

# Les techniques de commande du moteur asynchrone

## p.2

**La modulation de largeur d'impulsions (PWM)**

## p.4

**Le contrôle vectoriel de tension : contrôle E/F**

## p.5

**Le contrôle vectoriel de flux pour moteur asynchrone**

## p.10

**Les diagrammes d'essais**

## p.13

**Applications  
Choix des lois de commande**

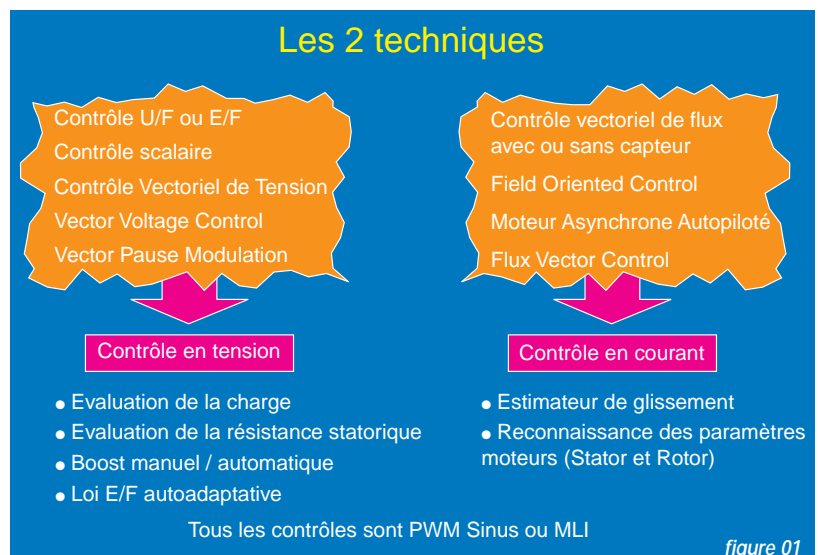
*Ce guide technique a pour objet de rappeler et de classer les techniques les plus répandues et les plus récentes de la commande des moteurs asynchrones à vitesse variable.*

Un certain nombre de mots clés sont répertoriés dans la figure 01. Ces mots clés sont rassemblés en 2 groupes qui sont relatifs à 2 techniques distinctes.

- Le contrôle en tension avec optimisation du flux qui permet de délivrer le maximum de couple sur toute la gamme de vitesse (1 à 20) et le courant à vide

le plus réduit possible pour minimiser l'échauffement.

- Le contrôle vectoriel de flux qui permet à un moteur, équipé d'un capteur ou pas, d'atteindre un niveau élevé de performances dynamiques et une grande gamme de vitesse (1 à 100 / 1 à 1000). Dans les 2 cas, la génération d'ondes de tensions alternatives possède un taux d'harmoniques le plus réduit possible, ceci par modulation de largeur d'impulsions (PWM).



**GROUPE SCHNEIDER**

# La modulation de largeur d'impulsions (PWM)

## La modulation de largeur d'impulsions sinusoïdales (PWM sinus)

Dans le domaine de la commande des moteurs asynchrones, de puissance inférieure à 500 kW, une structure de puissance fait maintenant l'unanimité : l'onduleur de tension associé à un redresseur non contrôlé et un filtre capacitif (figure 02). Les progrès en coût et en performances accomplis par les interrupteurs de puissance, ont permis à

cette structure très simple de s'imposer. La modulation de largeur d'impulsions consiste à commander les interrupteurs de manière à délivrer au moteur une suite d'impulsions d'amplitude fixe, positives ou négatives et modulées en largeur. Il existe de très nombreuses possibilités de réalisations, par exemple :

- la technique analogique utilisée sur les réalisations industrielles les plus anciennes. Elle consiste à générer :
  - une onde sinusoïdale de référence par phase dont l'amplitude et la fréquence représentent la tension de sortie,

- une onde de modulation de fréquence élevée de forme triangulaire. Les interrupteurs de puissance sont commandés aux instants d'intersection de ces 2 ondes, instants déterminés par des comparateurs (figure 03).

- la technique numérique : l'apparition des microprocesseurs a permis de transposer le principe décrit précédemment en technique numérique.
- la modulation, entièrement réalisée par le microprocesseur, consiste à

commander les interrupteurs avec un motif de base auquel on superpose une modulation à haute fréquence réalisant la variation de tension (figure 04).

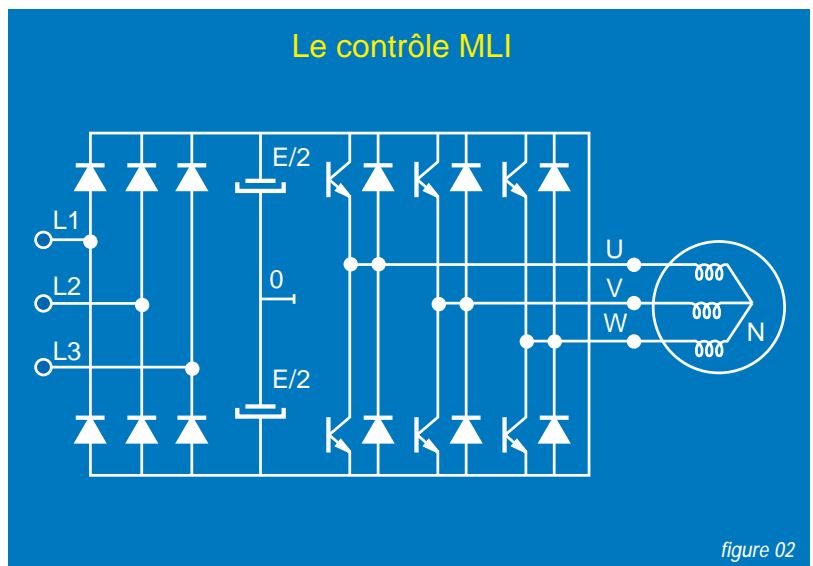


figure 02

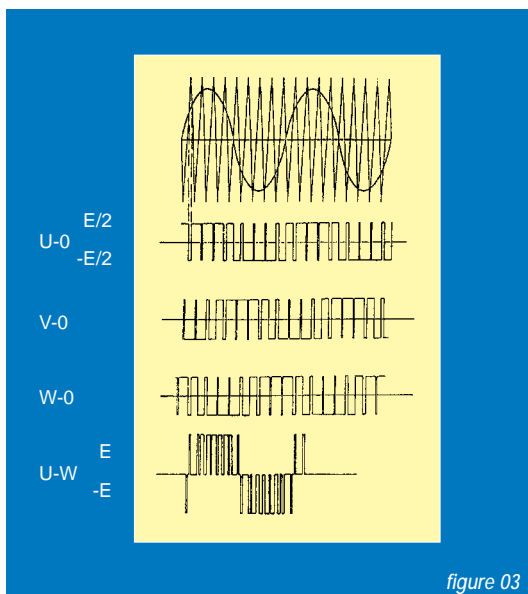


figure 03

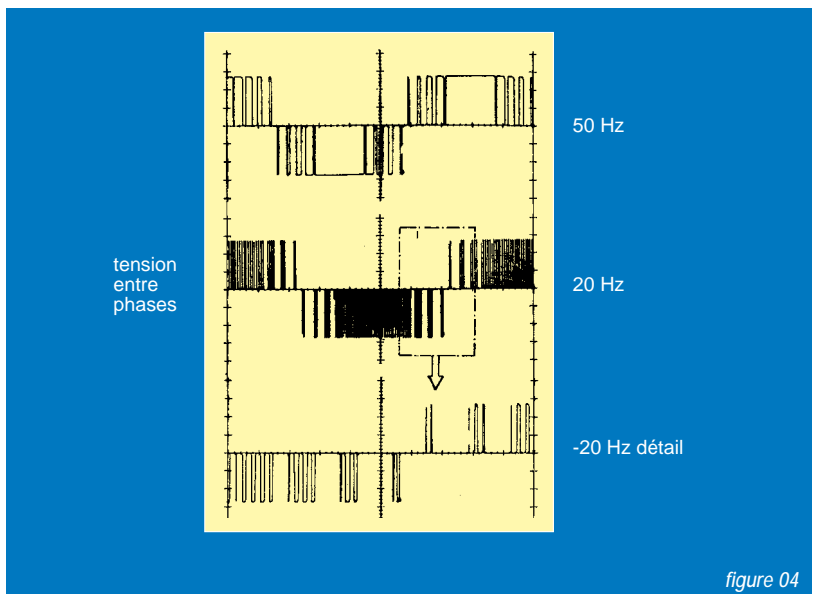


figure 04

## La représentation vectorielle des variables

Dans tout système triphasé équilibré, les variables peuvent être représentées par un vecteur dont les composantes, disposées sur 3 axes à 120°, sont les valeurs de ces variables sur chaque phase. Exemple : la figure 05 représente des variables triphasées sinusoïdales.

Ainsi, on peut représenter, sous forme d'un vecteur, les tensions U - 0, V - 0 et W - 0.

vecteur tension pour la combinaison (a), les composantes suivant les axes U, V, W étant alors respectivement égales à E/2, - E/2, E/2.

L'extrémité du vecteur tension a donc seulement

7 positions possibles (figure 07) :

- sur les sommets d'un hexagone pour les combinaisons (a) à (f),
- au centre de l'hexagone (vecteur nul) pour les combinaisons (g) et (h).

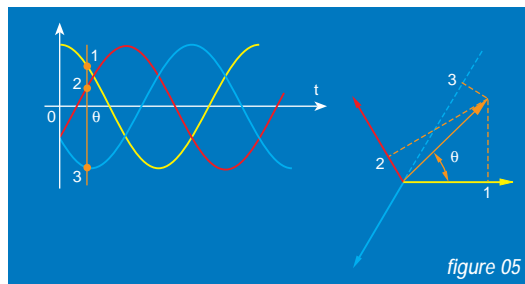


figure 05

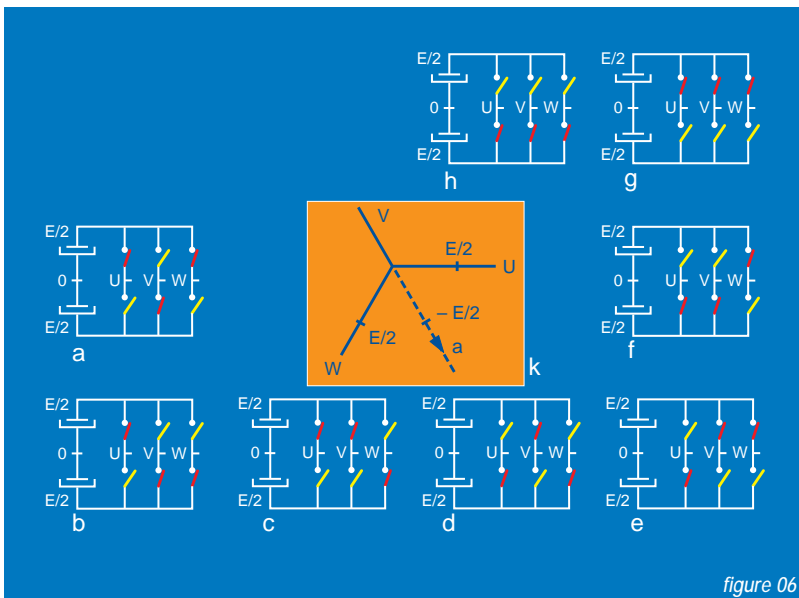


figure 06

Les différentes combinaisons de commande des interrupteurs sont représentées sur la figure 06. A chacune de ces combinaisons correspond une position du vecteur tension. Ainsi la figure 06 (k) montre la position du

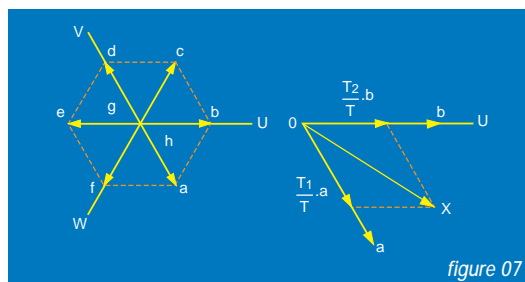


figure 07

## La modulation vectorielle

La modulation vectorielle est un cas particulier de la modulation de largeur d'impulsions. Suivant la représentation vectorielle précédente, son principe consiste à considérer un vecteur tension quelconque comme étant, dans un intervalle de temps T, la combinaison de 2 vecteurs adjacents et du vecteur nul. Autrement dit (figure 08), pour appliquer la tension X pendant le temps T, il est équivalent d'appliquer :

- la tension a pendant le temps T<sub>1</sub>,
- la tension b pendant le

temps T<sub>2</sub>,

- une tension nulle pendant le temps T<sub>0</sub>, avec  $T = T_0 + T_1 + T_2$ .

L'algorithme de calcul a pour objet de fournir les valeurs de T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>. La figure 08 donne un exemple de chronogramme des tensions sur l'intervalle T. L'intérêt de ce type de modulation est de pouvoir être facilement implanté dans un microprocesseur. Toutefois, comme tous les types de modulation, la qualité de celle-ci réside dans la possibilité d'obtenir une fréquence élevée de modulation, c'est-à-dire d'avoir un nombre élevé d'intervalles T par période.

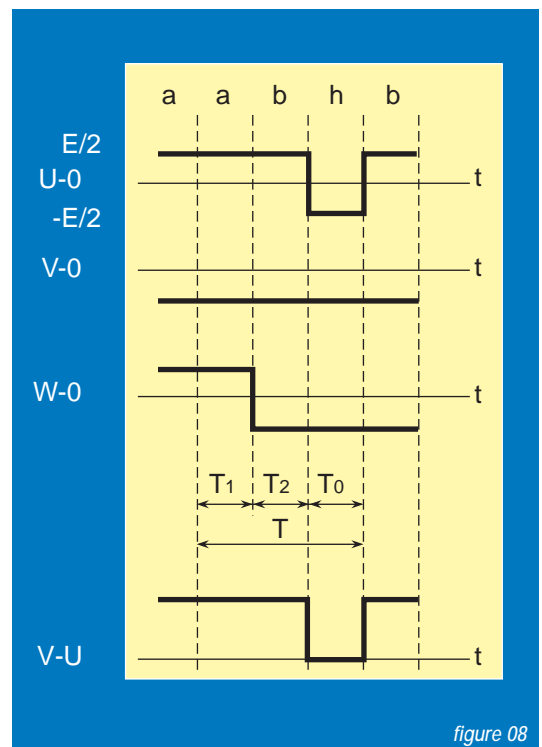


figure 08

# Le contrôle vectoriel de tension : contrôle E/F

## Le schéma équivalent du moteur asynchrone

La figure 09 représente le schéma équivalent par phase d'une machine asynchrone. Le flux est créé par le courant circulant dans l'inductance magnétisante  $L_m$ . Les performances optimales du moteur sont obtenues si le flux, et donc le courant magnétisant, est maintenu sensiblement constant sur toute la gamme de vitesse.

Le courant magnétisant peut être calculé par l'expression :

$$I_d = \frac{E_s}{L_m \omega}$$

avec  $E_s = V_s - (R_s + L_s \omega) I$

En négligeant  $(R_s + L_s \omega) I$  on obtient :

$$I_d = \frac{V_s}{\omega} \frac{1}{L_m} = \frac{V_s}{f} \frac{1}{2\pi L_m}$$

Le courant magnétisant peut donc être maintenu constant en maintenant le rapport  $\frac{V_s}{f}$  sensiblement constant.

Toutefois, à des fréquences et des tensions faibles, le terme  $(R_s + L_s \omega) I$  ne peut plus être négligé, et en particulier le terme  $R_s I$ . Pour maintenir le flux constant, quelle que soit la charge du moteur et donc quel que soit le courant

absorbé, le maintien d'un rapport  $\frac{V_s}{f}$  constant n'est pas suffisant.

## La loi tension/fréquence

### Ajustage 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". 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.

### Ajustage automatique

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

parfois appelé "boost automatique". Un réglage permet de faire varier le coefficient, c'est-à-dire compenser au plus juste la chute de tension  $R_s I$  du moteur utilisé. 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.

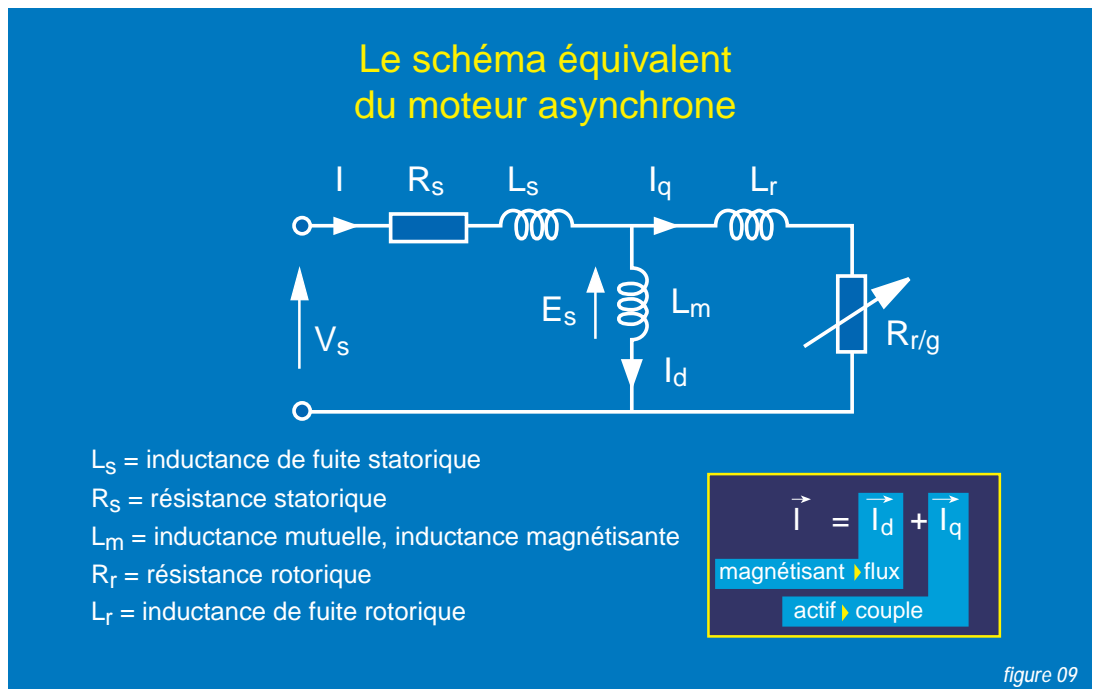
Un excès de compensation peut également conduire à une suralimentation entretenue du moteur :

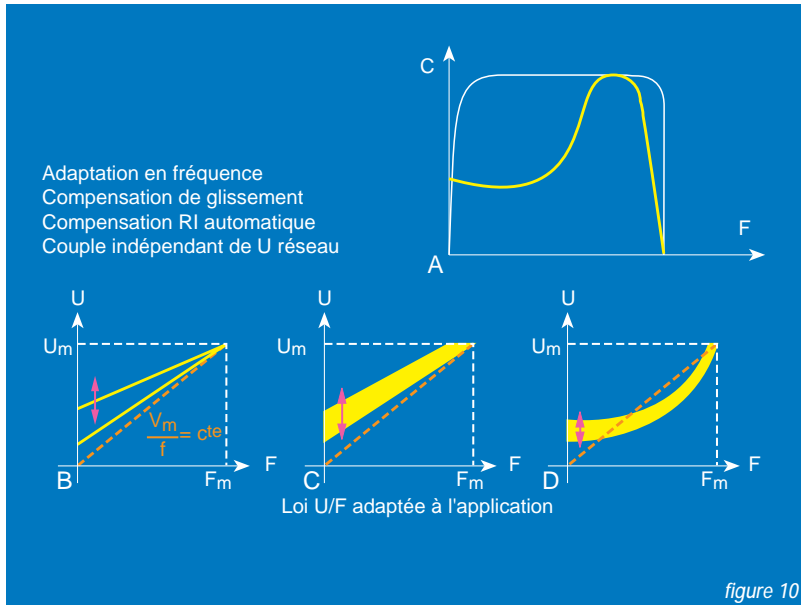
- augmentation de la charge,
- augmentation de la tension,
- augmentation du courant.

