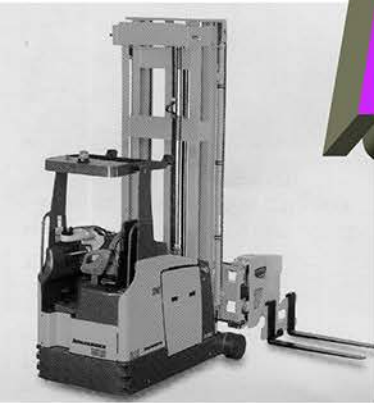




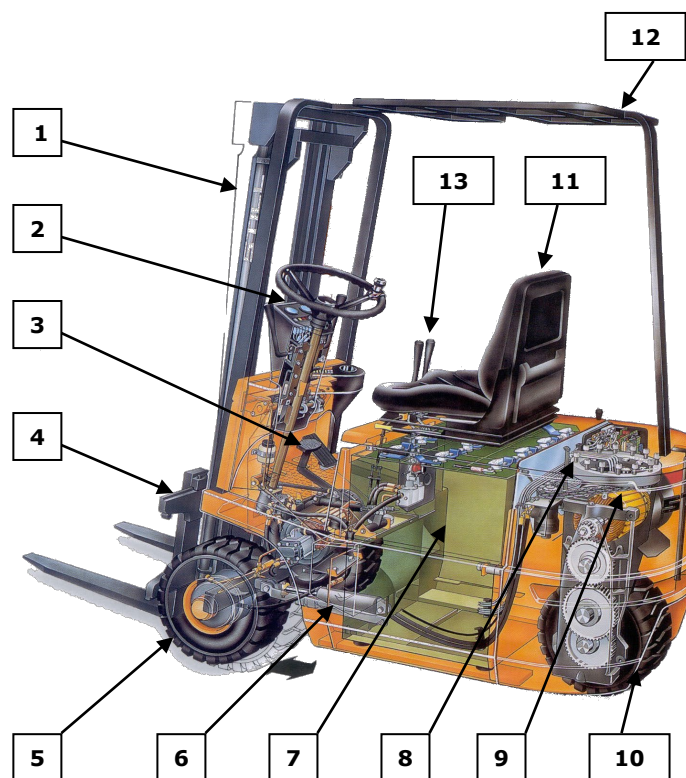
les chariots éleveurs électriques



SOMMAIRE

- I Agencement d'un chariot élévateur**
- II Constitution**
 - II- 1 La batterie**
 - II- 2 Le fonctionnement du circuit électrique de translation**
 - II- 21 Fonction globale
 - II- 3 Le fonctionnement du circuit électrique d'équipement**
 - II- 31 Fonction globale
 - II- 4 Les moteurs électriques**
 - II- 41 Moteur à courant continu
 - Organisation
 - Fonctionnement
 - Couple électromagnétique
 - Equations électriques
 - Illustration du fonctionnement
 - Classement des moteurs
 - Moteur série
 - Moteur shunt ou dérivation
 - Moteur compound
 - Moteur à aimant permanent
 - II- 42 Moteur à courant alternatif : moteur asynchrone triphasé
 - Organisation
 - Fonctionnement
 - Création d'un champ tournant
 - Production du couple moteur
 - Glissement
 - Couplage des enroulements du stator
 - Inversion du sens de rotation
 - Equations électriques et mécaniques
 - II- 5 Les variateurs**
 - II- 51 Moteurs à courant continu
 - Variation de vitesse par résistances
 - Variation de vitesse à hacheur
 - Eléments de structure d'un hacheur
 - Exemples appliqués à un hacheur
 - Choix technologiques
 - II- 52 Moteur asynchrone
 - Réglage de la vitesse
 - Action sur la fréquence
 - Variateur de vitesse $U/F = Cte$
 - Variateur de vitesse à commande vectorielle

I- AGENCEMENT D'UN CHARIOT ELEVATEUR

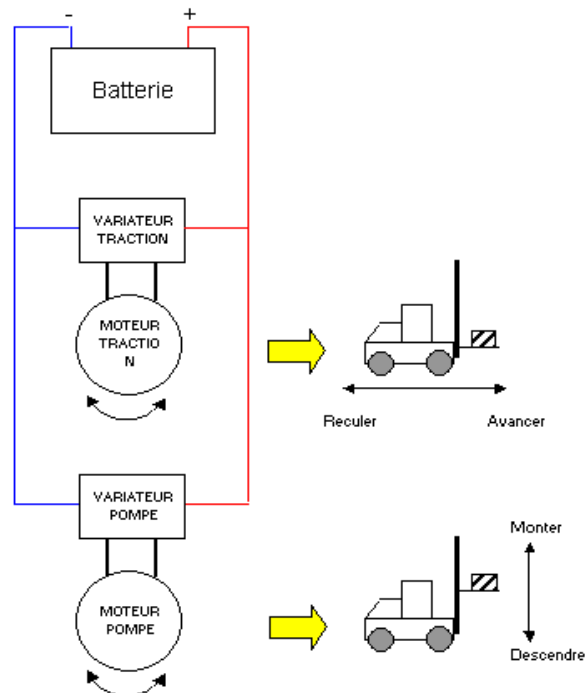


REP.	Désignation
1	Mât (échelle+ vérin+chaînes)
2	Display + volant
3	Commande de frein et d'accélérateur au pied
4	Fourches + tablier porte fourches
5	Essieu avant
6	Vérin d'inclinaison du mât
7	Batterie
8	Électrofrein + moteur de direction
9	Moteur de traction + réducteur
10	Roues ou essieu arrière
11	Poste de conduite
12	Protection cariste
13	Leviers de commandes hydrauliques (distributeur à commande manuelle)

II- CONSTITUTION

Les chariots élévateurs sont constitués de 2 circuits électriques séparés, alimentés par la même batterie.

- un circuit électrique pour le déplacement
- un circuit électrique pour l'équipement.



Ces circuits électriques ont une particularité, en l'occurrence, l'absence de mise à la masse sur le chariot. En effet, elle se fait directement par des câbles reliés au négatif de la batterie

II- 1 La batterie

Selon les chariots, la tension batterie varie de 24 à 48 ou à 80 volts. Il s'agit d'un des composants essentiels du fonctionnement d'un chariot.

On trouve 2 types de batteries :

- batterie à plomb ouvert : des bouchons permettent le remplissage des éléments. Le niveau d'électrolyte doit être contrôlé tous les jours.
- batterie étanche : un gel remplace l'électrolyte, aucun complément possible.

Nota : à chaque chariot sa batterie, à chaque batterie son chargeur.

