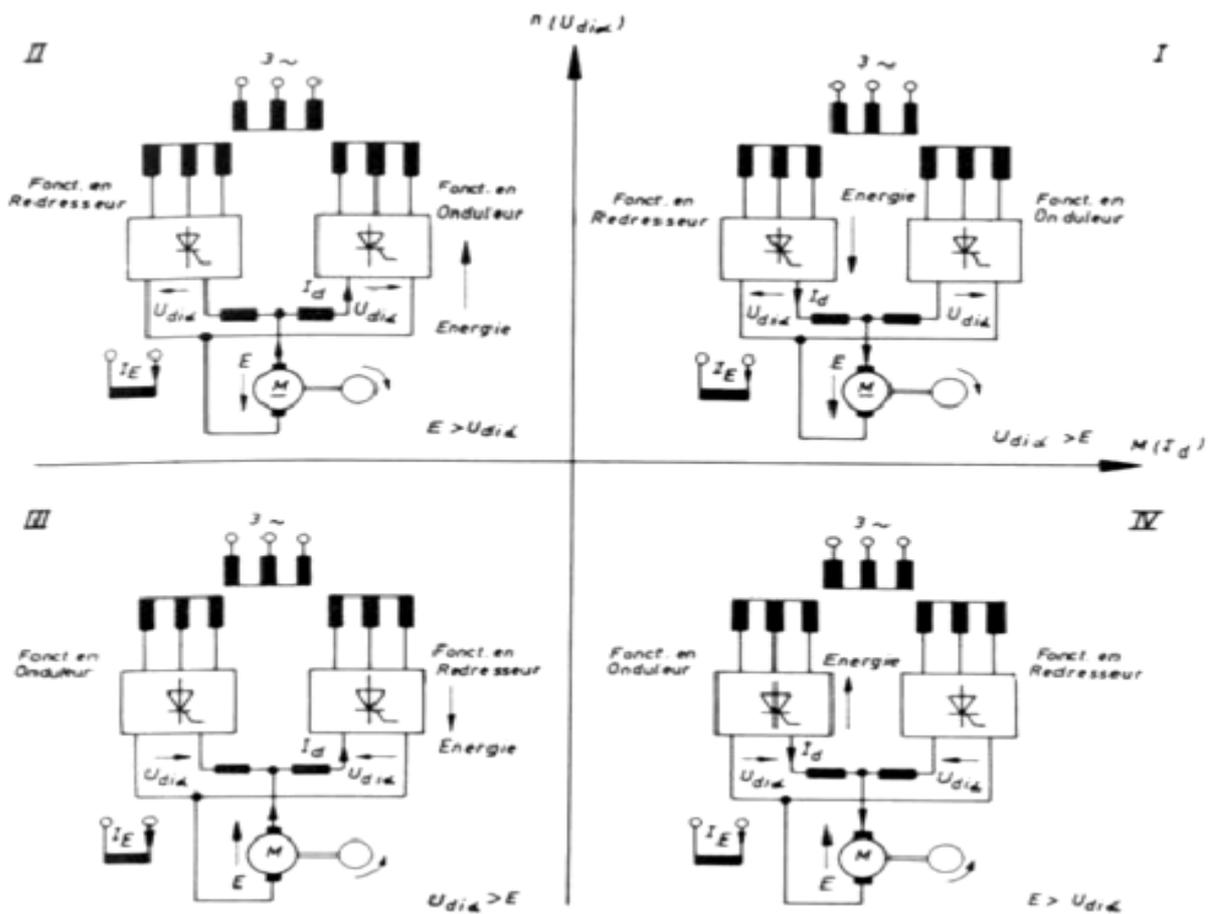


Fig.25

La puissance, pour un courant d'induit donné, est donc constante sur toute la gamme de vitesse, mais la vitesse maximale est limitée par deux paramètres :

- la limite mécanique liée à l'induit et en particulier la force centrifuge maximale pouvant être supportée par le collecteur,
- les possibilités de commutation de la machine, en général plus restrictives.

Le fabricant du moteur doit donc être sollicité pour bien choisir un moteur, en particulier en fonction de la gamme de vitesse à puissance constante.

e) Rôle de la diode de roue libre

Dans le cas du pont tout thyristors il ne peut y avoir de conduction pendant les phases négative de la tension du réseau. Il y a interdiction de la marche en récupération, mais les commutations s'effectuent, non plus entre thyristors, mais entre thyristor et diode.