## Cas particulier : couple quadratique

Le couple résistant exercé par une pompe centrifuge ou un ventilateur varie en fonction du carré de la vitesse. On peut donc, sans inconvénient, diminuer le flux du moteur et donc la tension d'alimentation du moteur, pour une fréquence inférieure à la fréquence nominale (figure 10).

Un ajustage automatique de la tension, fonction de la charge du moteur, permet de délivrer un couple de décollage suffisant à basse vitesse.





manuellement. Toutes ces fonctions permettent d'obtenir une courbe couple/vitesse en surcharge telle que représentée sur la (figure 10) Toutefois, il apparaît que

tous les systèmes de contrôle en tension cités figure 01, même optimisés, ne permettent pas de contrôler correctement le flux et le couple à très basse fréquence ( $f < 2$  ou  $3$  Hz).



## Le contrôle vectoriel de flux pour moteur asynchrone

### La loi de Laplace

Les moteurs électriques sont des actionneurs qui permettent de transformer une énergie électrique en énergie mécanique. Cette transformation est

régie par la loi de Laplace. "Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique uniforme est soumis à une force d'origine électromagnétique".

### Performances

#### Contrôle de flux

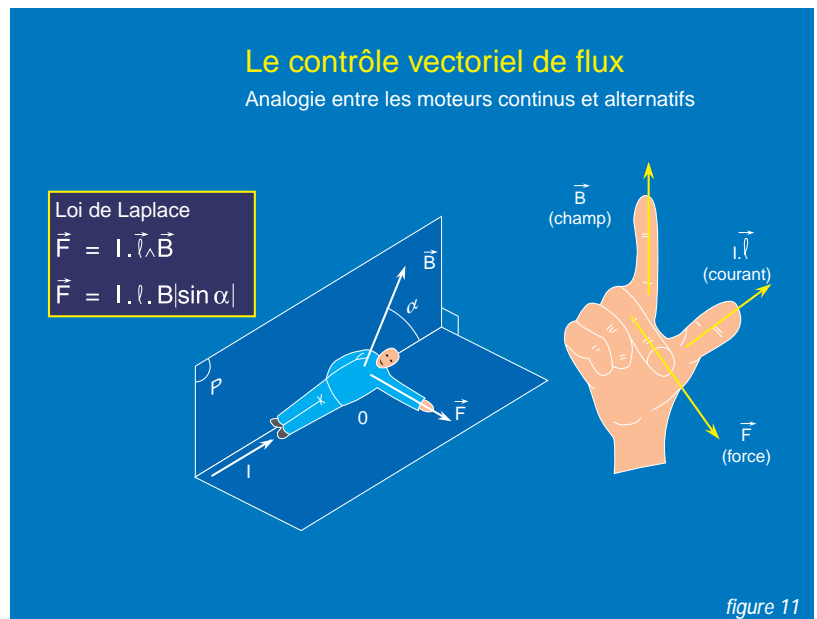
Afin d'obtenir des performances élevées, en couple de surcharge et en régime transitoire, les variateurs de ce type réalisent un contrôle de flux comportant les fonctions suivantes :

- estimation de la charge du moteur réalisée à partir de la mesure du courant dans l'étage continu du variateur,
- estimation de la résistance statorique. Celle-ci est fonction du calibre du moteur, connu par le réglage de la protection thermique et par son état thermique. Ces deux estimations permettent de calculer la tension à appliquer au moteur, à une vitesse donnée, pour obtenir le flux

optimum,

- boucle de fréquence. Elle évite le décrochage du moteur en maintenant son couple constant. Ceci est obtenu en réduisant à la fois la tension et la fréquence,
- suralimentation transitoire. Une augmentation anticipée de la tension est fournie au moteur lors d'accélération rapides, afin de maintenir le flux en régime transitoire. Cette fonction est parfois appelée "boost dynamique",
- compensation de glissement. Afin de maintenir la vitesse de rotation sensiblement constante, le moteur est alimenté à une fréquence légèrement plus élevée en charge qu'à vide. Ce surcroît de fréquence est fonction de l'estimation de la charge citée plus haut

et de la fréquence de glissement nominale du moteur. Celle-ci est estimée en fonction du calibre du moteur mais peut également être ajustée



## Le moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est l'exemple le plus simple d'application de la loi de Laplace. Dans la machine à

courant continu à excitation séparée, le flux et le couple sont découplés et contrôlables indépendamment.

- Le courant inducteur est producteur de flux.
- Le courant induit est

producteur de couple.

$$\Phi = K i_f, C = K' \Phi I$$

Le maintien des conducteurs actifs dans le flux est réalisé par une commutation mécanique à l'aide du collecteur et des balais.

## Le moteur synchrone autopiloté (brushless)

Ce même principe est utilisé dans le moteur synchrone autopiloté mais cette fois :

- le flux rotorique est constant. Il est créé par des aimants permanents montés dans le rotor,
  - le flux statorique est variable. Il est créé par un enroulement triphasé permettant de l'orienter dans toutes les directions.
- La commutation mécanique du moteur à courant continu a été remplacée par une commutation électronique. Elle consiste à contrôler la phase des ondes de courant de façon à créer un champ tournant, toujours en avance de 90° sur le champ des aimants, afin que le couple soit maximal. Dans ces conditions le couple est proportionnel au courant statorique.
- $$C = K \Phi I_s$$

## Le moteur asynchrone à cage

C'est le moteur le plus répandu dans l'industrie. Il est robuste, fiable,

normalisé, économique, disponible, peu encombrant...

Il est constitué :

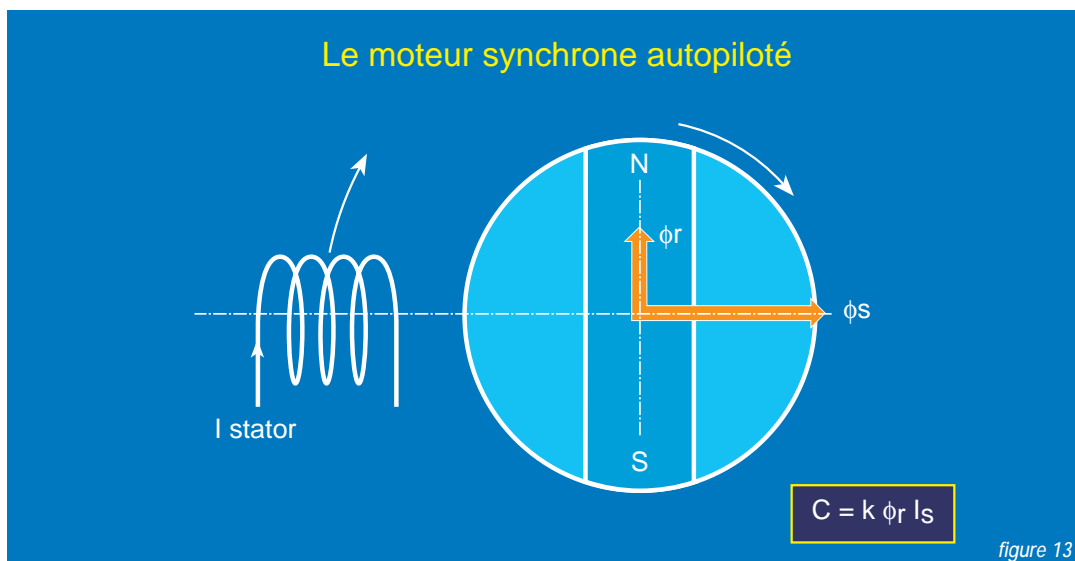
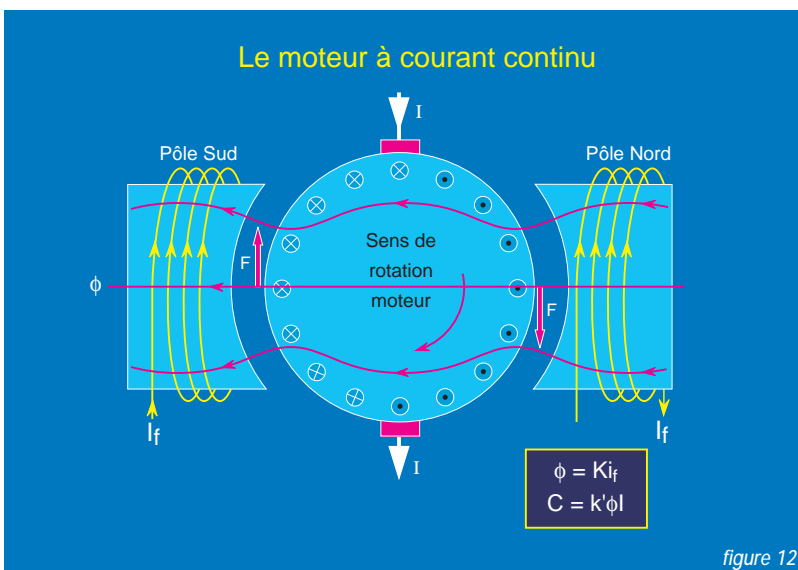
- d'un stator équipé d'un enroulement triphasé,
- d'un rotor à cage d'écureuil.

Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés, ils produisent un champ tournant.

Les lignes de flux qui traversent le rotor se déplacent par rapport aux barres conductrices ; un courant induit prend naissance dans ces barres mises en court-circuit par leurs extrémités.

L'action du champ magnétique sur ce courant génère des forces (Loi de Laplace), donc un couple qui entraîne le rotor dans le sens du champ tournant. Le couple produit par la machine est un couple moteur car il s'oppose au couple appliqué par la charge qui est à l'origine du glissement.

On démontre que pour les vitesses normales de fonctionnement proches du synchronisme, le couple est bien proportionnel au glissement.  $C = K_g U_s^2$   $U_s$  étant la tension d'alimentation statorique (figure 14).



**Rappel du principe :**

L'enroulement statorique de 2p pôles, alimenté par des courants de fréquence f, crée un champ tournant à la vitesse synchronique.

$$N_s = \frac{f}{p}$$

Ce flux balayant les enroulements rotoriques y induit des f.e.m., donc des courants puisque ces bobinages sont en court-circuit.

Si le rotor tournait à la vitesse de synchronisme  $N_s$ , le flux à travers ses enroulements ne varierait plus, d'où absence de courant rotorique et de couple. Le moteur tourne à une vitesse N d'autant plus inférieure à  $N_s$  que le couple demandé sur l'arbre est important.

On appelle glissement

l'écart relatif :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

Le couple provient de l'action du flux statorique sur le courant rotorique qu'il a lui-même induit.

La vitesse de balayage du flux statorique à travers le rotor est :

$$N_s - N = g N_s$$

Les courants rotoriques auront donc une fréquence  $f_r = p g N_s = g f$

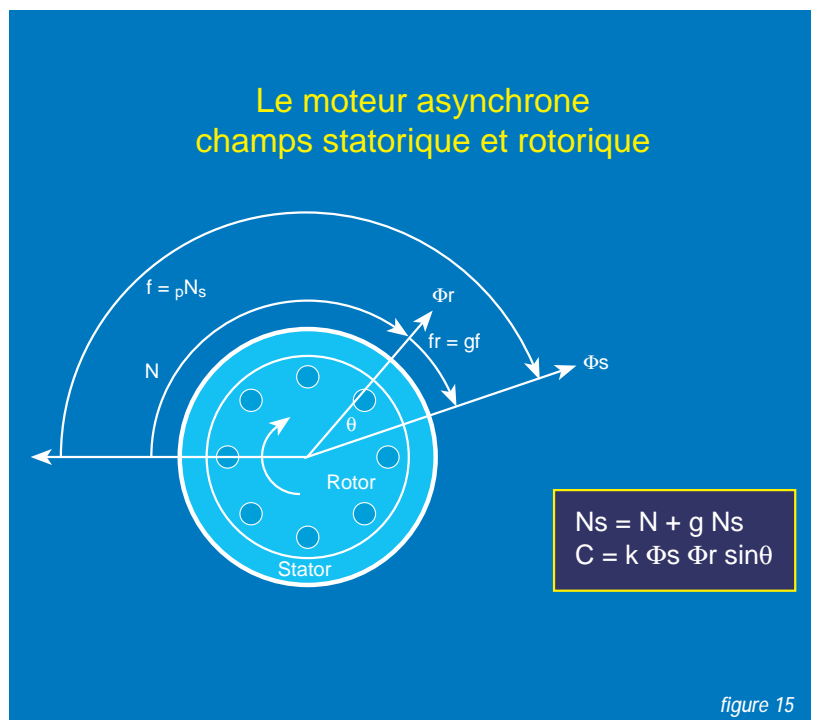
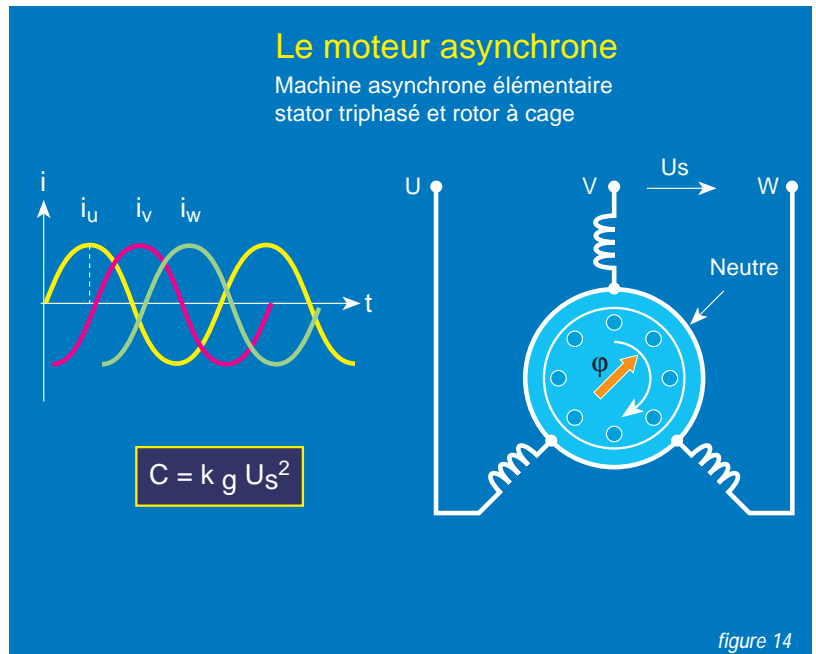
Le rotor alimenté par des courants de fréquence gf crée un champ tournant par rapport au rotor à la vitesse  $gf/p = g N_s = N_s - N$  (voir tableau ci-dessous).

Puisque les champs, statorique  $\Phi_s$  et rotorique  $\Phi_r$ , tournent à la même vitesse constante  $N_s$ , la position relative des pôles du stator et de ceux du rotor est fixe. Ces pôles peuvent donc s'attirer ou se repousser, ce qui crée un couple sur l'arbre. Le champ rotorique  $\Phi_r$  est accroché à celui du stator (figure 15).

On démontre que l'expression du couple est  $C = k \Phi_s \Phi_r \sin \theta$

On voit que le couple est maximum si  $\theta = 90^\circ$ , d'où l'analogie avec le moteur synchrone autopiloté.

Vitesse champ statorique par rapport au stator	$N_s$
Vitesse champ rotorique par rapport au rotor	$N_s - N$
Vitesse rotor par rapport au stator	$N$
Vitesse champ rotorique par rapport au stator $(N_s - N) + N = N_s$	



## Le schéma équivalent du moteur asynchrone à cage

Dans le moteur asynchrone, le courant statorique sert à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus.

Par analogie avec le moteur à courant continu, on peut décomposer le courant statorique en :

- un courant magnétisant  $I_d$  qui va générer le flux,
- un courant actif  $I_q$  qui va générer le couple.

Les performances optimales du moteur sont obtenues si le flux, donc le courant magnétisant  $I_d$ , est maintenu constant sur toute la plage de vitesse (voir pages 4 et 5).

La figure 16 indique comment se décompose le courant statorique  $I_s$  quand le couple varie.

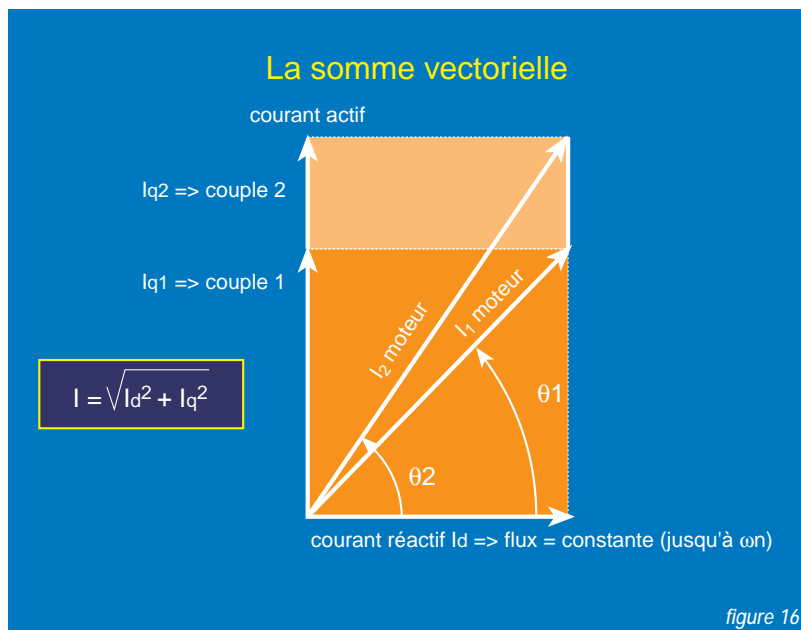
machine et à transformer ses équations de manière à découpler les variables flux et couple et à contrôler séparément les courants  $I_d$  et  $I_q$ . Considérons la machine

asynchrone biphasée équivalente équipée de deux bobines fictives orthogonales, l'une étant destinée à produire le flux et l'autre à produire le couple (figure 17).