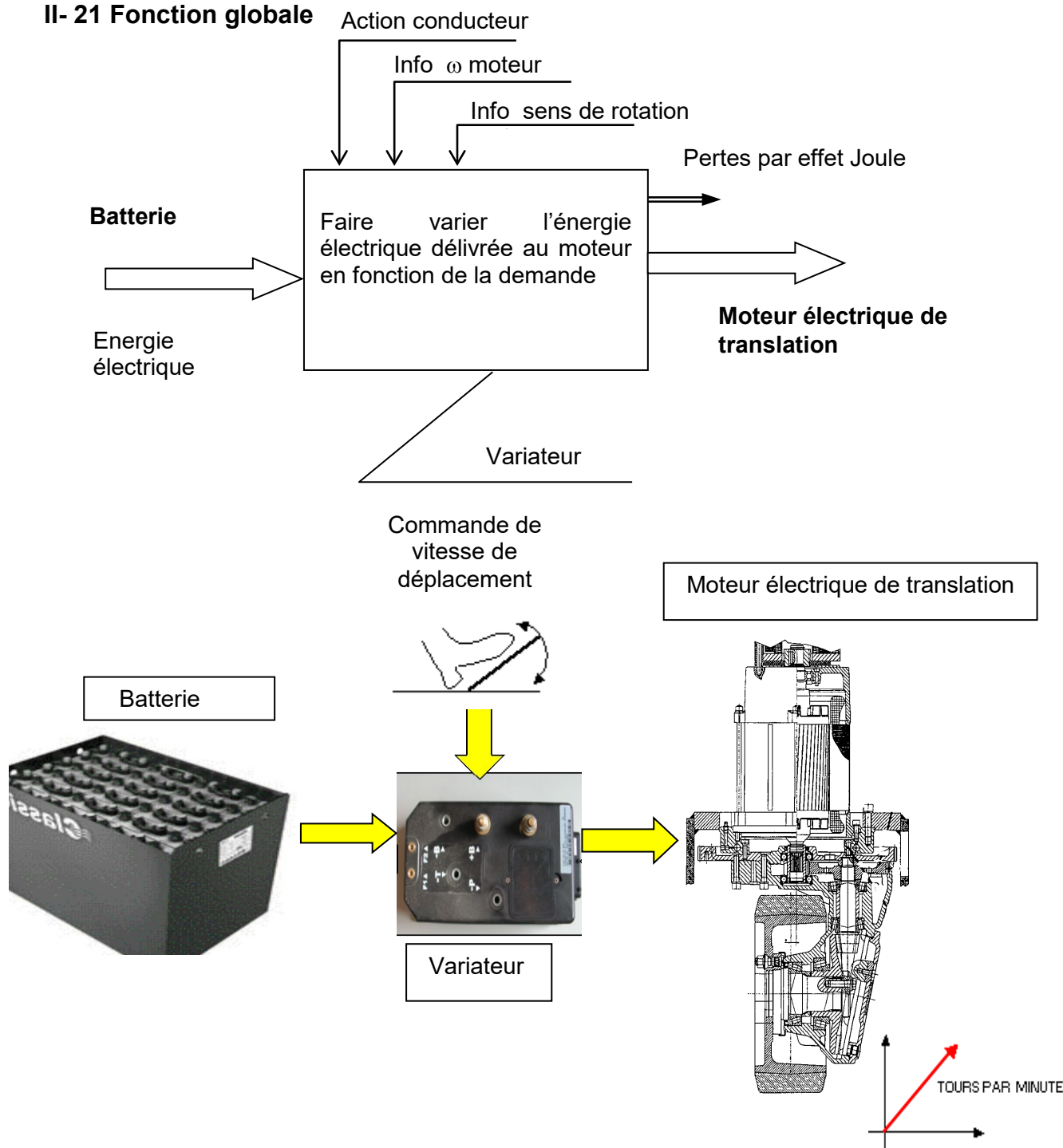
Tous les soirs, après leur journée de travail, les batteries doivent être mises en charge. Sur le tableau de bord des chariots, on trouve un indicateur de charge.

QUEL QUE SOIT LE CIRCUIT EN ACTION, LE CHAUFFEUR DOIT MAINTENIR SON PIED APPUYÉ SUR UNE PEDALE « DE PRESENCE » (pédale homme mort).

En cas de défaillance du chauffeur, cette pédale ne sera plus actionnée, tout mouvement de la machine cessera. (De plus en plus de pédales de présence sont remplacées par des contacts au niveau du siège, permettant ainsi d'avoir des chariots en double pédale AV/AR)

II- 2 Le fonctionnement du circuit électrique de translation

II- 21 Fonction globale



(Pour information, d'une manière générale afin d'obtenir une approche lente, la courbe d'accélération d'un chariot élévateur se caractérise par 2 pentes)

Une fois le contact mis et le pied appuyé sur la pédale d'homme mort, le chauffeur sélectionne un sens de déplacement.

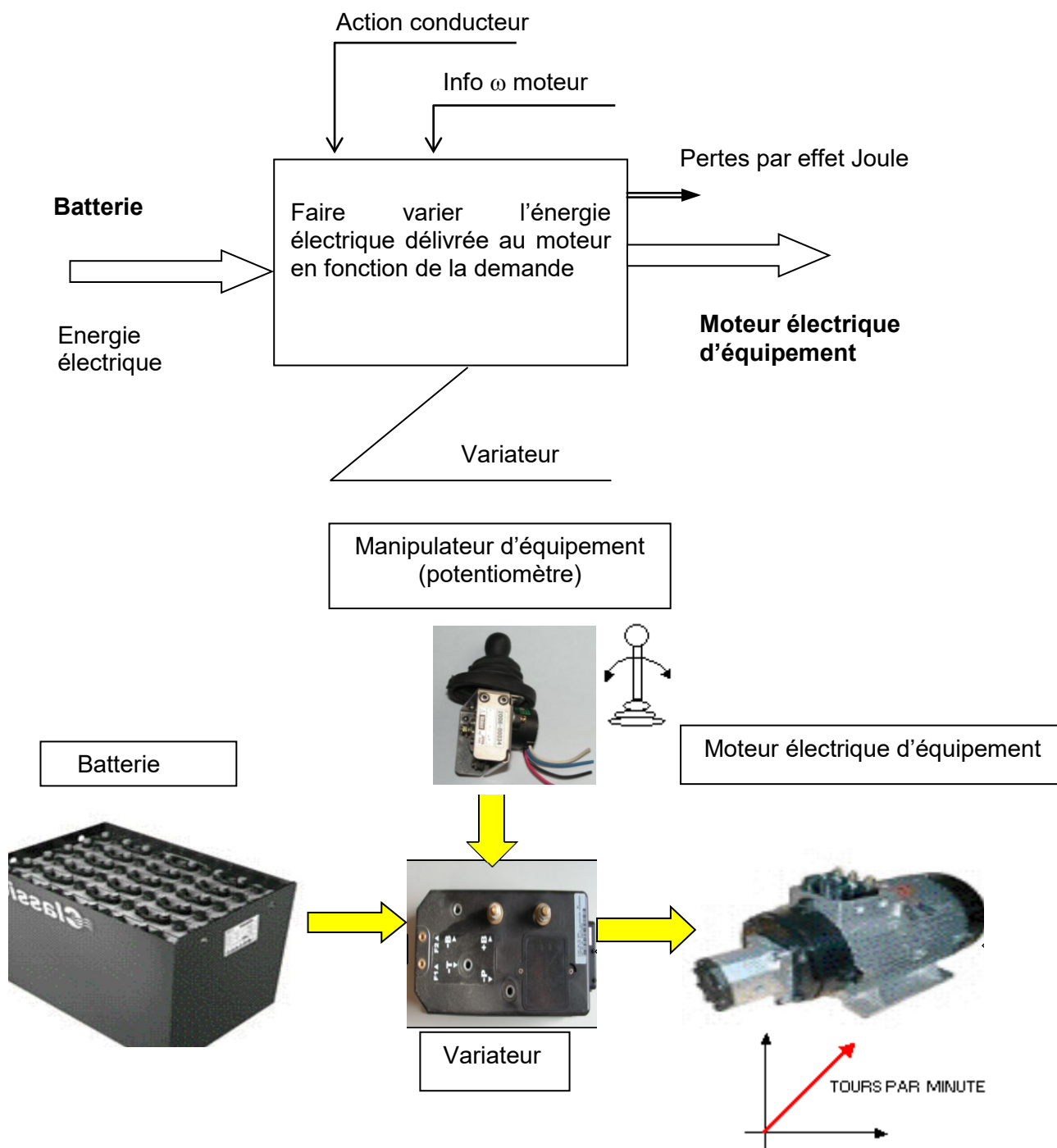
La commande de vitesse de déplacement est un potentiomètre qui délivre une tension différente en fonction de son inclinaison.