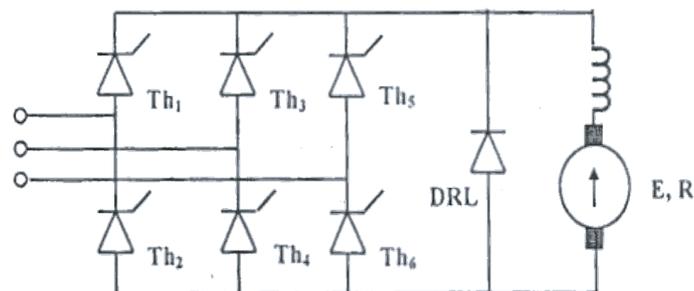


Fig.26

La tension de sortie, à valeur égale d'angle de retard α , sera donc plus élevée avec diode que sans diode, du fait de la suppression des tensions négatives. On utilisera alors des ponts semi-contrôlés, constitués de deux groupes en série, l'un de trois diodes, l'autre de trois thyristors.

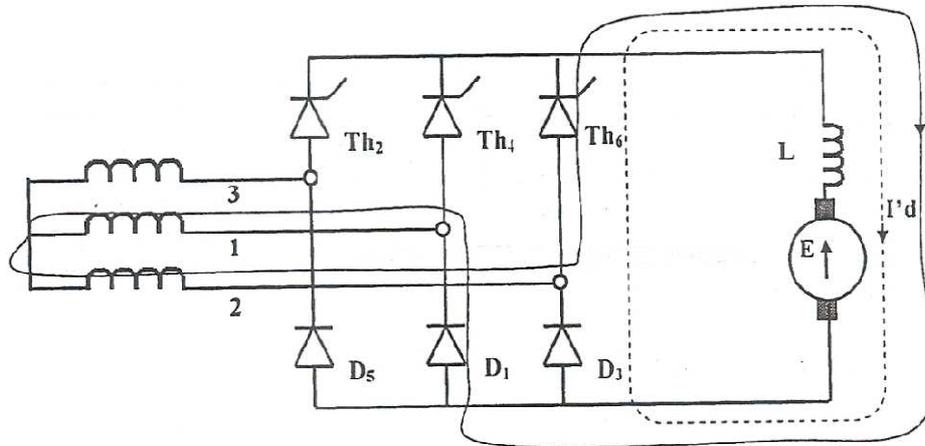


Fig.27 Variateur à pont mixte en un seul quadrant

En absence de DRL. I_d circule de la phase 1 vers la phase 2 par D_1 - Th_6 , dans les intervalles de commutation $\frac{2\pi}{3} - \alpha$ et si $E < V$

Pendant la durée de décharge de l'énergie emmagasinée par la self :

- Le courant s'annule dans les phases 1 et 2, le transformateur ne débite plus.
- Le courant de décharge I_d circule alors par T_6 et D_3 (traits pointillés).

Ce fonctionnement maintient la conduction de T_6 .

En plaçant nous avons $\Delta U_{DRL} < \Delta U_{T_6} + \Delta U_{D_3}$

I_D s'établit à travers DRL \Leftrightarrow le pont se trouve « hors circuit »

Il est ainsi possible d'augmenter l'angle de retard d'amorçage et de le porter jusqu'à une valeur de 170° .

En l'absence de roue libre, le thyristor conducteur reste amorcé jusqu'au moment du déblocage du thyristor de la phase suivante.

Dans le cas de non-réamorçage de ce dernier ou d'une coupure de réseau, le thyristor préalablement conducteur, continue de conduire.

En cas réapparition rapide du réseau et si I_d reste supérieur à I_H (courant de maintien), il peut en résulter une violente surintensité.

6- Choix de l'ensemble convertisseur moteur selon le réseau d'alimentation et la puissance mise en jeu

a) Alimentation des convertisseurs

- Le convertisseur peut être alimenté directement par le réseau de distribution, soit alors :
 - monophasé 220 V
 - monophasé 380 V
 - triphasé 3 x 380 V

- Le convertisseur doit être alimenté à partir du réseau alternatif par l'intermédiaire d'un transformateur.