Les 2 flux  $\Phi_r$  et  $\Phi_s$  sont produits par les deux courants sinusoidaux  $I_d$  et  $I_q$ . A partir de là, il est possible aussi de considérer que ces bobines sont équivalentes à

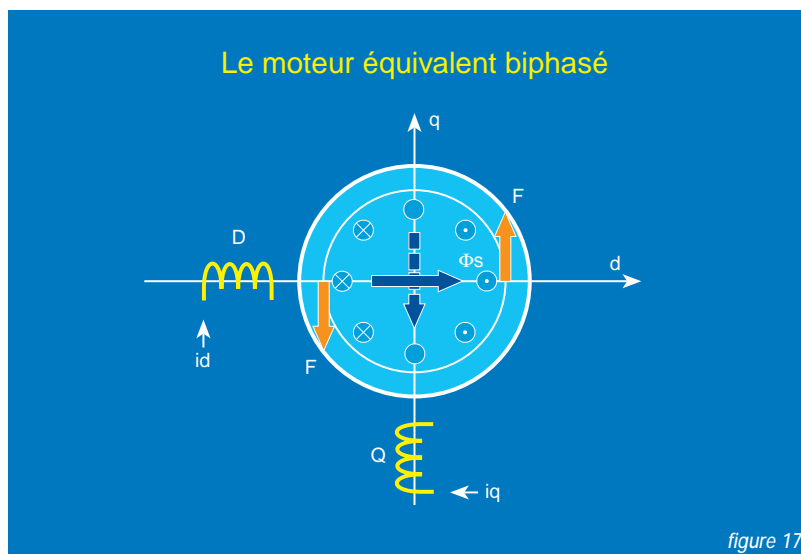
2 pôles fictifs, créés par des courants continus, que l'on ferait tourner à la vitesse nécessaire comme dans le moteur synchrone autopiloté.

En fait, si l'on considère que la bobine D, alimentée par le courant continu  $I_d$ , crée un flux fixe d'axe d et que l'on alimente la bobine Q par un courant continu  $I_q$ , il y a naissance d'un flux d'axe q. Selon la loi de LENZ un courant rotorique s'oppose à la croissance de ce flux. Le courant rotorique et le flux d'axe d produisent un couple comme dans la machine à courant continu. Le couple ainsi produit n'étant que transitoire, il est nécessaire pour le maintenir de déplacer la bobine Q en maintenant l'interaction champ-courant, donc de garder le flux d'axe d perpendiculaire à l'axe q. Ainsi il suffit de faire tourner l'ensemble des bobines fictives D et Q en les maintenant perpendiculaires. Le courant  $I_d$  et le flux  $\Phi_s$  seront maintenus constants dans le cas du fonctionnement à couple constant.



## Le contrôle vectoriel de flux

Pour obtenir des couples importants à très faible vitesse, voire à vitesse nulle, ainsi que des performances dynamiques, il est nécessaire d'utiliser un mode de contrôle différent : le contrôle vectoriel de flux ou contrôle à flux orienté. Le contrôle vectoriel de flux consiste à modéliser la

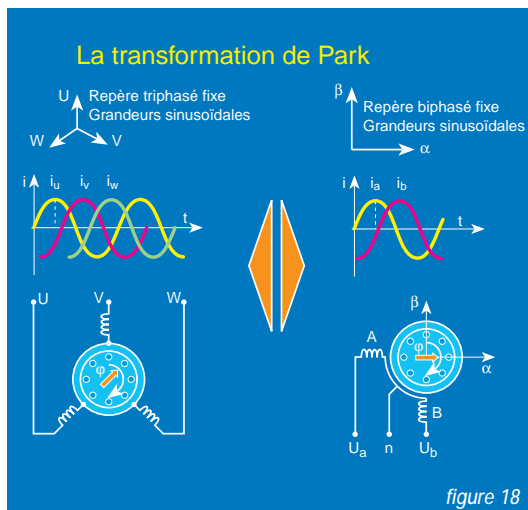




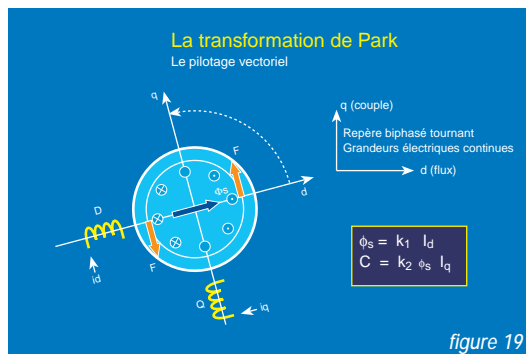
## La transformation de Park

La transformation des équations de la machine, appelée transformation de Park, consiste tout d'abord à remplacer le moteur triphasé par le moteur biphasé équivalent. D'un système triphasé fixe on passe à un système biphasé fixe (les grandeurs restent sinusoïdales) puis à un repère tournant à la vitesse du champ statorique ; dans ce repère les grandeurs électriques

deviennent des grandeurs continues. Cette transformation nécessite de nombreuses opérations mathématiques et d'avoir accès à tous les paramètres de la machine (résistances, inductances, flux). La transformation réciproque, également possible, va permettre de générer les courants alternatifs statoriques dans le moteur triphasé.



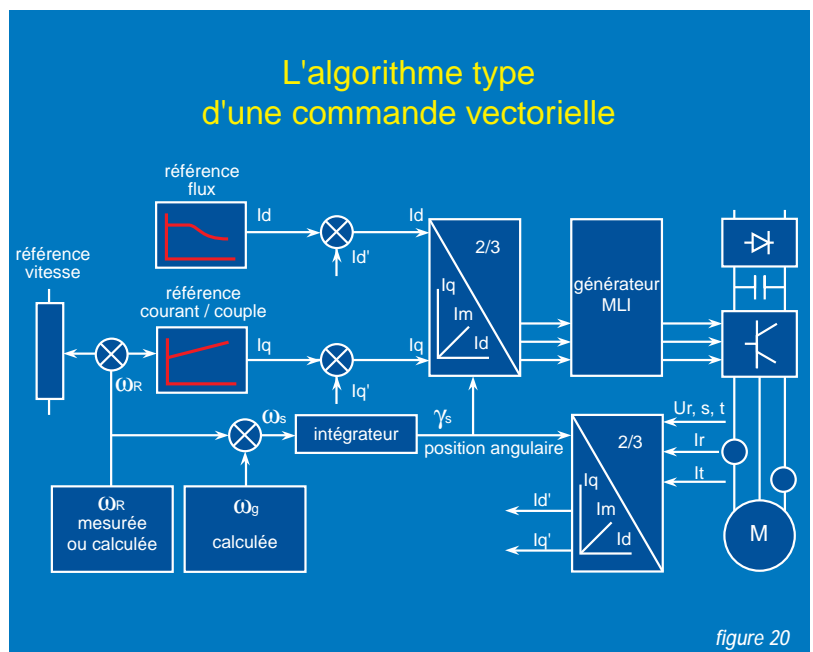
## Le pilotage vectoriel est réalisé



## L'algorithme type d'une commande vectorielle

La structure de la partie puissance est classique, elle est constituée d'un onduleur de tension associé à un redresseur non contrôlé et à un filtre capacitif. Les ondes de tension sont générées par modulation de largeur d'impulsion. La vitesse du moteur est soit mesurée par un capteur soit calculée. La référence flux est élaborée en fonction de la vitesse du moteur.

La sortie du régulateur de vitesse constitue la référence de couple. La vitesse du champ tournant est obtenue en ajoutant à la vitesse du moteur le glissement qui a été calculé pour obtenir le couple. Deux boucles de courant sont utilisées pour imposer les courants triphasés au moteur en fonction du flux et du couple nécessaires.



## Les diagrammes d'essais

Les résultats suivants ont été obtenus avec un produit industriel, le variateur de vitesse Telemecanique Altivar 66.

Le moteur utilisé est un moteur standard du marché de 7,5 kW, sans capteur. Il entraîne une génératrice

qui possède une dynamo tachymétrique servant uniquement à visualiser la vitesse réelle. Les caractéristiques du moteur à notre disposition ne sont rien d'autre que celles marquées sur la plaque signalétique.

### Inversion $\pm 50$ Hz avec rampe de 5 secondes

La figure 21 montre la vitesse et le courant du moteur au cours d'une inversion entre - 50 Hz et + 50 Hz avec une rampe longue de 5 secondes. Le temps de rampe représente l'accélération de 0 à la vitesse nominale. Donc, ici, l'inversion dure 10 s. On remarque la linéarité de la vitesse, notamment au passage du zéro de vitesse.

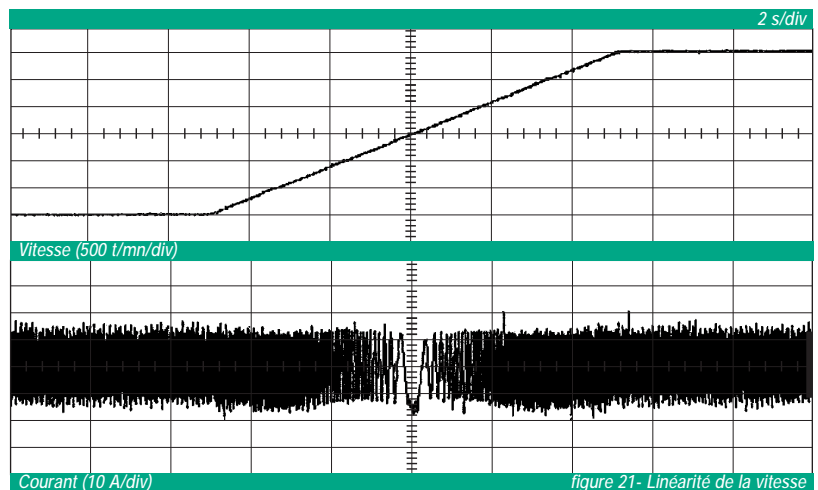


figure 21- Linéarité de la vitesse

### Inversion $\pm 33$ Hz avec rampe rapide

Avec une rampe rapide, l'inversion entre  $\pm 33$  Hz ou 1 000 t/mn dure moins de 0,3 s. L'échelle de temps est dilatée 20 fois par rapport à la figure précédente. On note toujours la linéarité de la vitesse qui démontre la constance du couple et du flux pendant l'inversion (figure 22).

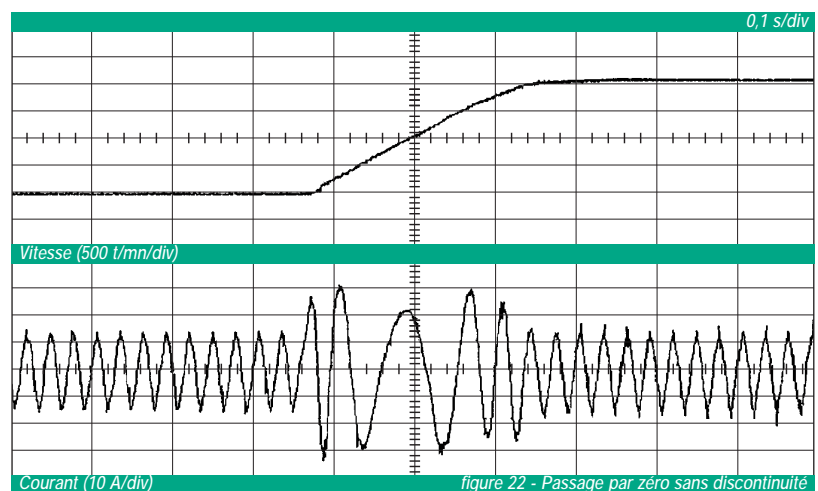


figure 22 - Passage par zéro sans discontinuité

### Inversion $\pm 3$ Hz

A basse vitesse (ici 3 Hz), le passage par zéro se fait d'une façon linéaire et sans oscillation. L'aspect sinusoïdal du courant montre aussi que le flux est stable et bien contrôlé (figure 23).

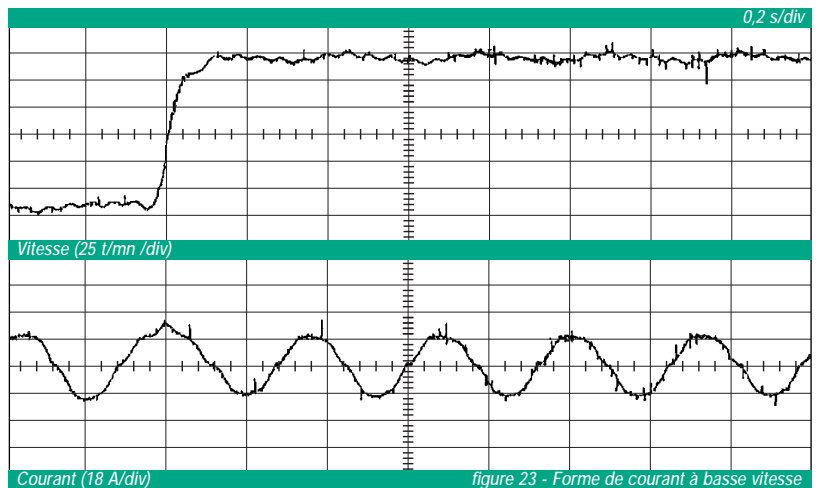


figure 23 - Forme de courant à basse vitesse

### Accélération lente à 70 Hz

Le bon contrôle du flux se voit surtout dans cette évolution lente de la vitesse. La constance du courant magnétisant depuis la vitesse nulle jusqu'à la vitesse nominale montre que le flux est constant dans cette région. Au-delà de la vitesse nominale, le flux diminue avec la désexcitation automatique. (figure 24).

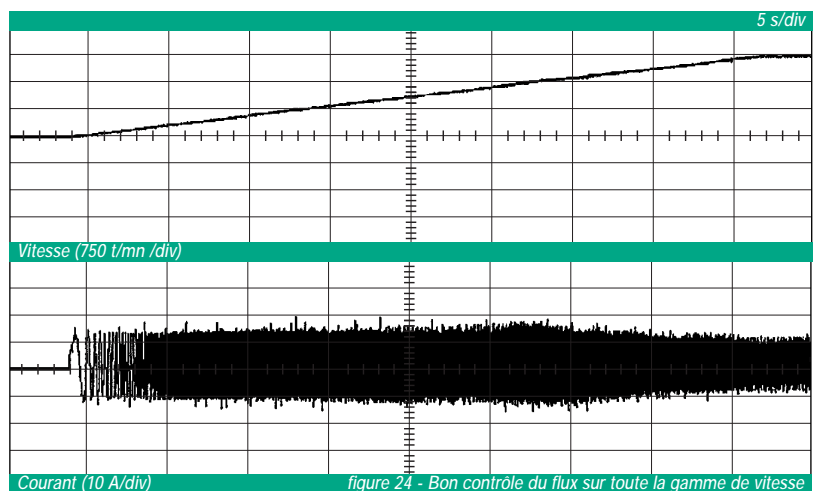


figure 24 - Bon contrôle du flux sur toute la gamme de vitesse

### Tenue en couple à 33 Hz

La figure 25 montre le comportement en régime dynamique : accélération à vide à 1 000 t/mn puis à-coup de charge nominale et délestage. On voit que le glissement est bien compensé, car il n'y a pas d'erreur statique. Le module du courant augmente car, en plus du courant magnétisant, la composante active monte avec le couple.

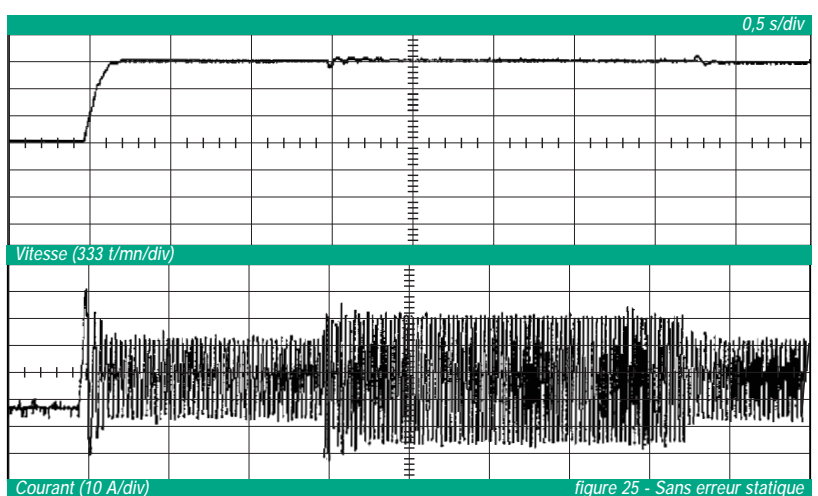


figure 25 - Sans erreur statique

### Reprise à la volée

La commande vectorielle, en dehors de l'amélioration de la qualité de l'entraînement, permet aussi d'obtenir d'autres fonctions annexes de manière plus performantes (figure 26). Par exemple, la fonction reprise à la volée permet de reprendre le contrôle d'un moteur en pleine rotation. Le moteur étant coupé, sa vitesse diminue. Afin de reprendre le contrôle sans

surintensité il faut connaître la vitesse et la position du flux pour pouvoir se synchroniser. Grâce à la structure de la commande, il est possible d'estimer la vitesse et le flux alors que le moteur n'est plus alimenté. On remarque ici que la coupure a duré plus de 5 secondes. Autrement dit l'estimation de la vitesse a pu se faire alors qu'il ne reste qu'un faible flux rémanent dans la machine.