Le variateur reçoit l'information de la commande de sens de marche ainsi que celle de la commande de vitesse de déplacement. Il définit le sens de l'alimentation du moteur électrique par la batterie. Celui-ci comme son nom l'indique, fait varier l'alimentation du moteur, ce qui donnera une mise en rotation progressive du moteur.

En fonctionnement, cela se traduit par une souplesse de déplacement du chariot.
 Le moteur électrique est équipé soit d'un roulement instrumenté soit d'un capteur et une roue dentée, afin de renvoyer l'information de vitesse de rotation du moteur, au variateur.

II- 3 Le fonctionnement du circuit électrique d'équipement

II- 31 Fonction globale



Une fois le contact mis et le pied appuyé sur la pédale d'homme mort, le chauffeur actionne le levier de commande des équipements.

Ce levier contient un nombre de potentiomètres au moins égale au nombre de fonctions hydrauliques. (Parfois, pour des raisons de sécurité, les potentiomètres sont doublés)

Le principe de fonctionnement est le même que pour la translation, sauf que le moteur électrique ne tourne que dans un seul sens. Toutefois, sa vitesse varie selon l'inclinaison du levier.

Le levier (potentiomètre) délivre une tension variable à la carte de commande du variateur qui de son côté pilote les électrovannes du distributeur ainsi que le moteur de pompe via le circuit de puissance du variateur

Deux types de distributeurs peuvent être montés sur les chariots :

- distributeur proportionnel : la tension délivrée par le levier définit le déplacement du tiroir de distributeur, limitant le débit pouvant passer au travers de celui-ci.
- distributeur tout ou rien : le tiroir est déplacé au maximum.

La vitesse de rotation du moteur électrique détermine le débit de la pompe hydraulique, elle varie selon l'inclinaison du levier et le nombre de fonctions hydrauliques commandées. L'information de vitesse est renvoyée de la même façon que celle du moteur électrique de translation.

(Le moteur de pompe ne démarre jamais à une vitesse inférieure à la vitesse minimum inscrite sur le corps de la pompe de manière à permettre l'autolubrification de cette dernière)

II- 4 Les moteurs électriques

Afin de satisfaire au fonctionnement d'un chariot élévateur, le moteur électrique de traction doit répondre aux critères suivants :

- tourner et freiner dans les deux sens de rotation ;
- posséder un couple important à bas régime et doté d'un bon rendement.

Principalement, deux types de moteurs électriques équipent les chariots élévateurs :

- le moteur à courant continu ;
- le moteur à courant alternatif.

Ils sont accouplés :

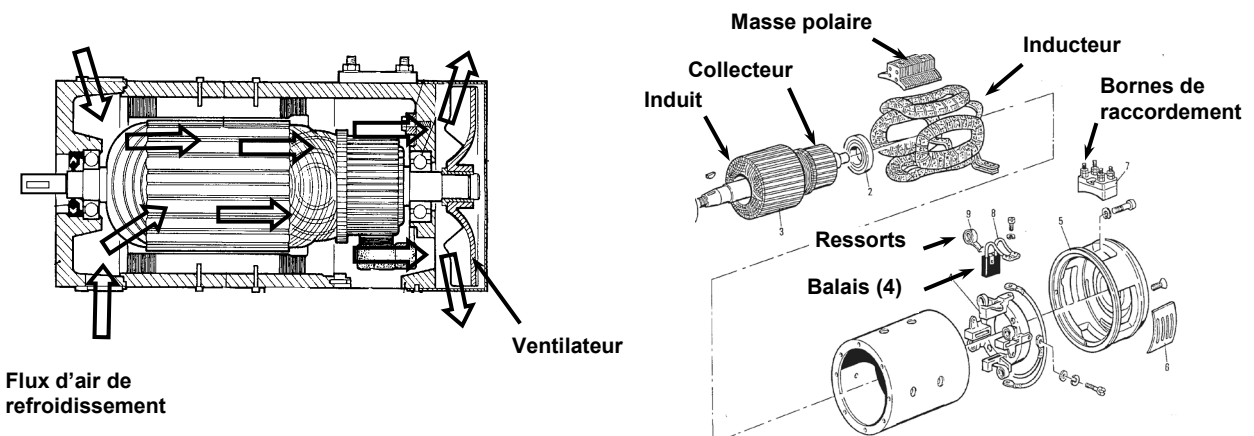
- à une pompe hydraulique (équipement, direction)
- à une tourelle pour les chariots rétractables à 3 roues (translation)
- pour les chariots frontaux, cela dépend du constructeur, un pont moteur ou un moteur par roue avant.
- à un pont moteur pour les chariots 4 roues (translation)

II- 41 Moteur à courant continu

Organisation :

Elle s'articule autour des éléments suivants :

- les pôles inducteurs composés par les masses polaires et les enroulements placés sur le stator ou culasse (partie fixe) ;
- l'induit composé par l'arbre, l'empilement de tôles dont les encoches permettent de recevoir les conducteurs actifs des différents bobinages et le collecteur. Cet ensemble compose le rotor (partie tournante) qui assure l'entraînement du ventilateur ;
- les éléments de commutation composés par les balais et les bornes de connexion ;
- les flasques qui assurent le maintien et le guidage en rotation de l'induit.



Fonctionnement :

Couple électromagnétique T_{em}

L'interaction du champ magnétique H_s de direction fixe produit par les pôles inducteurs du stator et du champ magnétique H_r mobile produit par l'induit (rotor) crée un couple électromagnétique.

- H_r dépend de l'intensité du courant I circulant dans l'induit ;
- H_s dépend du flux Φ produit par les inducteurs.

Le couple électromagnétique est le moment résultant des forces de Laplace agissant sur l'induit. Il impose le sens de rotation du moteur. L'inversion du courant dans l'induit ou dans les inducteurs permet d'inverser le sens de rotation.

Equations électriques

$$U_{induit} = E + RI$$

$$E = \frac{p \times N}{a} \times n \times \Phi$$

$$E = K \cdot \Omega \quad (\text{à flux constant}) \quad \Omega = 2\pi n$$

$$n = \frac{U - RI}{\frac{p}{a} \times N \times \Phi}$$

$$T_{em} = K\Phi I = K_t I \quad (\text{à flux constant})$$

R = résistance de l'induit

E = fém de l'induit

Φ = flux inducteur

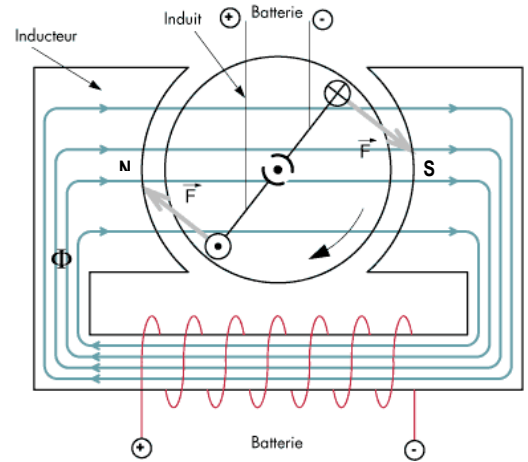
I = intensité du courant dans l'induit

N = nombre de conducteurs dans l'induit

n = vitesse de rotation

p = nombre de paires de pôles

a = nombre de voies d'enroulements



Rendement des moteurs

Il est dépendant des différentes pertes que subit la machine. Elles sont classées en plusieurs catégories :

- pertes mécaniques : frottement dans les paliers (bagues ou roulements), frottement des balais sur les lames du collecteur, brassage de l'air dans l'entrefer dû à la ventilation ;
- pertes dans le fer : elles se décomposent en pertes par hystérésis et par les courants de Foucault dans le noyau et les dents (encoches) de l'induit ;
- pertes Joule : échauffement provoqué par la circulation du courant dans l'induit. Cet échauffement fait augmenter la résistance des enroulements imbriqués dans le noyau de l'induit ;
- pertes dans l'inducteur : action de la circulation du courant d'excitation sur la température des bobinages et donc de la résistance. Pour un moteur série, le courant d'excitation et le courant dans l'induit est identique. Son intensité est fonction de la charge (masse totale à déplacer) que doit supporter le moteur.