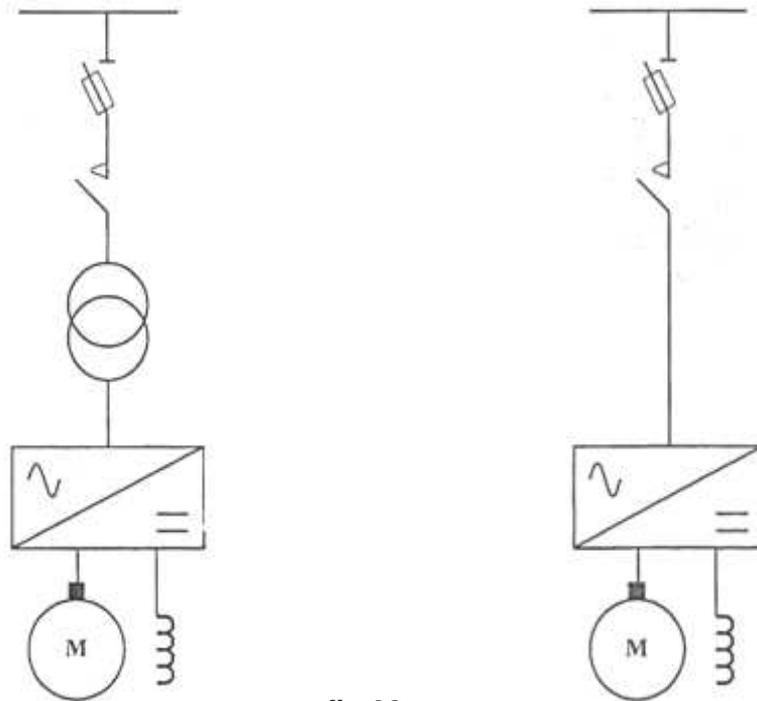


fig.28

L'alimentation directe par le réseau alternatif constitue une très grosse part du marché de la variation de vitesse.

Quelles sont les données à prendre en considération

- La tension du réseau et surtout ses limites de variation, en principe $\pm 10\%$ suivant la norme du constructeur.
- Les butées maxi et mini de retard d'amorçage :
En pratique : 40° mini en monophasé :
 $\alpha < 150^\circ$ maxi monophasé ou triphasé, sans DRL
- La détermination de la tension moyenne à vide U_{di0}
- En monophasé 220 V : $U_{di0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{eff}$ avec $U_{eff} = 220 \pm 10\%$

$$\text{Soit : } U_{di0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 220 \times 0,9 = 180V$$

En tenant compte de la butée d'amorçage ($\alpha = 30^\circ$) :

$$U_{di0pratique} = 180 \cos 30^\circ = 156V$$

- En monophasé 380 V :

$$U_{di0pratique} = 260V$$

- En triphasé 3 x 380 V : $U_{di0} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} 220 = 512V$

En tenant compte de la variation du secteur: $U_{di0} = 460 V$.

Nous constatons que la tension du moteur est liée à la tension du réseau et le type de convertisseur. Les constructeurs ont normalisé les tensions d'induit. D'une façon générale :

- Réseau monophasé 220 V : $U_{\text{induit}} = 160 \text{ V}$
- Réseau monophasé 380 V : $U_{\text{induit}} = 260 \text{ V}$
- Réseau triphasé 220 V : $U_{\text{induit}} = 440 \text{ V}$

Dans le cas où la tension du moteur n'est pas compatible avec ces trois valeurs, il est nécessaire d'insérer un transformateur en général abaisseur et d'effectuer la détermination des différentes valeurs. Le cheminement sera en général inverse de celui effectué ci-dessus. La tension secondaire du transformateur restant l'inconnue.

b) Choix de l'ensemble convertisseur-moteur selon la puissance de la charge

L'examen des catalogues constructeurs, dont un extrait se trouve dans les pages suivantes, conduit à la tendance suivante :

P : de 0,5 à 15 KW : alimentation par convertisseur monophasé ou triphasé

P : de 15 à 500 KW : alimentation par convertisseur triphasé

Sauf spécifications technologique particulières, on se limitera aux environs de 5 KW pour les alimentations par convertisseur monophasé

Vitesse nominales proposées par les constructeurs : 3600 – 3000 – 2250 – 1800 – 1500 – 1000 – 800 – 500 tr/min