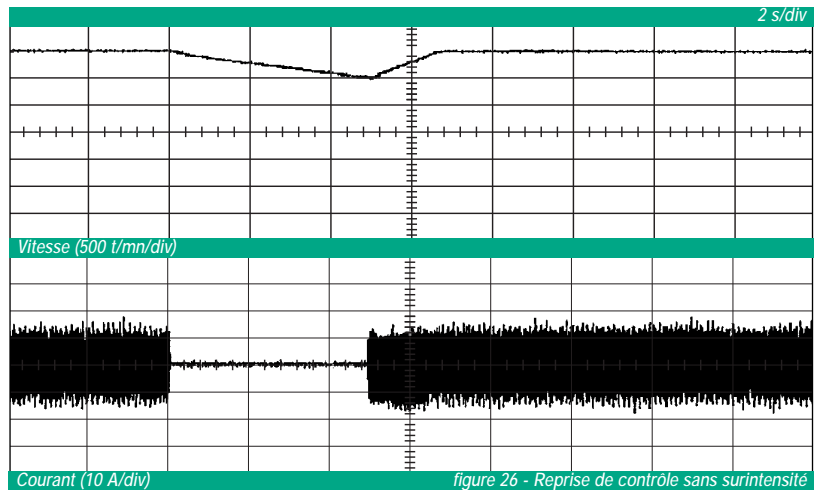


figure 26 - Reprise de contrôle sans surintensité

### Diagramme couple-vitesse

Ce diagramme couple-vitesse illustre le fonctionnement dans les 4 quadrants : moteur et génératrice dans les 2 sens de marche. Avec le courant limité à 1,5 fois le courant nominal, on obtient plus de

1,4 fois le couple nominal, et ceci jusqu'à 1 Hz. En génératrice, le couple est encore plus élevé (ici c'est le système de charge qui est limité). Le diagramme est pratiquement le même qu'avec un moteur courant continu ceci sans capteur de vitesse (figure 27).

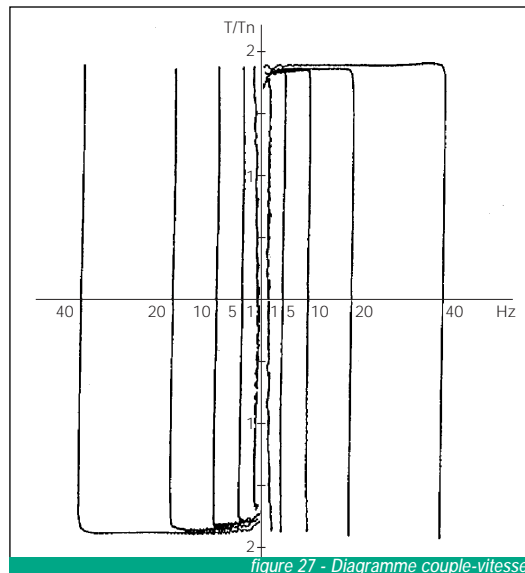


figure 27 - Diagramme couple-vitesse

# Applications

## Choix des lois de commande

Les besoins sont très variés dans le domaine des entraînements. Ils vont des applications simples telles que l'entraînement des pompes, ventilateurs, jusqu'à des applications nécessitant des performances dynamiques ainsi que des plages de vitesse très étendues. Les lois de commande, décrites dans ce qui précède, permettent d'atteindre des niveaux de performances très différents, et couvrent aujourd'hui la plus grande partie des applications, à l'exception des commandes d'axes des machines-outils et de robots, réservées aux solutions "brushless". Le tableau figure 28 résume les différences essentielles entre les 3 types de contrôle et indique les applications les plus courantes accessibles par chaque type de contrôle. Par ailleurs, les avantages des convertisseurs de fréquence, par rapport aux solutions "moteur à courant continu" se retrouvent dans chacun des cas, ceci pour des puissances allant au-delà de 500 kW :

- inversion du sens de marche par inversion du champ tournant (inversion statique de deux phases par le variateur),
- possibilité de fonctionner au-delà de la vitesse nominale, en faisant varier la fréquence seule au-delà de

la vitesse nominale,

- un surcouple important pendant les régimes transitoires, allant jusqu'à 2 Cn, indépendamment de la vitesse de fonctionnement et de la puissance en jeu.

Le principal critère permettant de différencier les 3 types de contrôle est la gamme de vitesse exigée par l'application.

glissement des CVF\* permettent d'obtenir un écart de vitesse plus faible par rapport à la consigne. S'il s'agit d'un CVF avec capteur (codeur incrémental 1 024 points/tour par exemple) la précision statique atteindra 0,01 % de la vitesse nominale sans aucune dérive en fonction de la température et des variations du réseau, si la

à-coup préjudiciable à la charge et à la mécanique. A chaque contrôle correspond un certain nombre d'applications typiques. La liste n'est pas exhaustive, et la solution indiquée ici est à vérifier au cas par cas en fonction du cahier des charges particulier à la machine. Une application se définit toujours à partir de la

la puissance nominale du moteur (courant permanent) et surtout du couple maximal à transmettre. A ceci correspond le courant maximal à fournir, en considérant que ce courant doit rester inférieur au courant de limitation du variateur de façon à éviter tout phénomène de saturation qui ne permettrait plus d'assurer un bon suivi de vitesse. Il faut aussi rappeler qu'en cas de surcharge au-delà de ce courant, la vitesse chute, mais le rapport U/F est maintenu constant de façon à préserver le couple disponible, ce qui peut permettre de trouver un autre point de fonctionnement, et de revenir à la vitesse affichée après disparition de la surcharge.

lois de commande	gamme de vitesse	précision de vitesse	couple à l'arrêt	applications
convertisseurs de fréquence E/F	1 à 10 1 à 20	± 1%	non	pompes centrifuges - ventilateurs - compresseurs convoyeurs - transporteurs à bande - extracteurs agitateurs - broyeurs - presses (volant)
contrôle vectoriel de flux sans capteur	1 à 100	± 1%	non	pompes doseuses levage/manutention machines à cycles machines d'emballage et de conditionnement
contrôle vectoriel de flux avec capteur	1 à 100	± 0,01%	oui	levage lourd manutention automatisée avec positionnement précis amenage de presse

figure 28 - Convertisseurs de fréquence pour moteurs asynchrones - Lois de commande

Cette plage de vitesse concerne toutes les vitesses pour lesquelles le couple disponible correspond au besoin de l'application. Autrement dit la chute de vitesse devra rester acceptable lors de l'application de la pleine charge. Ceci s'exprime par la précision statique qui peut être estimée à  $\pm 1\%$  de la vitesse nominale pour les systèmes sans capteur. Toutefois les systèmes de compensation de glissement du contrôle E/F et les estimateurs de

consigne est numérique. Dans ce cas il est possible aussi d'obtenir le couple maximal à l'arrêt. Il est donc possible de tenir la charge sur un mouvement vertical. On appelle cela le «zéro électrique» qui est utile en levage lorsque la vitesse de positionnement doit être inférieure au 1/20 de la vitesse maximale, pour respecter les impératifs de précision du positionnement. Dans les deux premiers cas, le frein mécanique sera géré par le variateur de façon à éviter tout dévirement et tout

mécanique et des impératifs de fonctionnement. Il faudra connaître les couples résistants et entraînants en fonction de la vitesse, les inerties et les accélérations/décélérations imposées, qui définiront les couples d'accélération et de freinage. Pour les machines à cycles rapides, ces notions peuvent influencer sur le rapport de réduction à prévoir en vue d'optimiser le moteur en couple et en vitesse. Le choix du moteur découle donc toujours de la cinématique et celui du variateur ne dépend que de

\* CVF : Contrôle Vectoriel de Flux.

## Ventilateurs et pompes

Les gammes de vitesses sont généralement très faibles (1 à 3) pour obtenir la pleine variation de débit. La variation de vitesse se généralise sur ces applications, l'intérêt principal étant, outre une simplification des installations, le potentiel d'économie d'énergie très important que représente la suppression des systèmes à perte de charge, sur le budget d'exploitation. Sur 100 % de la consommation électrique des moteurs industriels, 63 % correspondent à la circulation des fluides. L'EDF et l'Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) qui orchestrent actuellement une campagne

La figure 29 récapitule et compare la puissance appelée par les différents procédés de réglage.

Du point de vue économie d'énergie, ils peuvent être classés, du meilleur au moins bon :

- angle des pales d'un ventilateur axial réglable en marche (essentiellement à basse vitesse),
- vitesse de rotation variable (elle n'est plus désormais qu'électronique),
- inclineurs à l'aspiration,
- registre au refoulement.

Du point de vue coût d'achat et d'installation, du plus bas au plus élevé, le classement est approximativement :

- registre,
  - inclineurs,
  - vitesse de rotation variable,
  - pales réglables.
- L'économie d'énergie

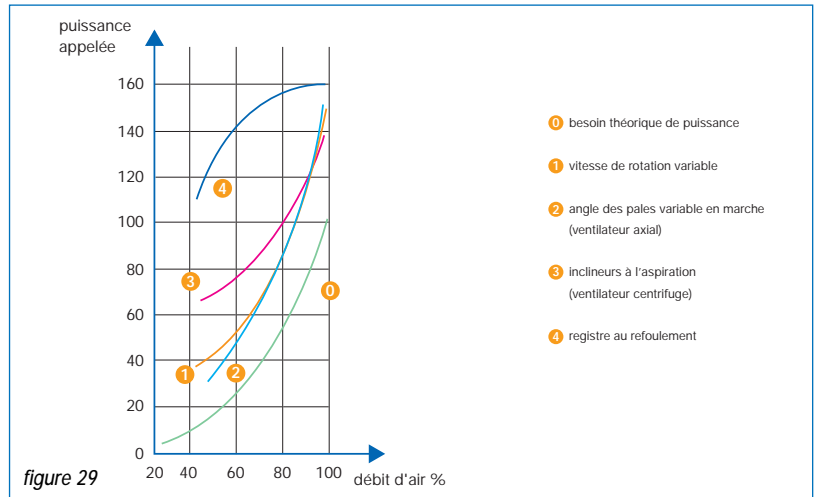


figure 29

Prenons l'exemple d'une pompe. La figure 30 représente la courbe (AC) des pertes de charge d'un réseau sur le diagramme débit/pression. Les courbes caractéristiques de la machine sont représentées pour 2 vitesses différentes.

Pour faire passer le débit de 1 (valeur nominale) à 0,7 il y a 3 méthodes possibles :

- by pass : le point de fonctionnement reste le point A,
- par vannage, à vitesse constante de la pompe : le point de fonctionnement se déplace de A à B,
- par variation de vitesse : le point de fonctionnement se déplace de A à C.

Généralement les exemples de calculs de temps de retour sur investissement permettent de conduire à un amortissement en moins de 2 ans. Pour faire ce calcul, il faut connaître les caractéristiques précises des machines, les conditions de fonctionnement ou

hypothèses d'étude à retenir, la différence de coût d'investissement, quand elle existe, le type de contrat EDF à appliquer, etc. Notre logiciel ECO 6 permet rapidement de faire une estimation.

Des lois de commande bien adaptées à la courbe de couple de ces machines ( $C = kN^2$ ) permettent sur les variateurs actuels d'optimiser le courant par rapport au couple demandé, réalisant 5 % d'économie supplémentaire.



d'information et de promotion concernant la «Maitrise de la demande d'électricité», estiment que les économies réalisables sont de l'ordre de 30 % à chaque fois qu'il y a variation de débit. Dans le cas des ventilateurs, différentes solutions existent pour adapter le débit.

correspond à la différence des puissances appelées. Le diagramme débit/hauteur ou débit/pression met cette économie encore plus en évidence. Les courbes sont similaires pour les ventilateurs et les pompes.

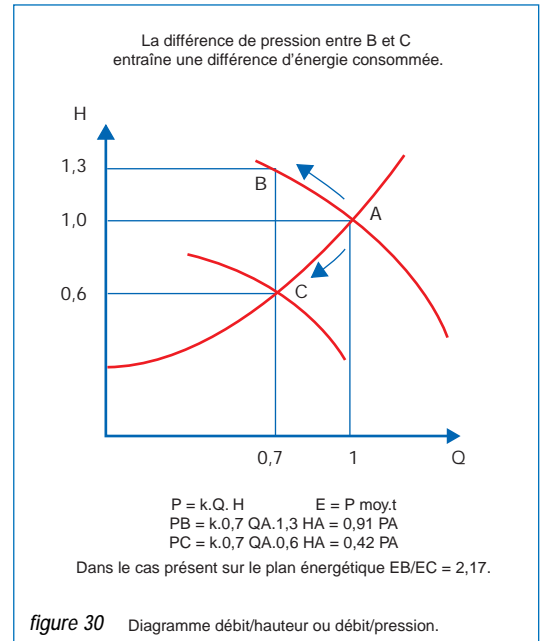


figure 30 Diagramme débit/hauteur ou débit/pression.

## Manutention

Ces systèmes concernent tous les transferts de pièces d'un point à un autre. Ils doivent se faire à une vitesse ou dans un temps imparti, avec un positionnement manuel ou automatique, qui répond aussi aux critères du cahier des charges en termes de précision et de rapidité de positionnement. Les positionnements les plus simples se font à partir d'une vitesse d'approche réduite. Celle-ci peut être donnée par un moteur à deux vitesses ou un palier de vitesse plus faible donné par le variateur du moteur asynchrone. Par contre si le positionnement doit être rapide et précis, ce palier de basse vitesse doit être éliminé. Une répétitivité suffisante peut être obtenue par une rampe de décélération pré-réglée. Une boucle de position (carte d'axe et capteur) sera nécessaire pour obtenir une bonne précision. Notre expérience dans l'industrie automobile



permet de synthétiser les solutions sur les diagrammes figures 31 et 32. Citons l'exemple de l'ascenseur-descenseur pour l'industrie automobile. Il permet de mettre en valeur l'intérêt du CVF sans capteur. Dans ce cas particulier, le but est de monter une voiture du niveau 1 au niveau 2 afin de poursuivre d'autres opérations de montage. Sur ces applications, le problème principal réside dans le positionnement à chaque niveau. C'était le domaine du moteur à deux vitesses, mais avec une mécanique plus complexe, et des frais de maintenance élevés. La vitesse variable a permis d'apporter à la fois une plus grande souplesse, une meilleure flexibilité, des cadences plus élevées ainsi qu'une meilleure fiabilité en minimisant les contraintes mécaniques. Des gains sont apparus à la mise en route, puisque la machine a pu être réglée simplement avec les réglages «standard» du produit. Le variateur s'est chargé d'intégrer, par la mesure, les paramètres nécessaires à ses algorithmes, et par l'intermédiaire de son contrôleur de flux permanent, les a optimisés au cours de son fonctionnement. Les gains à l'exploitation sont évidents, la variation de vitesse et le contrôle du

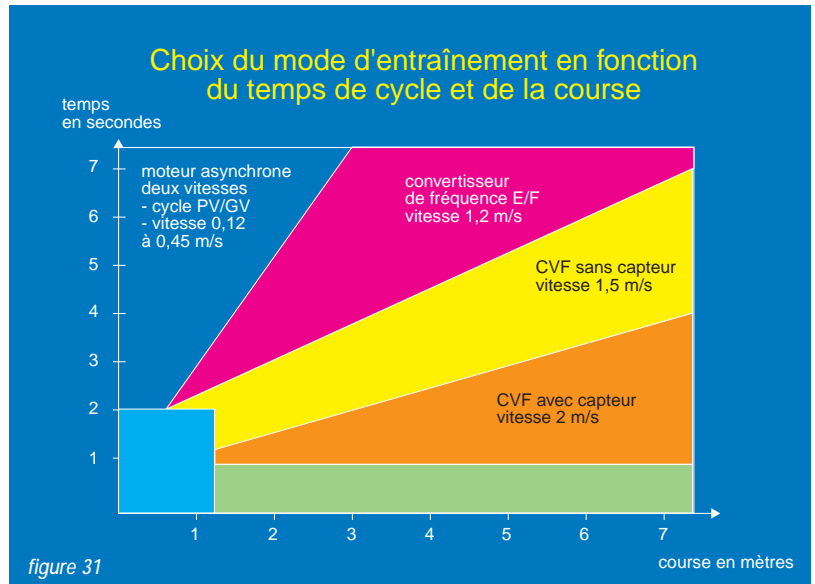


figure 31

couple dans les phases d'accostage ayant pérennisé la mécanique. D'autres gains peuvent être induits par l'autoprotection liée au produit. Les gains de productivité

sont également importants, puisque dans l'industrie automobile, le temps de cycle constitue le critère principal. Si une meilleure stabilité est obtenue en phase d'accostage, les

phases de petite vitesse peuvent être réduites, entraînant une diminution du cycle de 20 % et augmentant d'autant les cadences de passage sur l'ascenseur-descenseur.

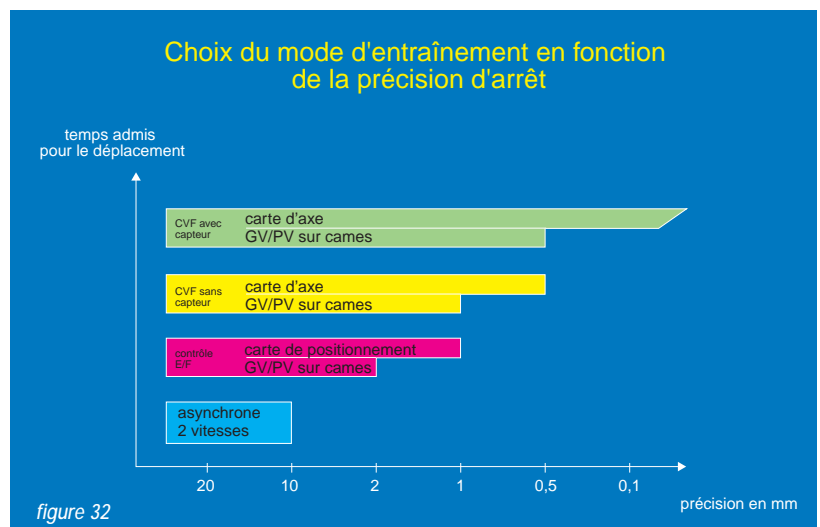


figure 32



Afin d'illustrer la stabilité obtenue, la figure 33 présente ce que l'on peut obtenir en terme de courant, en phase de décélération, avec une commande scalaire standard et avec une commande vectorielle sans capteur. Sur une commande scalaire, en phase d'accostage, apparaissent d'importantes instabilités de courant qui provoquent des à-coups mécaniques générateurs d'usures notables et qui empêchent un positionnement précis.

Avec une commande vectorielle sans capteur, le passage de grande à petite vitesse, visible sur la phase élargie de la sinusoïde, assure une complète stabilité qui autorise, de faire du positionnement avec un moteur totalement standard.