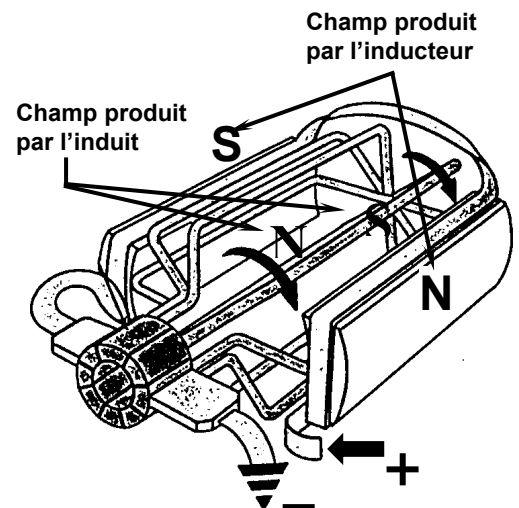
Illustration du fonctionnement

Le courant circulant dans le bobinage de l'inducteur produit un champ magnétique H_s , les masses polaires forment les extrémités d'un aimant.

Ce courant traverse également une des boucles de l'induit, un champ magnétique se forme autour du conducteur de la boucle.

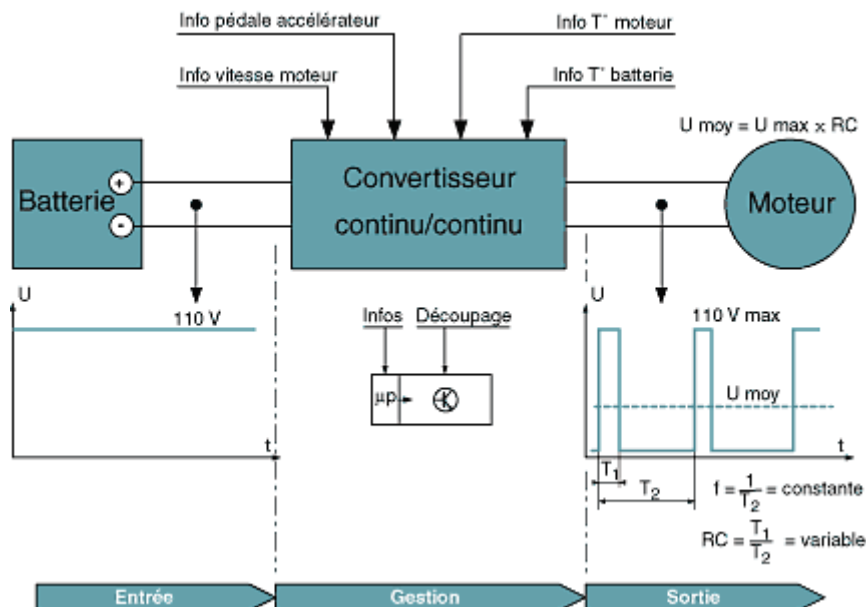
Le collecteur et la position des balais sélectionnent une boucle afin de placer le champ dans une zone bien déterminée.

La rotation du collecteur permet le changement de boucle afin d'assurer la continuité dans la rotation du moteur.



Pour obtenir un fonctionnement souple du moteur, un convertisseur électronique appelé « hacheur » permet d'obtenir une tension de valeur moyenne variable aux bornes de l'induit du moteur et, par conséquent, de faire varier la vitesse de rotation. La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'induit est égale à :

$$\frac{E \times t_1}{T} \quad \text{où} \quad \frac{t_1}{T} \quad \text{représente le rapport cyclique du signal de commande}$$



Classement des moteurs selon le mode d'excitation

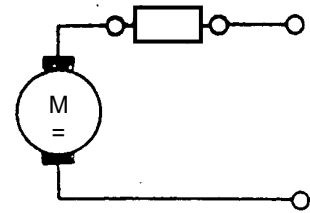
Moteur série :

Les inducteurs sont reliés en série avec l'induit. Compte tenu que le courant d'excitation est égal au courant de l'induit et varie en même que lui, le flux magnétique dépend de la charge rapportée sur l'arbre de l'induit (rotor).

Un tel type de moteur fournit un couple de démarrage élevé, le courant peut atteindre des valeurs dangereuses pour le moteur. Indépendant de la tension d'induit, le couple est égal au carré de l'intensité si le moteur n'est pas saturé.

Il ne doit jamais fonctionner à vide.

Il est utilisé pour la traction des chariots, moteur de pompe hydraulique d'élévation.



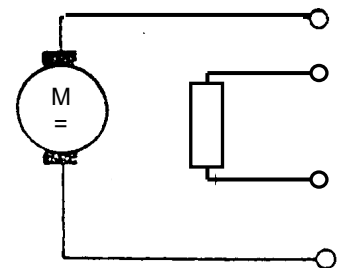
Moteur Shunt ou dérivation :

L'induit et l'inducteur sont alimentés séparément.

Pour un régime à flux constant :

- le couple du moteur est proportionnel à l'intensité du courant absorbé par l'induit ;
- la vitesse de rotation est une fonction linéaire décroissante du courant absorbé.

La commande nécessite qu'un courant de faible intensité comparativement à un moteur série.



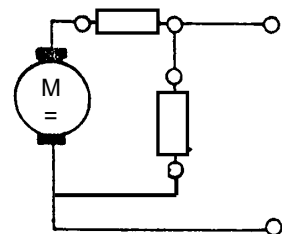
Moteur compound :

C'est l'association d'un inducteur série et d'un inducteur en dérivation.

Le couple de démarrage est relativement grand. Les variations de vitesse sont peut marquées.

Ce moteur trouve son application dans les groupes motopompe à faible régime.

Il est utilisé pour les moteurs de pompe hydraulique d'élévation.

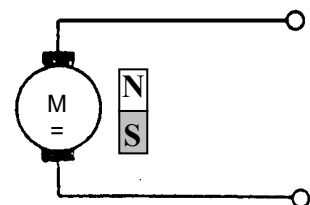


Moteur à aimant permanent :

L'inducteur est constitué d'un aimant permanent.

Il est utilisé pour des systèmes dont les moteurs demandent une puissance moins importante :

- pompe hydraulique de direction ;
- pompe de levage de faible puissance.

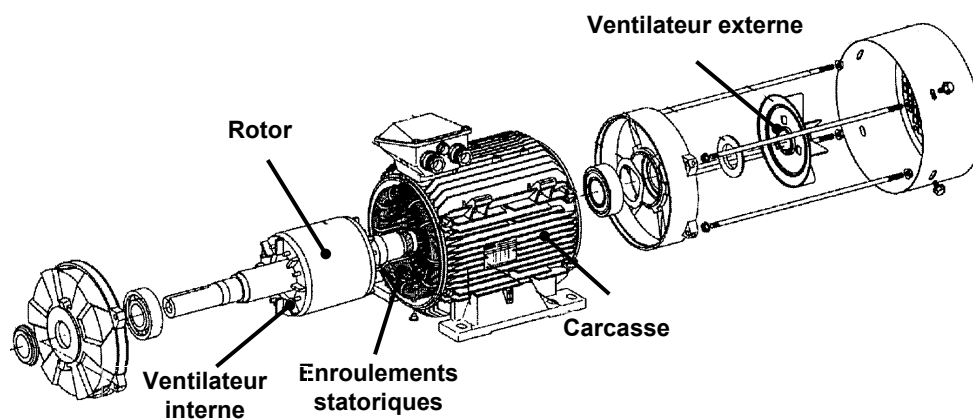


II- 42 Moteur à courant alternatif : moteur asynchrone triphasé

Organisation :

Elle s'articule autour des éléments suivants :

- le circuit magnétique statorique comportant trois bobinages fixes alimentés par une source de tension alternative (stator ou partie fixe) ;
- le circuit magnétique rotorique comportant des encoches dans lesquelles sont logés des conducteurs. Cet ensemble compose le rotor (partie tournante) qui assure l'entraînement des ventilateurs ;
- la boîte à bornes ;
- les flasques qui assurent le maintien et le guidage en rotation du rotor ;



De plus en plus, le moteur asynchrone remplace le moteur à courant continu :

- constitution plus simple donc coût plus faible ;
- pas de balais donc moins d'usure et durée de vie plus longue ;
- moins d'échauffement ;
- meilleur rendement ;
- encombrement réduit ;
- entretien limité.

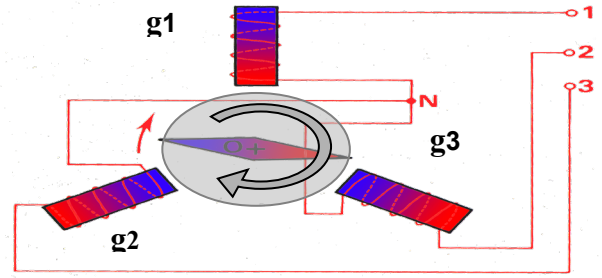
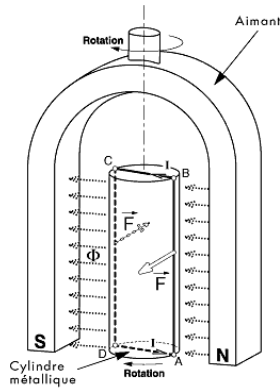
Fonctionnement :

Création d'un champ tournant :

Les trois bobines statoriques, alimentées par un système de tensions triphasées, créent un champ tournant à une vitesse appelée vitesse de synchronisme.

Celle-ci dépend de deux paramètres :

- la fréquence de la source d'alimentation ;
- le nombre de paires de pôles statoriques par phase.
- $f = pn$ f en hertz (Hz) ; n en tours par seconde ($tr.s^{-1}$)



Production du couple moteur :

Les conducteurs encastrés dans les encoches du rotor sont soumis au champ tournant produit par les enroulement statoriques. Selon la loi de Lenz, chacun des conducteurs est le siège d'une fém induite.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Dans le cas d'un rotor à cage, les conducteurs rotoriques sont en court-circuit. Le courant induit dans chacun des conducteurs rotoriques crée un flux rotorique.

L'interaction entre le champ statorique et le champ rotorique produit le couple moteur qui provoque la rotation du rotor.

Glissement :

Pour que le rotor soit soumis à une variation du flux statorique, il doit tourner à une vitesse différente de celle du champ tournant. Le rotor ne tournant pas à la vitesse de synchronisme, cela sous-tend la dénomination de moteur asynchrone.

D'où le glissement g d'un moteur asynchrone :

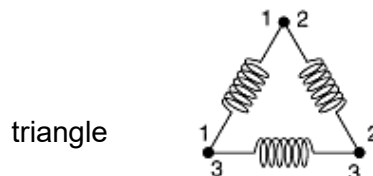
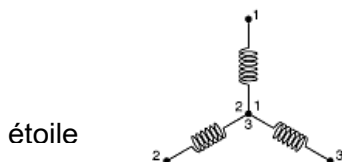
$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad g \text{ en } \%$$

$n =$ vitesse de rotation du rotor
 $n_s =$ vitesse de rotation du champ tournant

Couplage du stator :

Il existe deux possibilités de couplage des enroulements statoriques :

- étoile : les trois enroulements ont une liaison commune ;
- triangle : chaque enroulement est alimenté entre deux phases.



Inversion du sens de rotation :

L'inversion du sens de rotation du champ tournant statorique provoque l'inversion du sens de rotation du rotor.

Pour obtenir cet effet, il suffit d'inverser deux phases d'alimentation du moteur.

Equations électriques et mécaniques :

- Puissance utile mécanique P_u : puissance disponible sur l'arbre moteur ;
- Puissance absorbée P_a : puissance électrique absorbée par le moteur pour obtenir la rotation du rotor ;
- Rendement η : rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée ;
- Vitesse angulaire Ω_s du champ tournant :

$$P_u = T_u \Omega \quad \begin{array}{l} P_u \text{ en watts (W)} \\ T_u \text{ en mètres} \cdot \text{newtons (N.m)} \\ \Omega = 2\pi n \end{array}$$

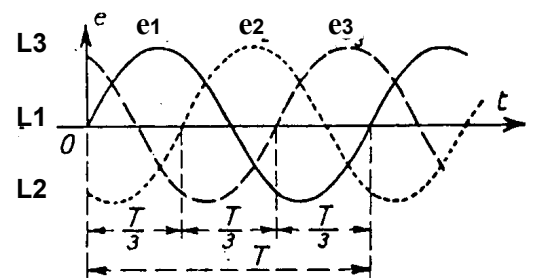
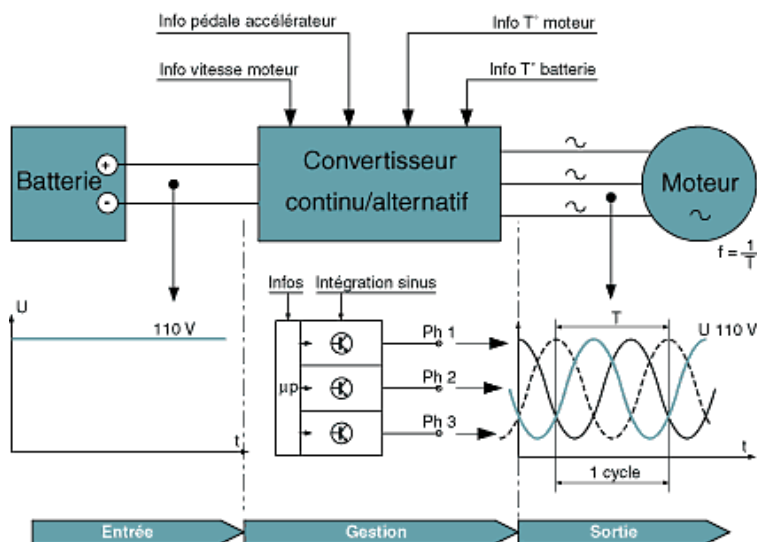
$$P_a = UI \sqrt{3} \cos \varphi$$

U : tension efficace entre deux phases de l'alimentation du stator ;
 I : valeur efficace de l'intensité dans une phase ;
 $\cos \varphi$: facteur de puissance du moteur.

$$\eta = P_u / P_a$$

$$\Omega_s = 2\pi \frac{f}{p}$$

Pour fonctionner, le moteur asynchrone ne peut pas utiliser directement le courant continu de la batterie. Un système de conversion doit transformer le courant continu en courant alternatif.