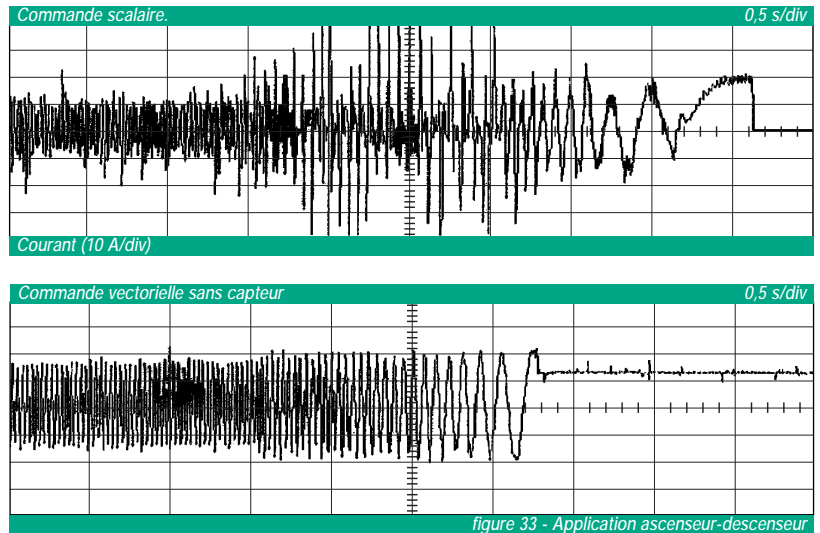


figure 33 - Application ascenseur-descenseur

## Levage

De façon générale le positionnement est manuel mais les qualités requises des systèmes seront essentiellement rapidité et souplesse d'utilisation, avec par conséquent une parfaite maîtrise de la charge aux basses vitesses, voire jusqu'à l'arrêt. Les systèmes à CVF sans capteur peuvent être utilisés généralement jusqu'à des puissances importantes (plusieurs centaines de kW), mais des critères de souplesse (notion de couple à l'arrêt) et de sécurité (contrôle de la vitesse réelle) font préférer la solution avec capteur. Le CVF avec capteur est nécessaire aussi sur les systèmes automatiques où la précision de positionnement demandée est très importante.

Pour éviter le balancement de la charge, les rampes en «S» (dérivée de l'accélération et de la décélération constante) peuvent suffir sur les ponts-roulants à l'abri des perturbations extérieures. En extérieur les portiques portuaires avec des vitesses

de déplacement élevées (2 m/s à vide, 1 m/s en charge) exigent un contrôle de l'angle que prend la charge par rapport à la verticale (système SWAYTEL). Le système corrige la vitesse du mouvement de translation.



Nous ne parlerons pas ici des nombreuses fonctionnalités «métier» qu'il est directement possible de programmer maintenant sur les variateurs de vitesse. C'est aussi ce qui différencie les produits catalogués, car pour les **moteurs asynchrones standard**, le CVF sans capteur tend à se généraliser, ceci sans surcoût.

Le meilleur contrôle du couple est nécessaire pour l'utilisation des basses vitesses. Il permet aussi d'optimiser le courant, ce qui est utile pour les pompes et ventilateurs.



## Les 2 techniques

Contrôle U/F ou E/F  
Contrôle scalaire  
Contrôle Vectoriel de Tension  
Vector Voltage Control  
Vector Pulse Modulation

### Contrôle en tension

- Evaluation de la charge
- Evaluation de la résistance statorique
- Boost manuel / automatique
- Loi E/F autoadaptative

Tous les contrôles sont PWM Sinus ou MLI Sinus

Contrôle vectoriel de flux  
avec ou sans capteur  
Field Oriented Control  
Moteur Asynchrone Autopiloté  
Flux Vector Control

### Contrôle en courant

- Estimateur de glissement
- Reconnaissance des paramètres moteurs (Stator et Rotor)