Tensions alternatives triphasées
 Les alternances sont décalées d'un tiers de période

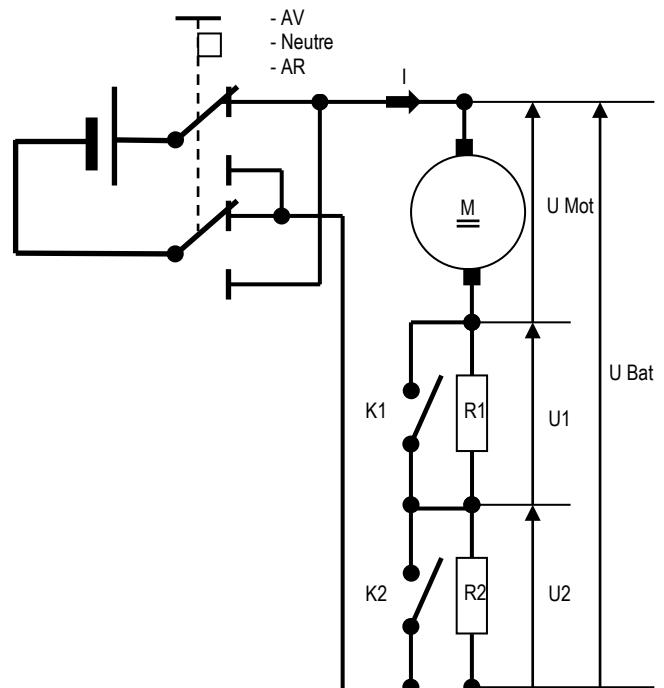
II- 5 Les variateurs de vitesse

II- 51 Moteur à courant continu

Variation de vitesse par résistances

- Résistances en série, mises en circuit et/ou hors circuit par l'action des contacteurs K1 et K2, qui agissent sur l'intensité du courant dans le moteur et, en conséquence, sur la vitesse de rotation pour une charge à entraîner donnée ;
- Pertes par effet joules ;
- Pas de variation continue de la vitesse de rotation du moteur qui dépend de la position de K1 et K2. Dans le cas du schéma, la gamme de variation correspond à quatre vitesses de rotation possibles :

$K1 \text{ et } K2 = 0 ; I_{\text{mini}}$
 $K1 = 1 \text{ et } K2 = 0 ; I_A$
 $K1 = 0 \text{ et } K2 = 1 ; I_B$
 $K1 = 1 \text{ et } K2 = 1 ; I_{\text{max}}$



Variation de vitesse à hacheur

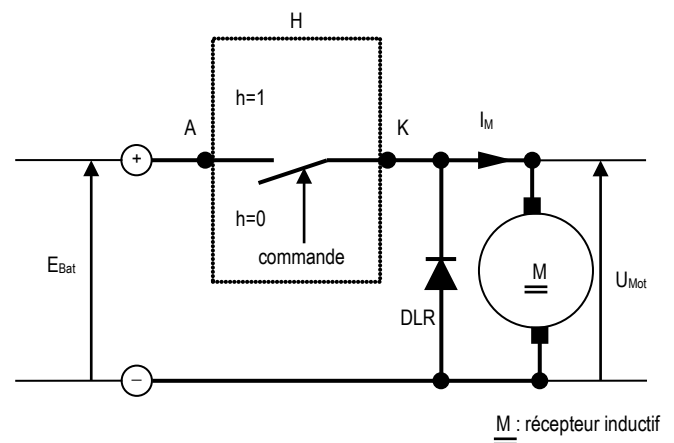
Un hacheur est convertisseur statique qui, à partir d'une source continue constante (batterie), permet d'alimenter le moteur avec une tension continue réglable.

Principe du hacheur

L'interrupteur électronique H est commandé par un signal en forme de créneaux.

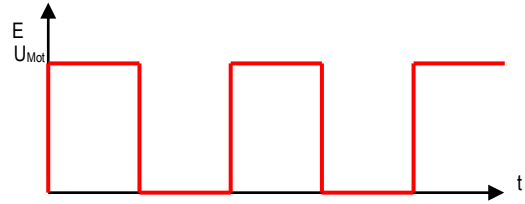
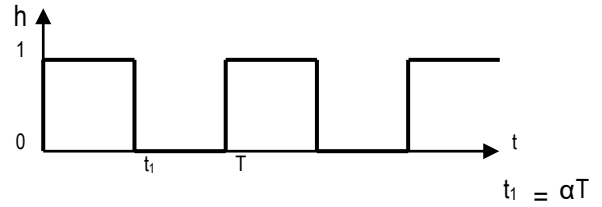
Le courant I_M circule de A vers K.

Le hacheur est un interrupteur unidirectionnel qui fonctionne à des fréquences de plusieurs dizaines de KHz.

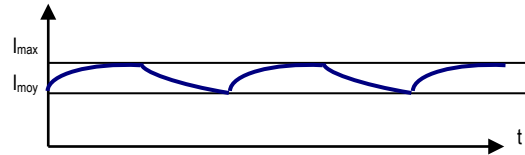


Rapport cyclique du hacheur : $\alpha = \frac{t_1}{T}$

Valeur moyenne de la tension : $U_{Mot} = \alpha E$



La fréquence de travail élevée du hacheur permet de limiter l'ondulation du courant dans le moteur et d'obtenir un fonctionnement progressif sans à-coups de couple.



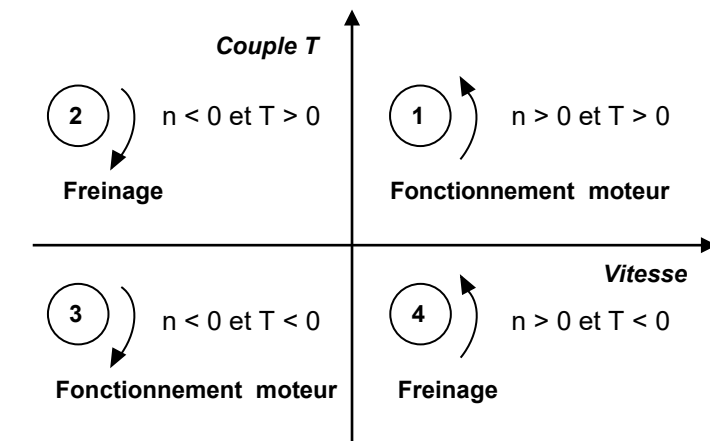
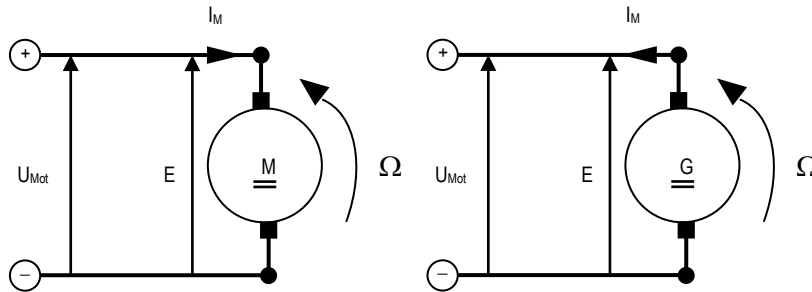
ΔI = ondulation du courant

Éléments de structure des hacheurs

Selon que la réversibilité soit prévue ou non prévue, plusieurs structures sont envisageables. En effet, la masse à considérer (chariot en mouvement et charge déplacée) peut être entraînée ou entraînant. Il convient de tenir compte des deux possibilités de fonctionnement d'une machine électrique :

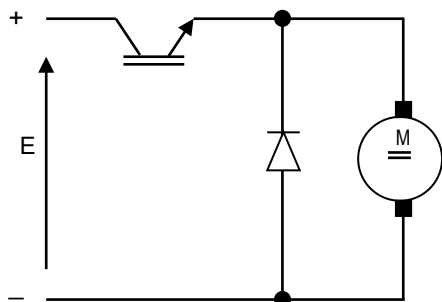
Dans le premier cas, le moteur entraîne le chariot et la masse à déplacer qui peut se limiter uniquement à celle du chariot et de son conducteur. La batterie fournit le courant au moteur.

Dans le deuxième cas, le chariot se déplaçant dans la même direction, la masse totale est entraînant, le courant I_M change de sens. Selon les solutions adoptées par le constructeur, ce courant se dissipe en chaleur dans une résistance ou participe à la recharge de la batterie.

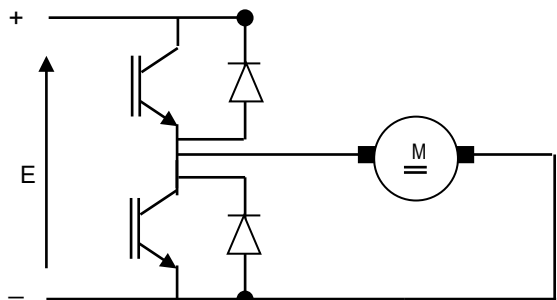


Quadrants de fonctionnement pour un variateur réversible

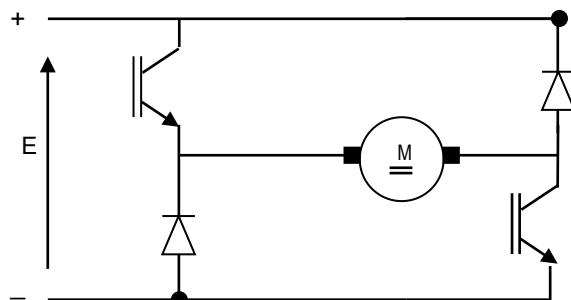
Exemples appliqués à un hacheur :



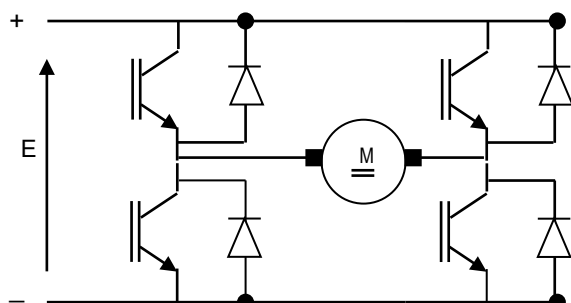
Structure 1 quadrant



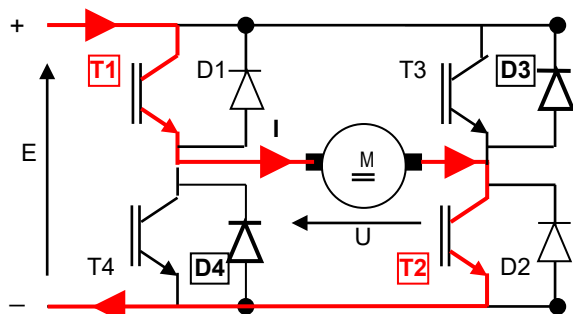
Structure 2 quadrants (1 et 2)



Structure 2 quadrants (1 et 4)



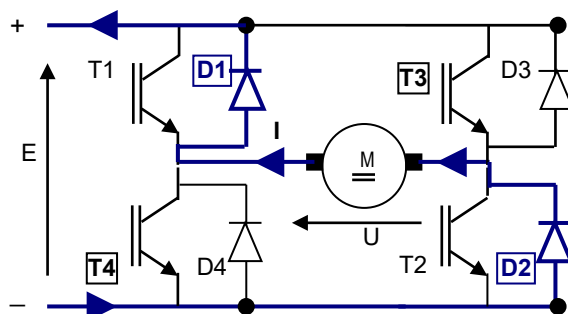
Structure 4 quadrants



Quadrant 1 :

Le moteur entraîne la charge

- T1 et T2 sont commandés durant αT ;
- D2 et D4 sont bloquées.



Quadrant 4 :

La charge est entraînée, le moteur n'a pas changé de sens de rotation

- D1 et D2 sont passantes durant αT ;
- T3 et T4 ne sont pas commandés ;
- Le courant I s'inverse.

Choix technologique des interrupteurs composant actif du hacheur :

Le circuit de puissance peut être établi par différents types de transistors :

- transistor bipolaire ;
- transistor MOS ;
- transistor IGBT.

Les principales grandeurs électriques retenues pour établir le choix d'un transistor :

- la tension maximale que peut supporter le composant à l'état bloqué ;
- le courant maximal permanent que peut supporter le composant à l'état passant.

II- 52 Moteur asynchrone

Un moteur est associé à un variateur de vitesse lorsqu'il y a une nécessité d'adapter le couple ou la vitesse selon l'emploi recherché, en l'occurrence, du chariot élévateur.

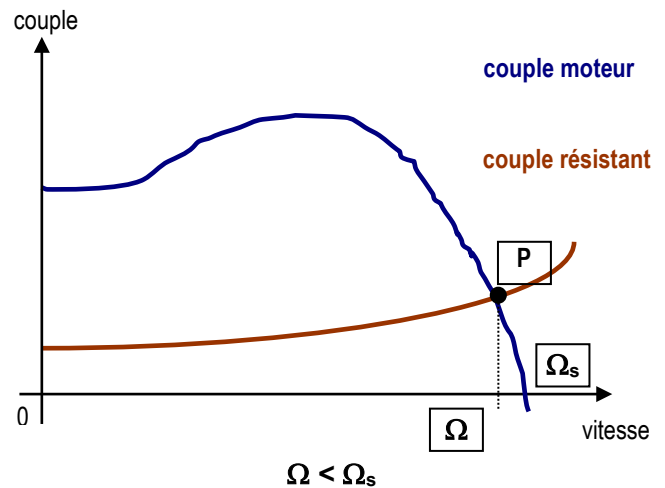
Deux éléments aboutissent au choix du système de variation :

- l'inertie et la caractéristique couple/vitesse appartenant à la charge entraînée ;
- les performances statiques et dynamiques attendues.

Réglage de la vitesse

Caractéristique couple/vitesse

La vitesse Ω de rotation du moteur est fonction du point **P** de fonctionnement.



Principe de la variation de vitesse

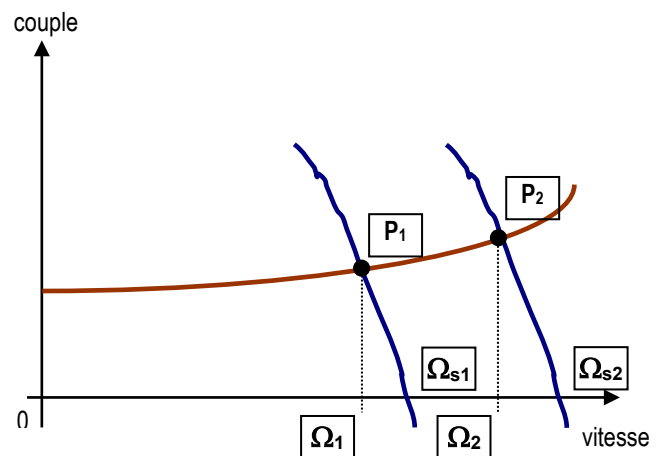
Le réglage de la vitesse du moteur est permis par l'action sur la grandeur Ω_s .

La différence entre la vitesse de synchronisme Ω_s et la vitesse réelle du moteur est due au glissement du moteur asynchrone :

$$\Omega_s = 2\pi n_s \quad \text{avec} \quad n_s = \frac{f}{p}$$

Le réglage de la vitesse Ω du moteur asynchrone peut être obtenu par une action sur le nombre **p** de paires de pôles ou par une action sur la fréquence **f** :

$$\Omega_s = 2\pi \frac{f}{p} \quad \text{pour un } p \text{ donné, le réglage ne dépend que de } f.$$



Pour P_1 : $\Omega_1 < \Omega_{s1}$

Pour P_2 : $\Omega_2 < \Omega_{s2}$

Action sur la fréquence

Un onduleur de tension à fréquence variable est inséré entre la source d'alimentation continue provenant de la batterie et le stator du moteur.