figure 01

# Le contrôle MLI

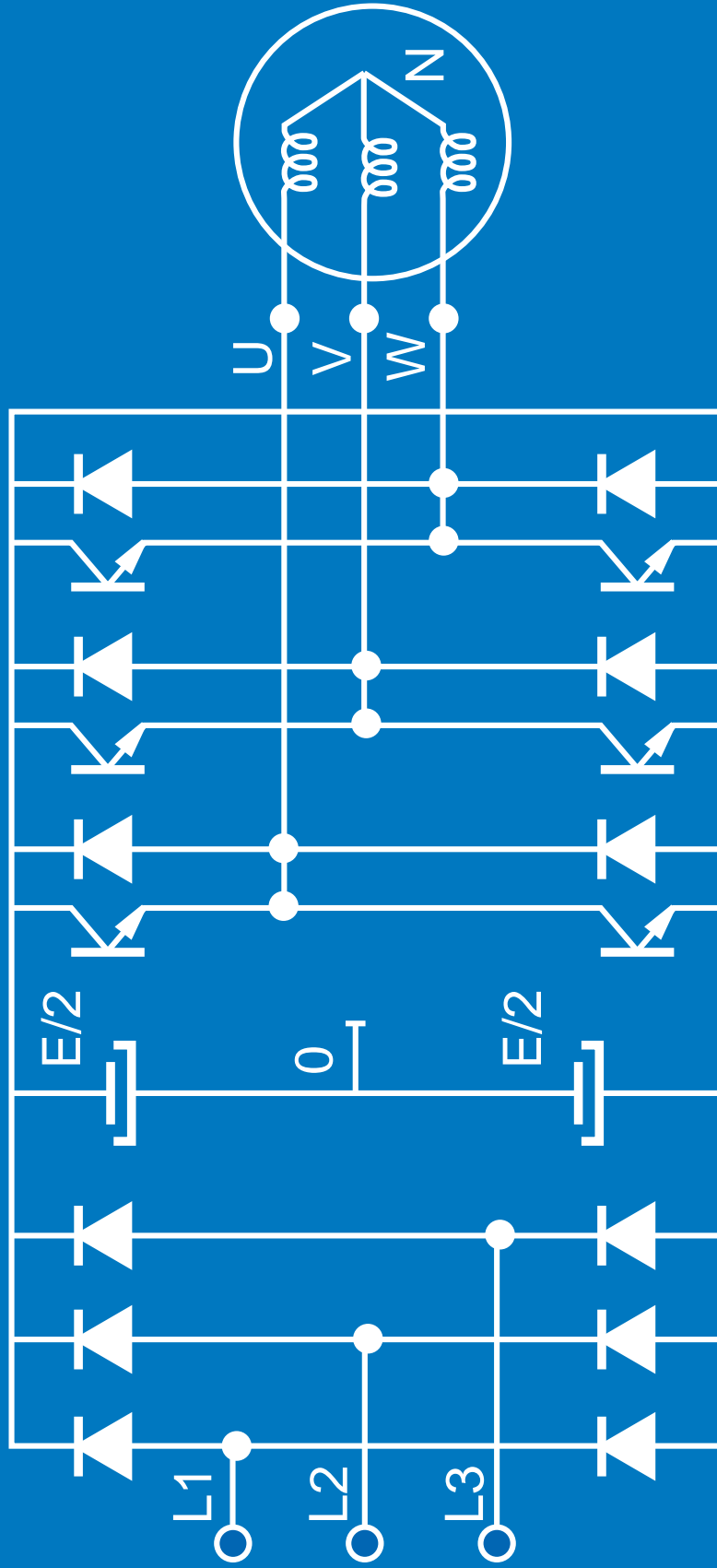


figure 02

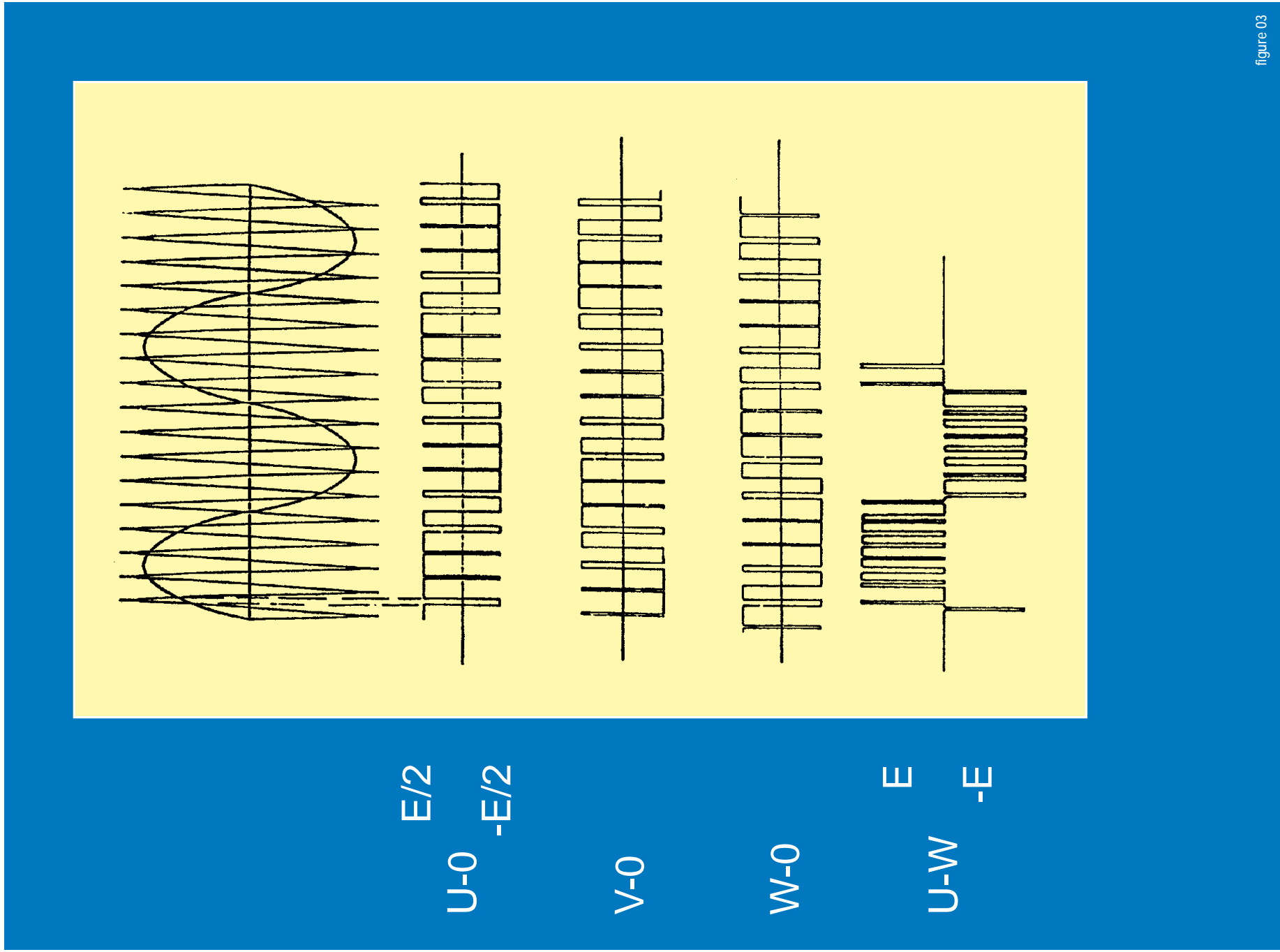


figure 03

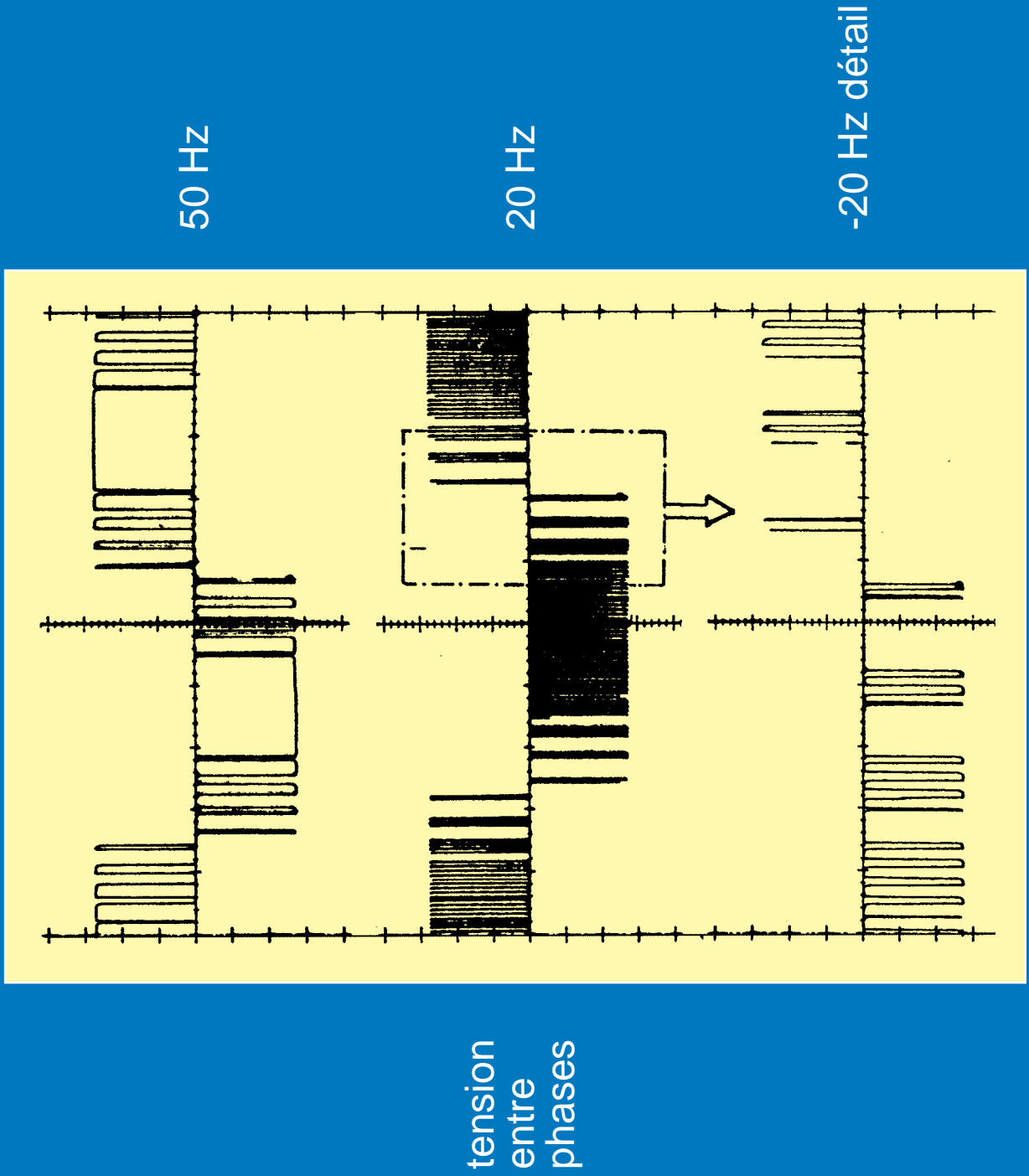


figure 04

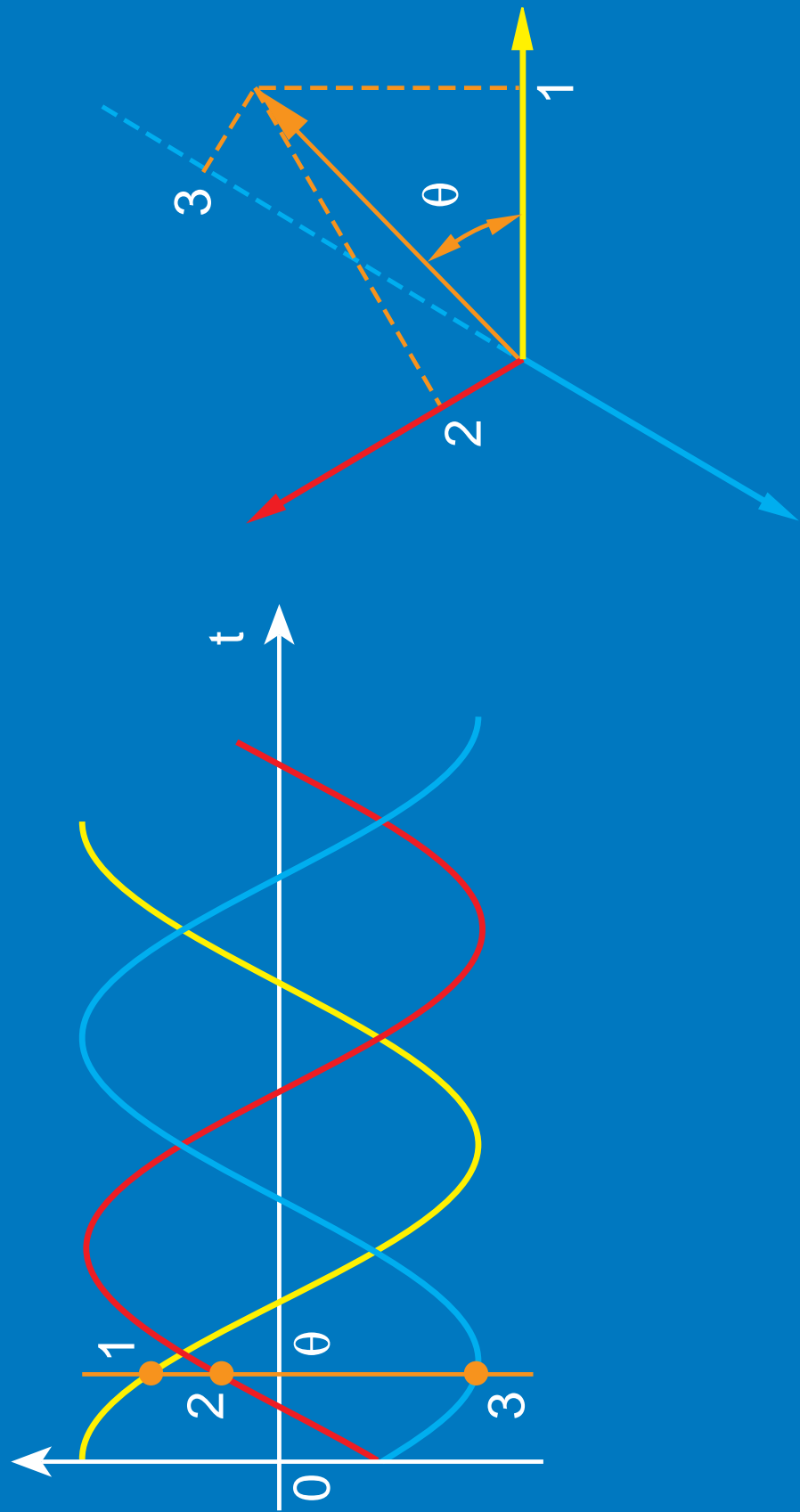


figure. 05

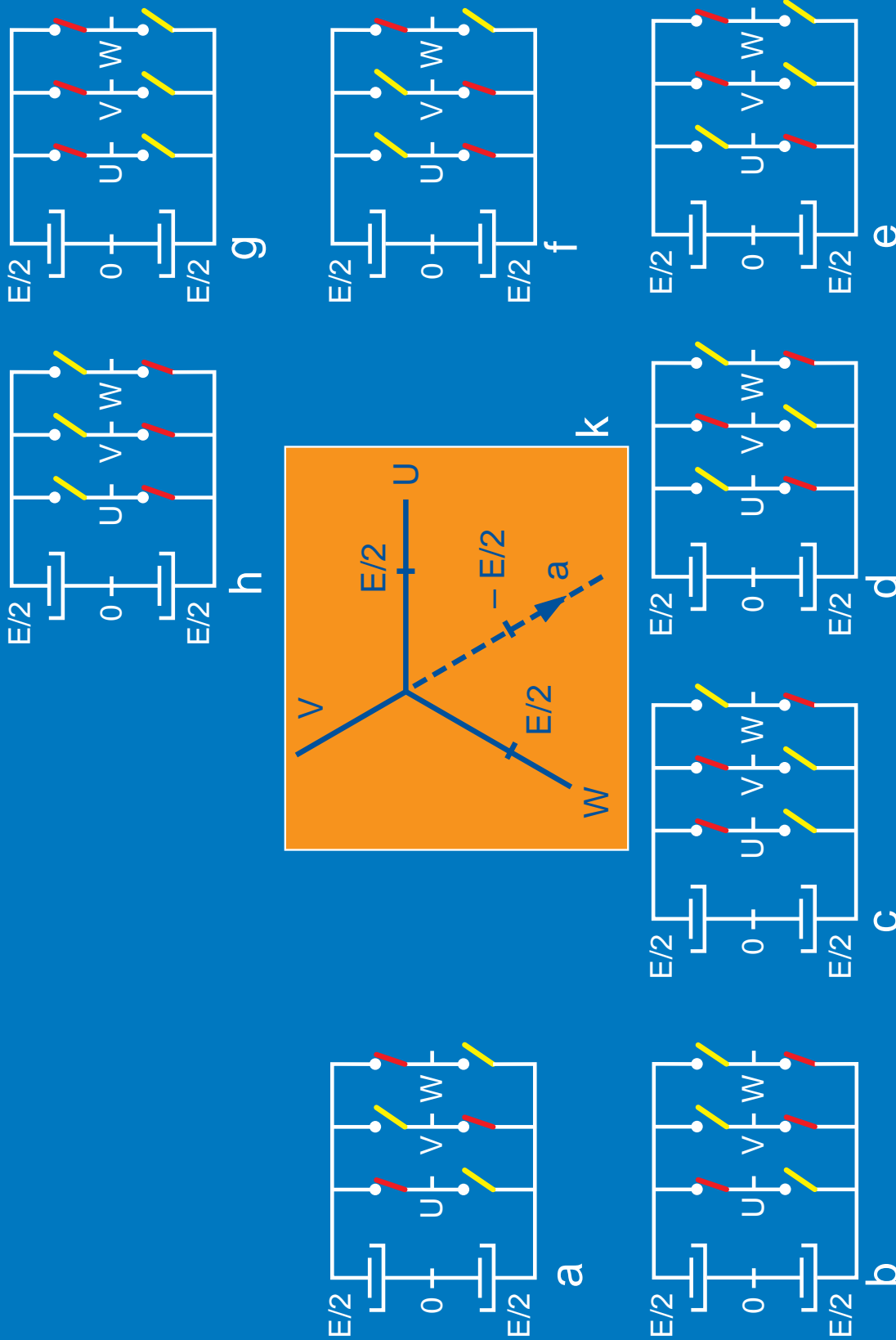


figure 06

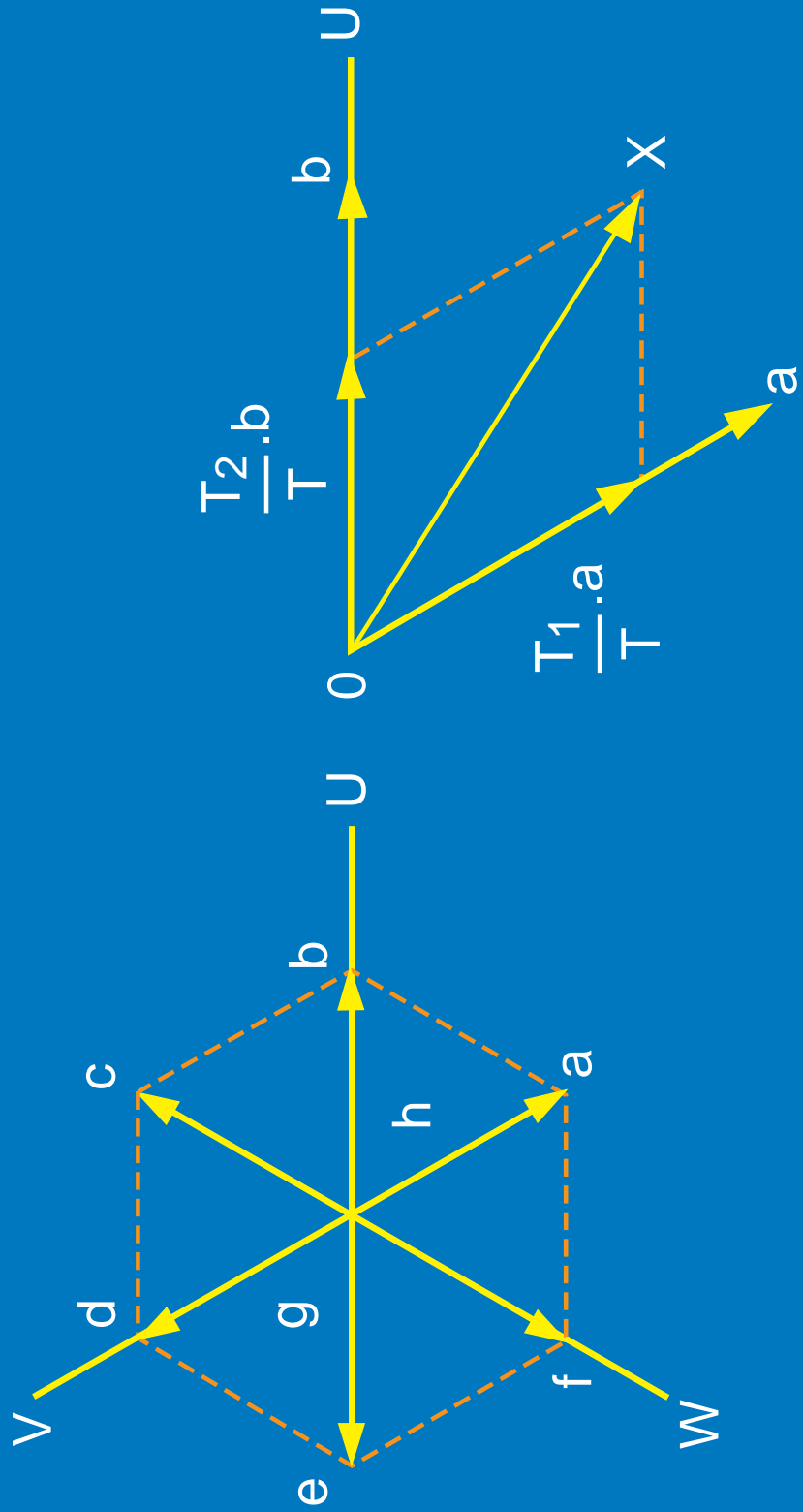


figure 07

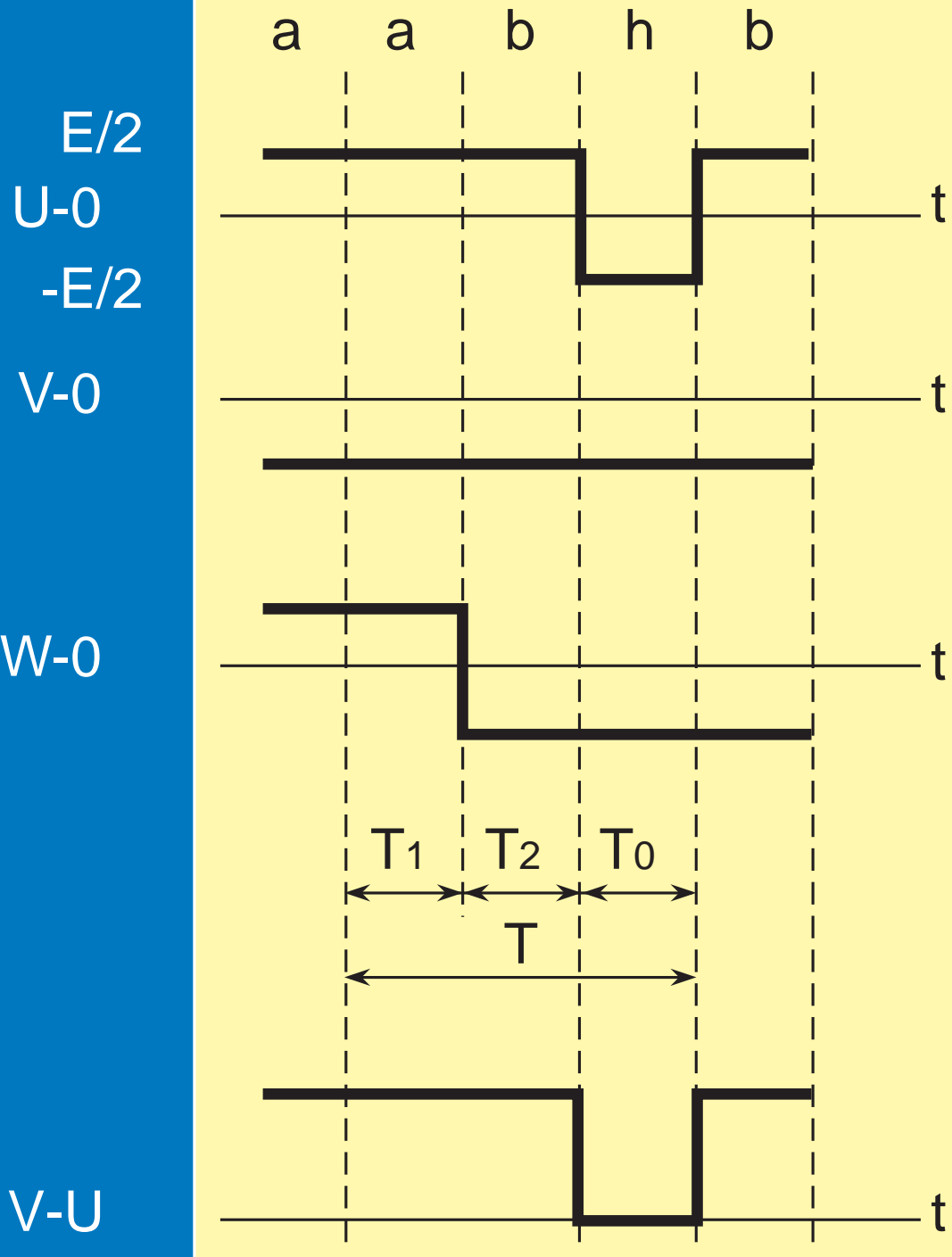
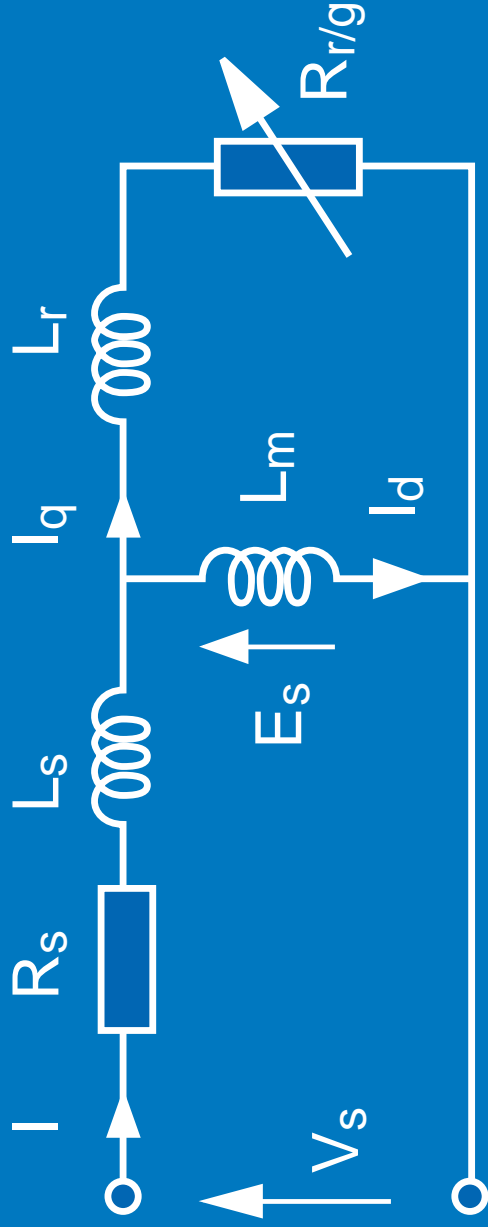


figure 08



# Le schéma équivalent du moteur asynchrone



$L_s$  = inductance de fuite statorique

$R_s$  = résistance statorique

$L_m$  = inductance mutuelle, inductance magnétisante

$R_r$  = résistance rotorique

$L_r$  = inductance de fuite rotorique

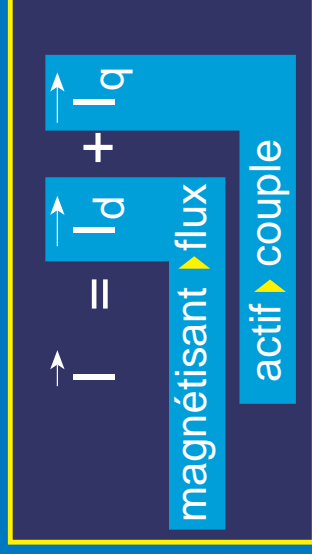
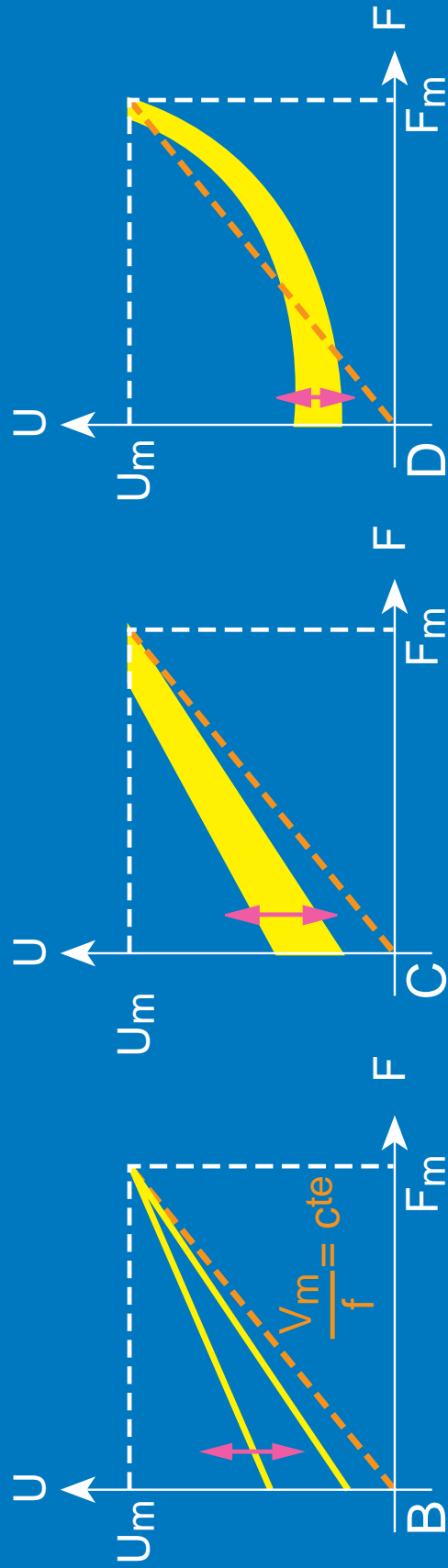
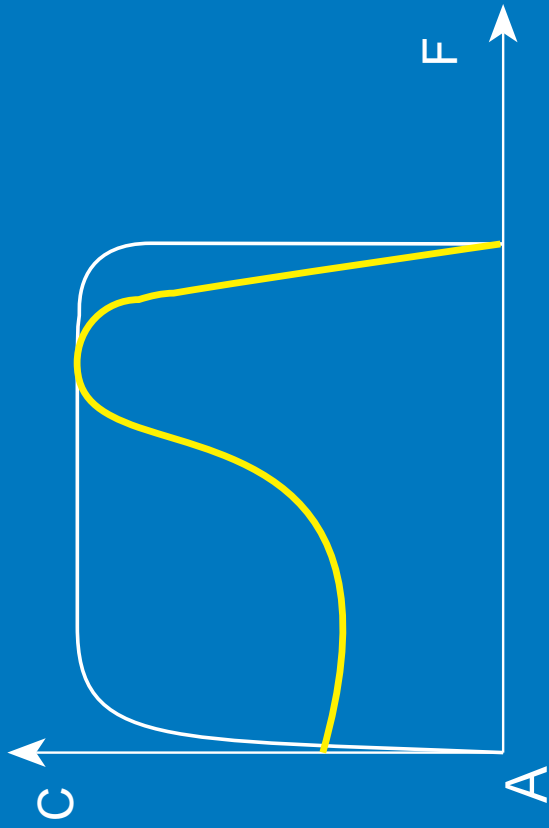


figure 09

- Adaptation en fréquence
- Compensation de glissement
- Compensation RI automatique
- Couple indépendant de U réseau



Loi U/F adaptée à l'application

figure 10

# Le contrôle vectoriel de flux

Analogie entre les moteurs continus et alternatifs

Loi de Laplace

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

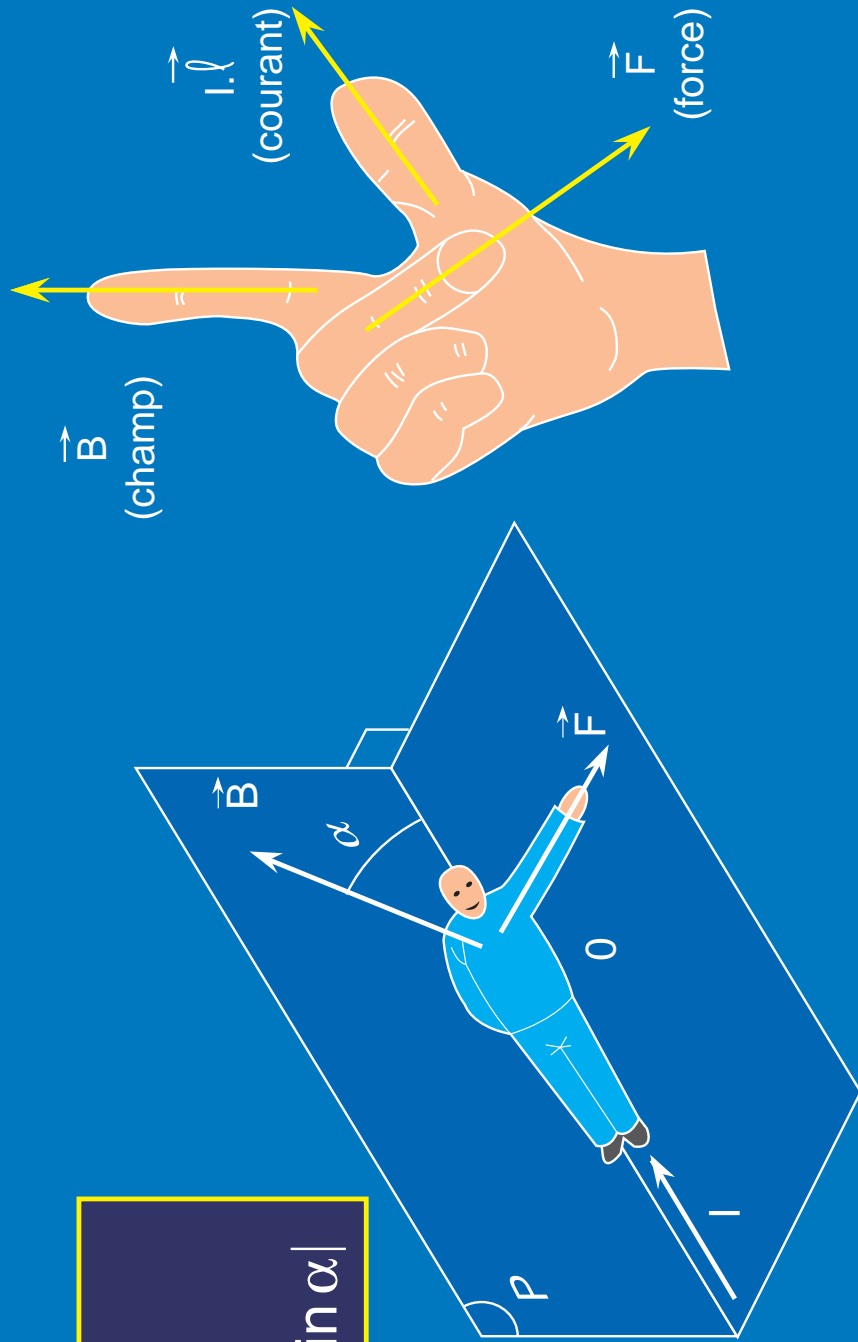


figure 11

# Le moteur à courant continu

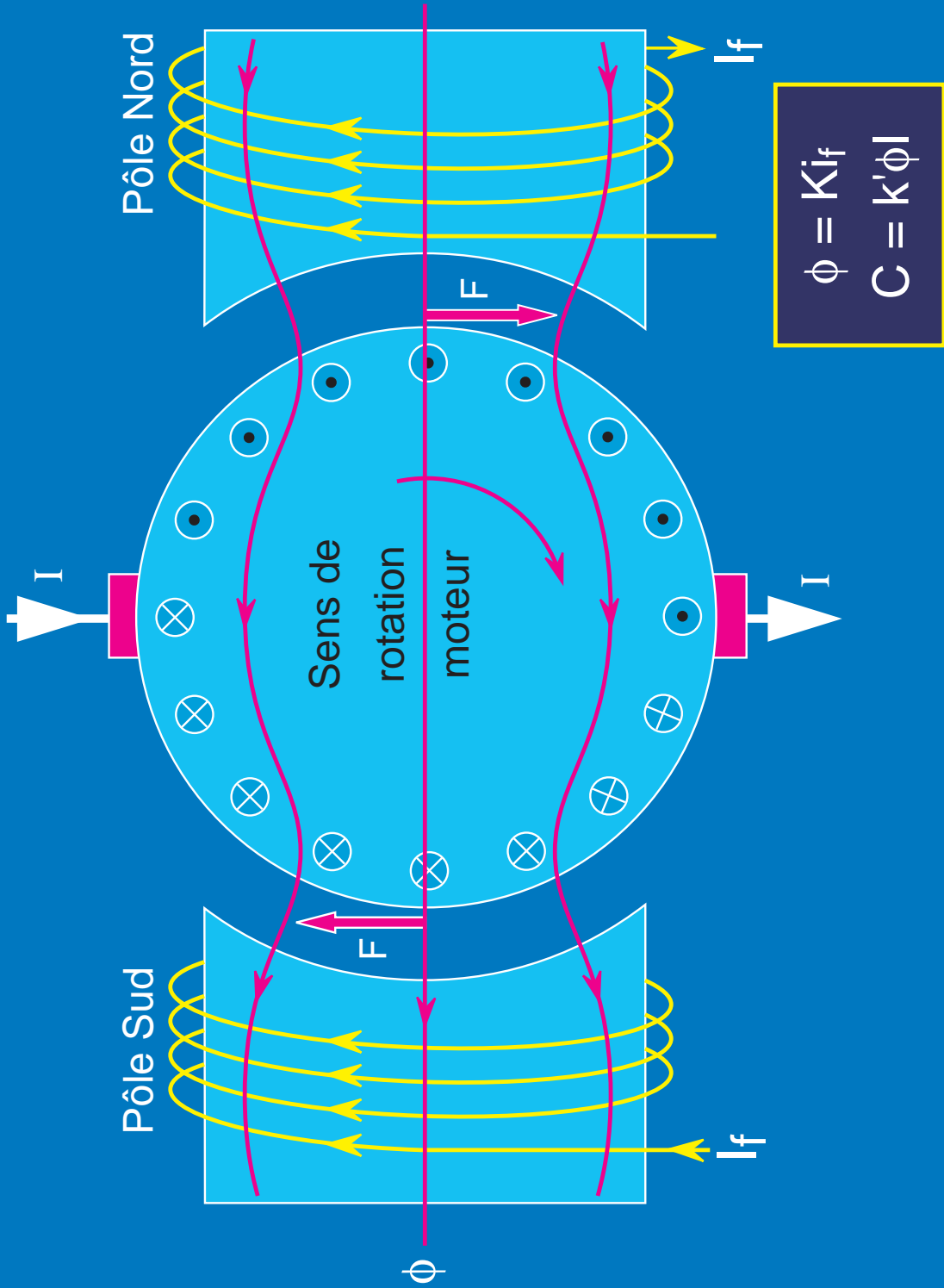
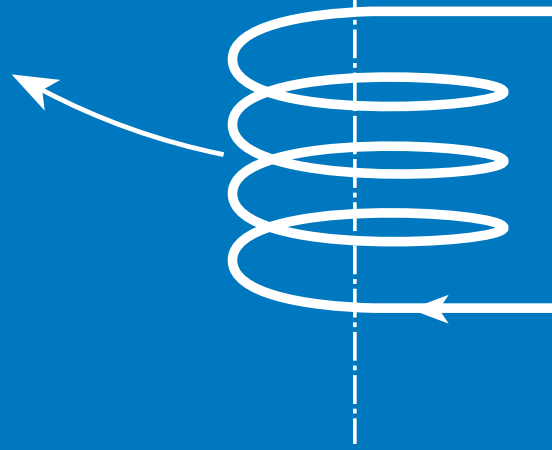
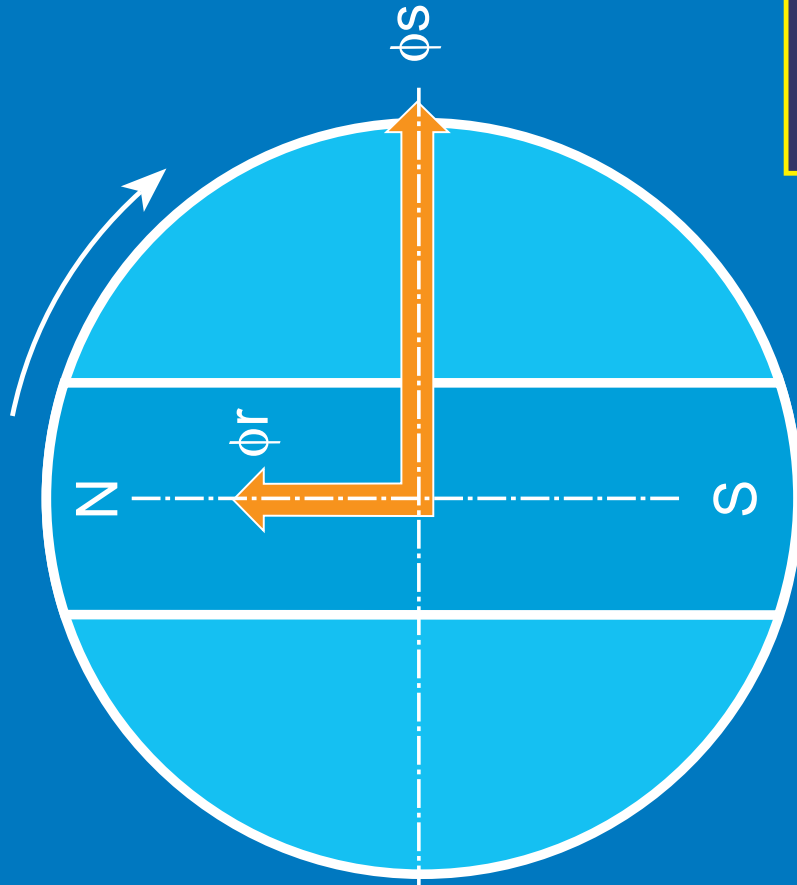


figure 12

# Le moteur synchrone autopiloté



I stator

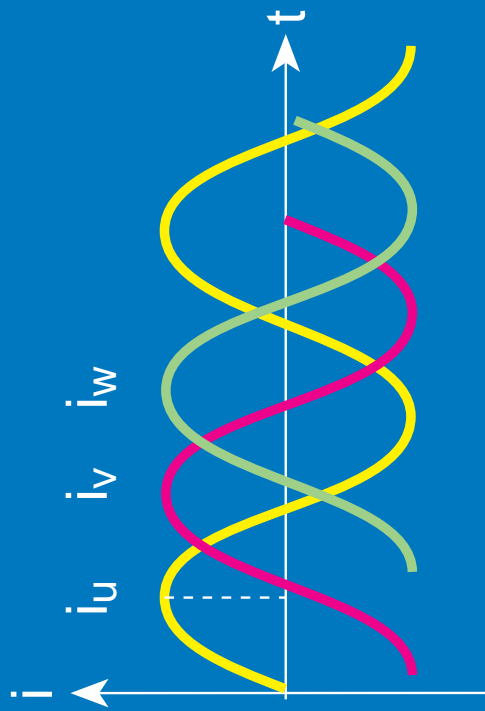


$$C = k \phi_r I_s$$

figure 13

# Le moteur asynchrone

Machine asynchrone élémentaire  
 stator triphasé et rotor à cage



$$C = k g U_s^2$$

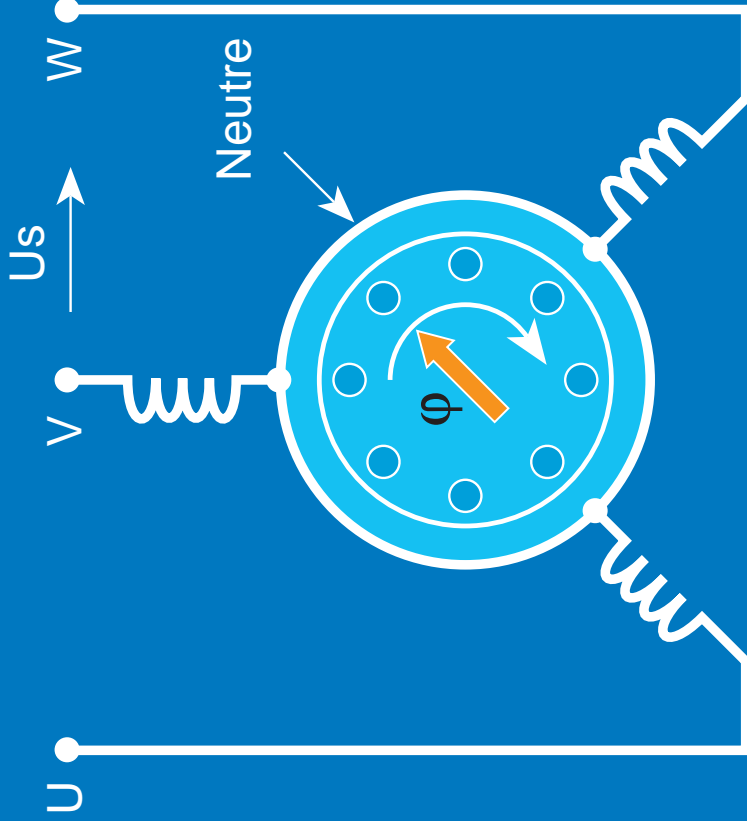
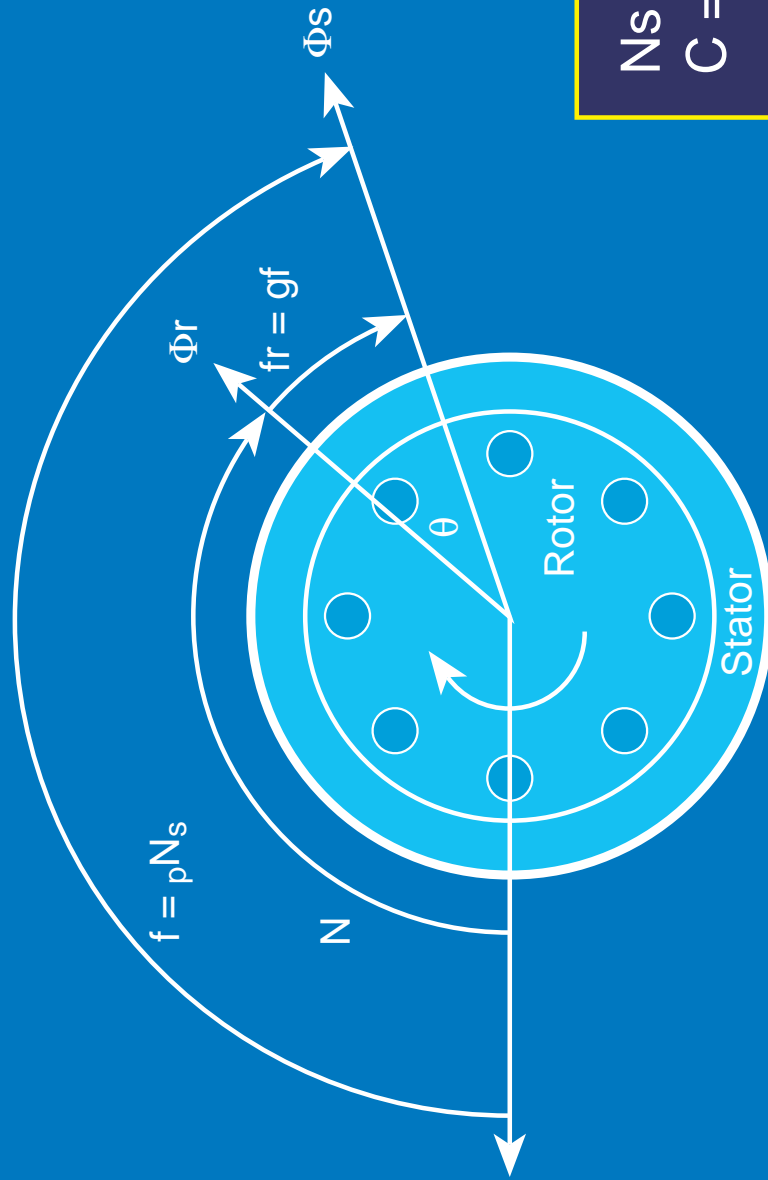


figure 14

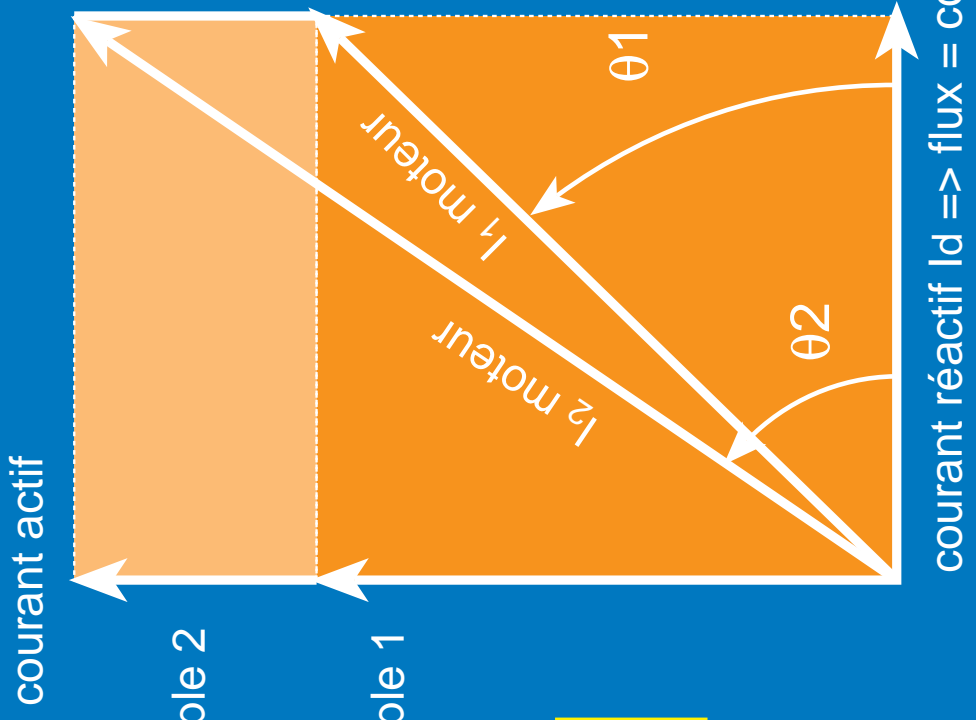
# Le moteur asynchrone champs statorique et rotorique