Cet onduleur permet :

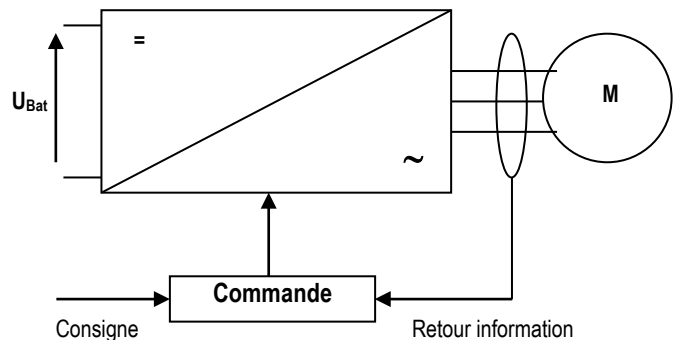
- d'obtenir une grande gamme de réglages de la vitesse du moteur asynchrone triphasé à cage ;
- de conserver les performances du moteur avec un couple maximal disponible en permanence.

L'onduleur est constitué par six transistors (IGBT ou GTO) associés à des diodes de roue libre.

La commande en modulation de largeur d'impulsion (MLI) assure le contrôle de l'onduleur :

- soit en fréquence, cas du variateur dit U/f constant ;
- soit vectoriellement, cas de la commande en couple instantané avec régulation de vitesse.

L'onduleur MLI permet l'échange d'énergie entre une source continue et une charge inductive triphasée.



Variateur de vitesse U/F constant

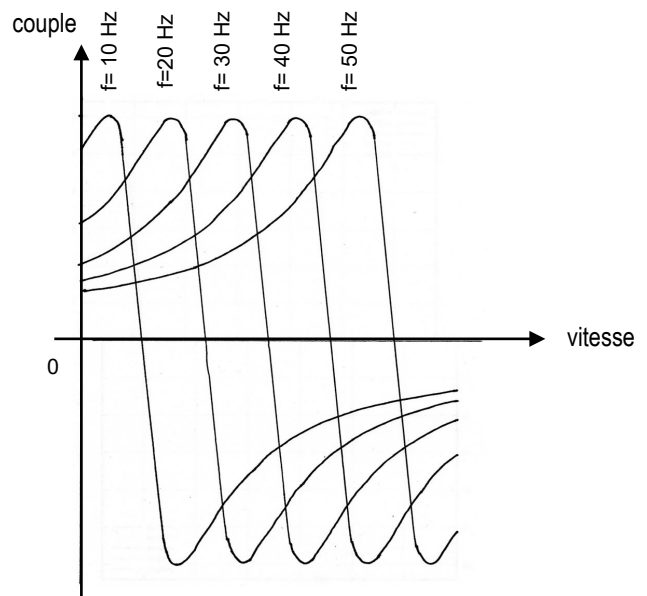
Le contrôle du couple électromagnétique du moteur asynchrone suppose le maintien constant du flux statorique et le contrôle de la pulsation rotorique.

Pour faire varier en boucle ouverte la vitesse d'un moteur asynchrone, il est nécessaire d'agir sur la fréquence d'alimentation au stator tout en maintenant le flux constant. L'action sur les réglages de tension et de fréquence est réalisée par l'onduleur MLI

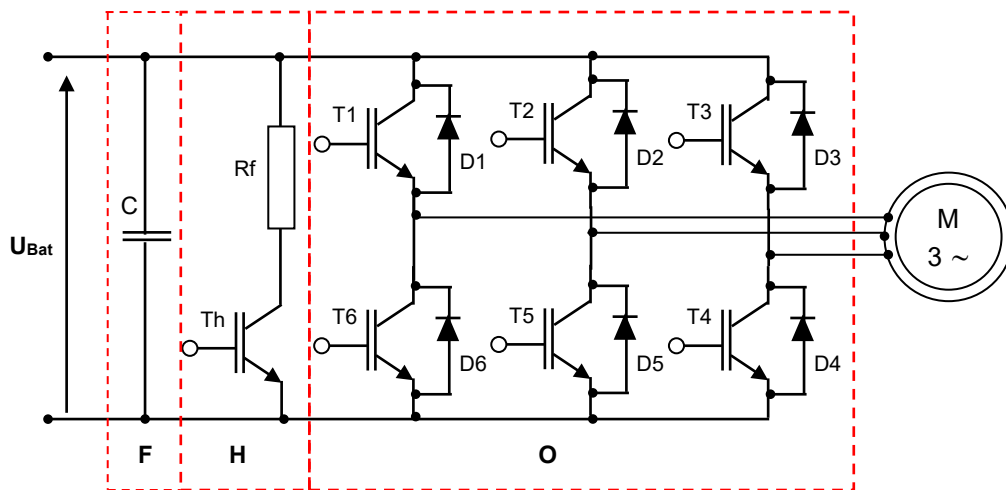
Le couple électromagnétique est constant si le rapport :

$$\frac{V_s}{f} = \text{Cte}$$

(V_s : valeur efficace du fondamental de la tension statorique)



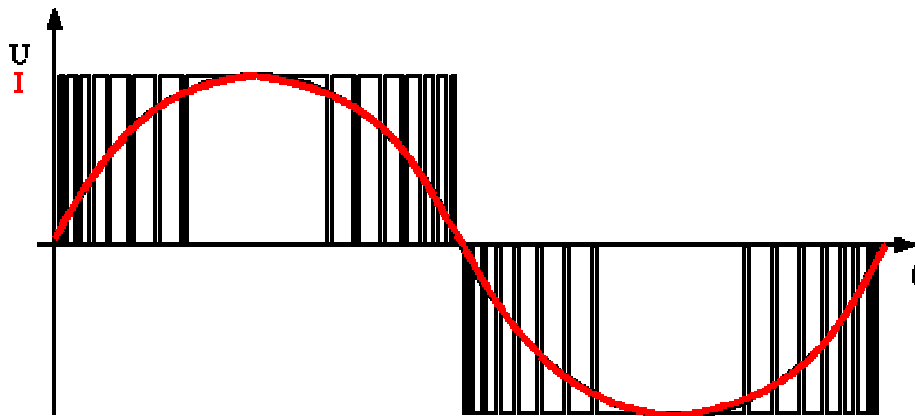
à chaque valeur de vitesse correspond une nouvelle valeur V_s



La source d'alimentation en courant continu provenant de la batterie, trois sous-ensembles forment le variateur de vitesse :

- sous-ensemble O : les éléments T1-D1 à T6-D6 constituent l'onduleur triphasé à modulation de largeur d'amplitude qui détermine la fréquence du champ tournant ainsi que l'amplitude du courant dans le moteur ;
- sous-ensemble H : les éléments R_f et Th constituent le hacheur de freinage. Au moment de la phase de freinage, le moteur asynchrone fonctionne en génératrice. La commande de Th est réalisée selon un rapport cyclique variable. La conduction continue de Th correspond au freinage maximal ;
- sous-ensemble F : composé par le condensateur de filtrage C.

La commande MLI permet de générer en sortie de l'onduleur une tension sous la forme de la figure ci-dessous et d'obtenir des courants statoriques quasiment sinusoïdaux.



Variateur de vitesse à commande vectorielle

Le contrôle vectoriel de flux permet d'imposer au moteur asynchrone un mode de fonctionnement comparable à un moteur à courant continu à excitation séparée pour lequel le couple électromagnétique est proportionnel à deux grandeurs indépendantes : le flux inducteur et le courant induit.

A partir de la mesure des trois intensités statoriques, la commande vectorielle doit permettre de retrouver un modèle équivalent à un moteur à courant continu.