$$N_s = N + g N_r$$
$$C = k \Phi_s \Phi_r \sin \theta$$

figure 15

# La somme vectorielle



$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

figure 16



# Le moteur équivalent biphasé

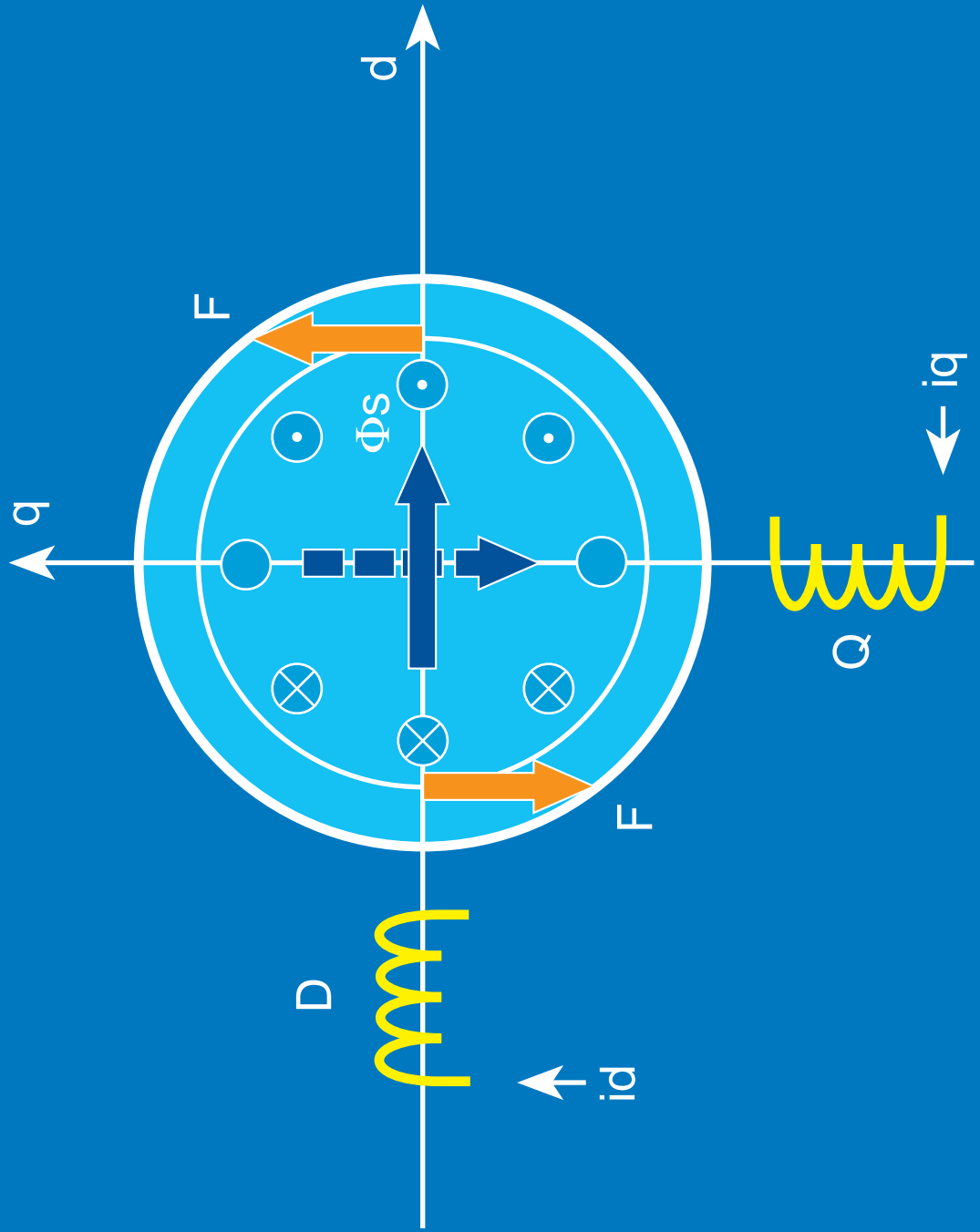


figure 17

# La transformation de Park

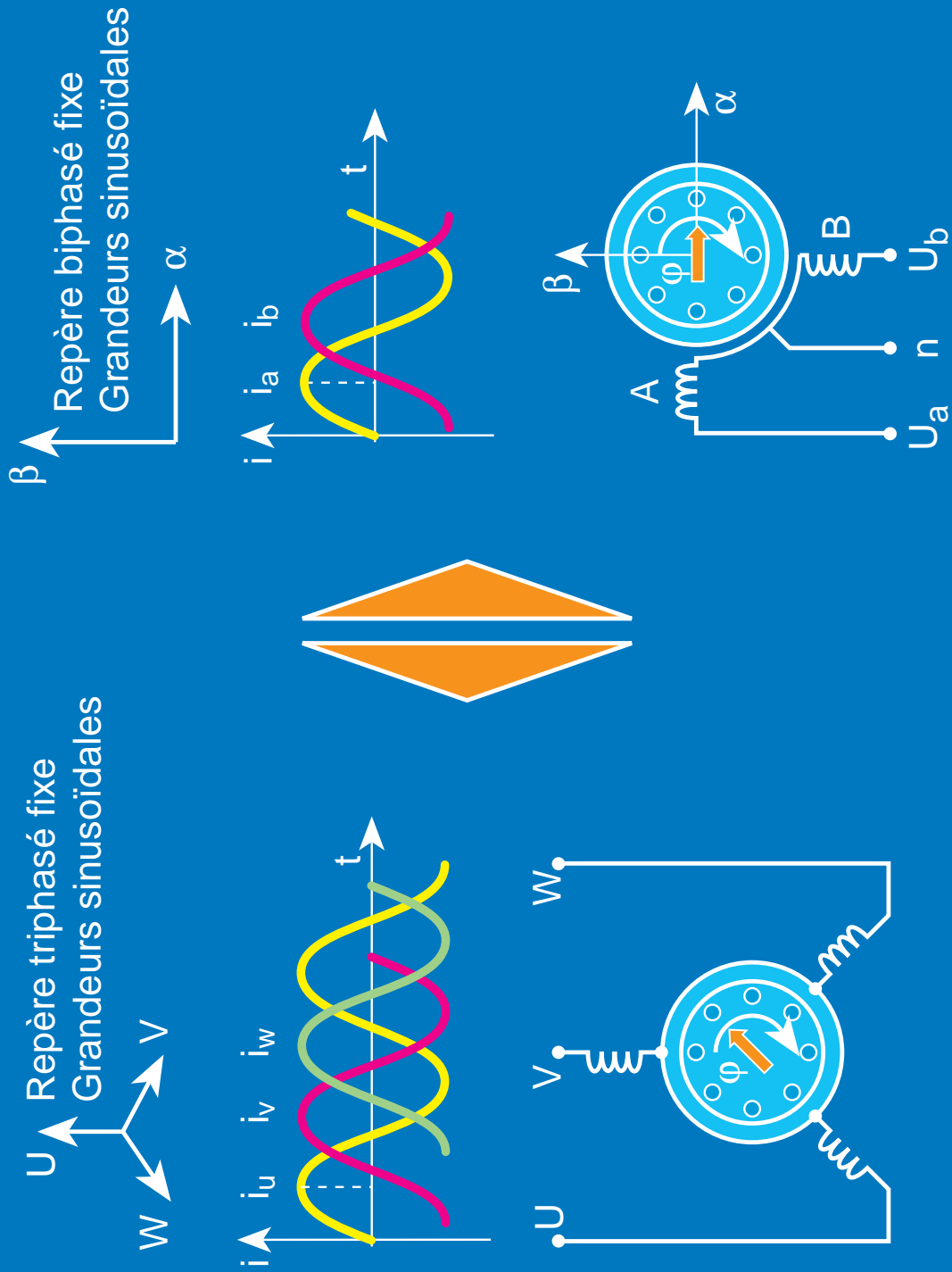


figure 18

# La transformation de Park

Le pilotage vectoriel

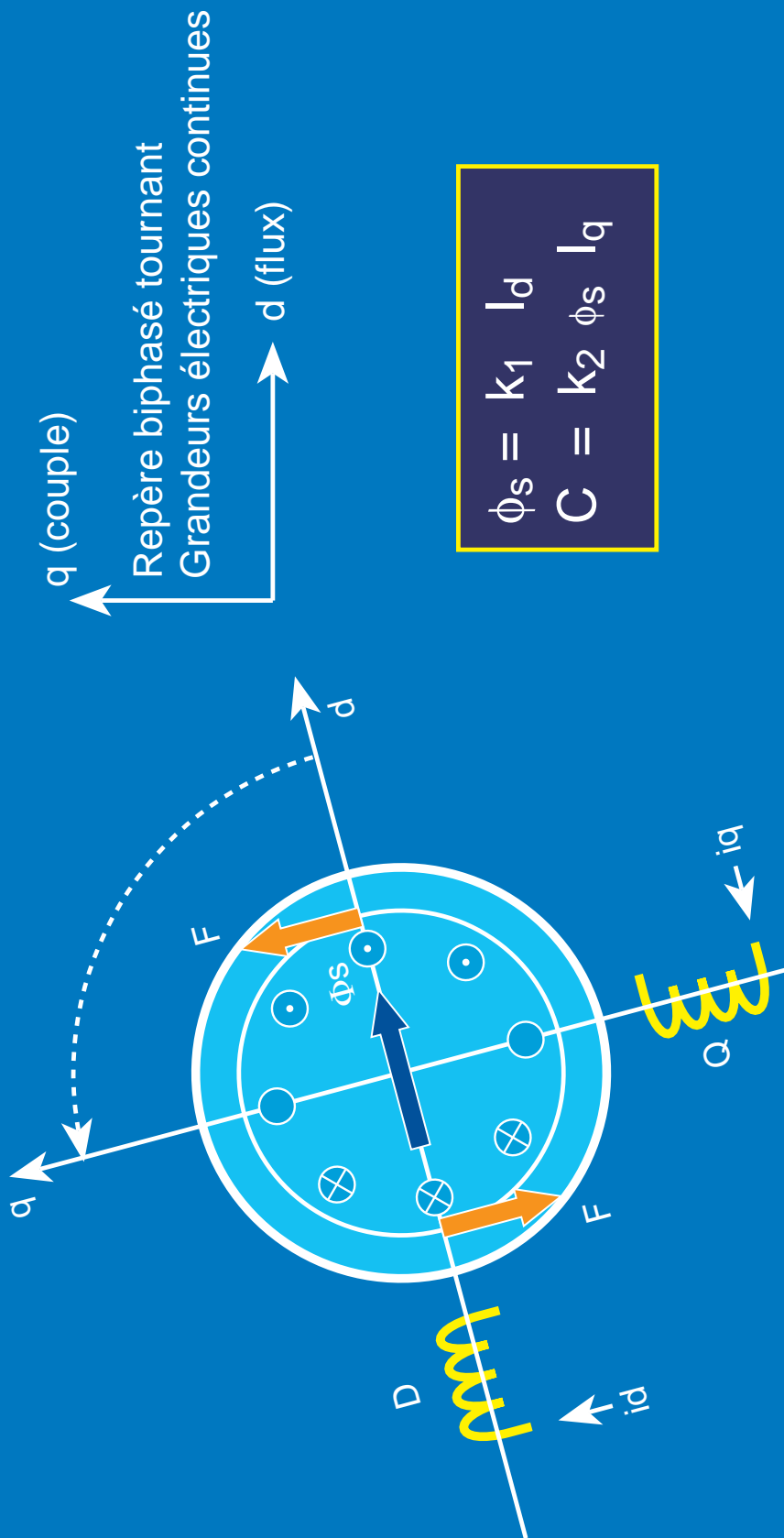


figure 19

# L'algorithme type d'une commande vectorielle

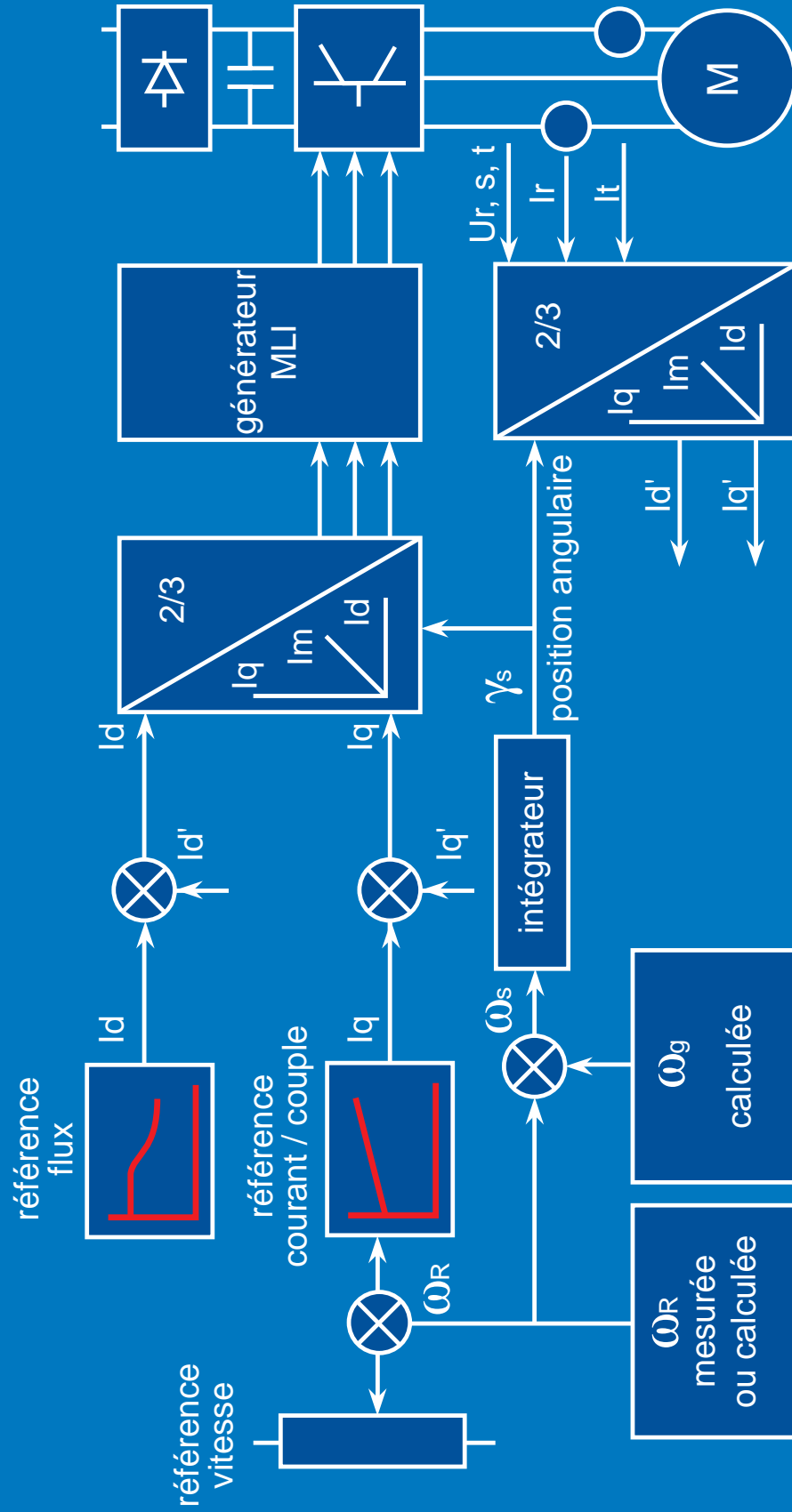


figure 20

# Choix du mode d'entraînement en fonction du temps de cycle et de la course

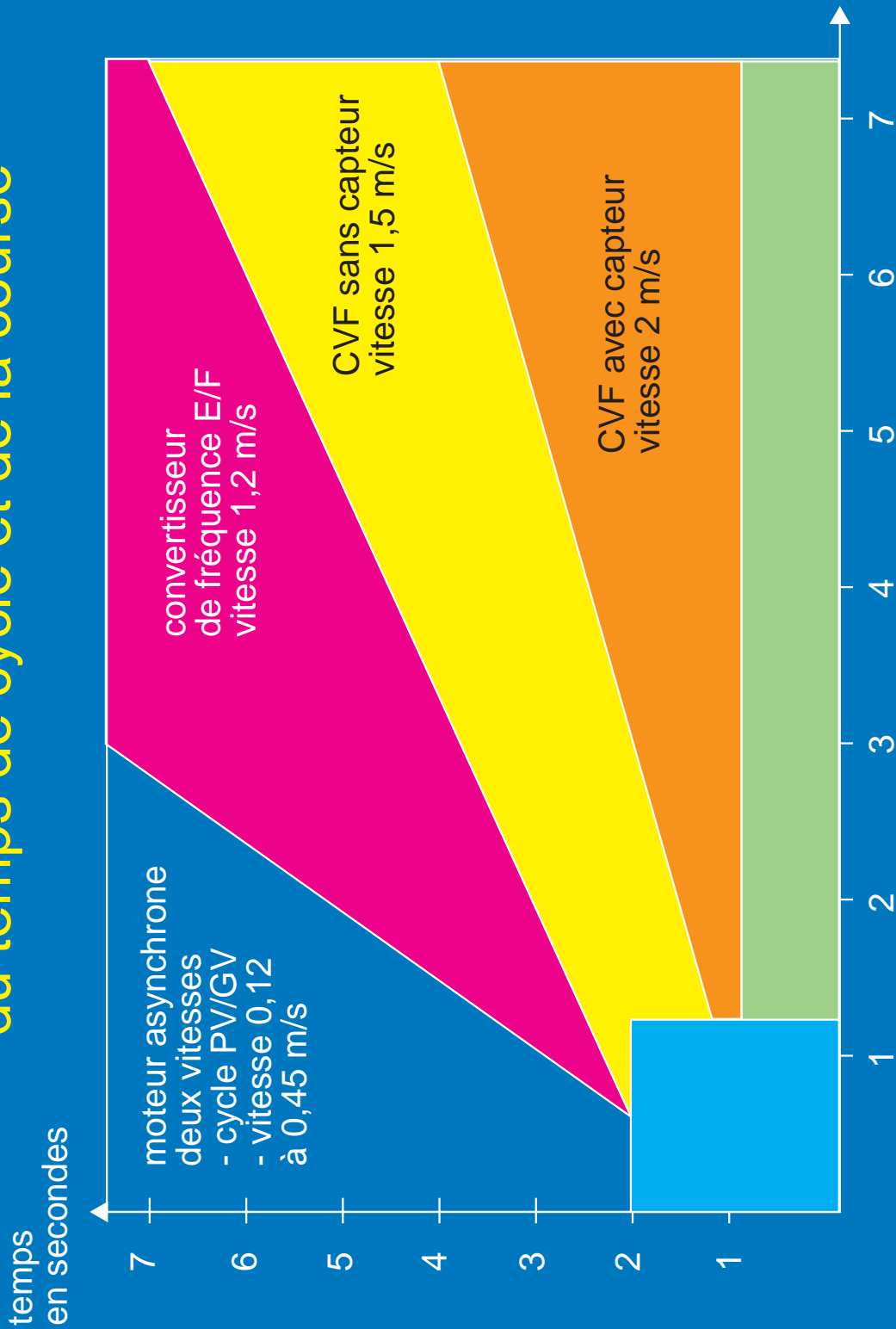


figure 31

# Choix du mode d'entraînement en fonction de la précision d'arrêt

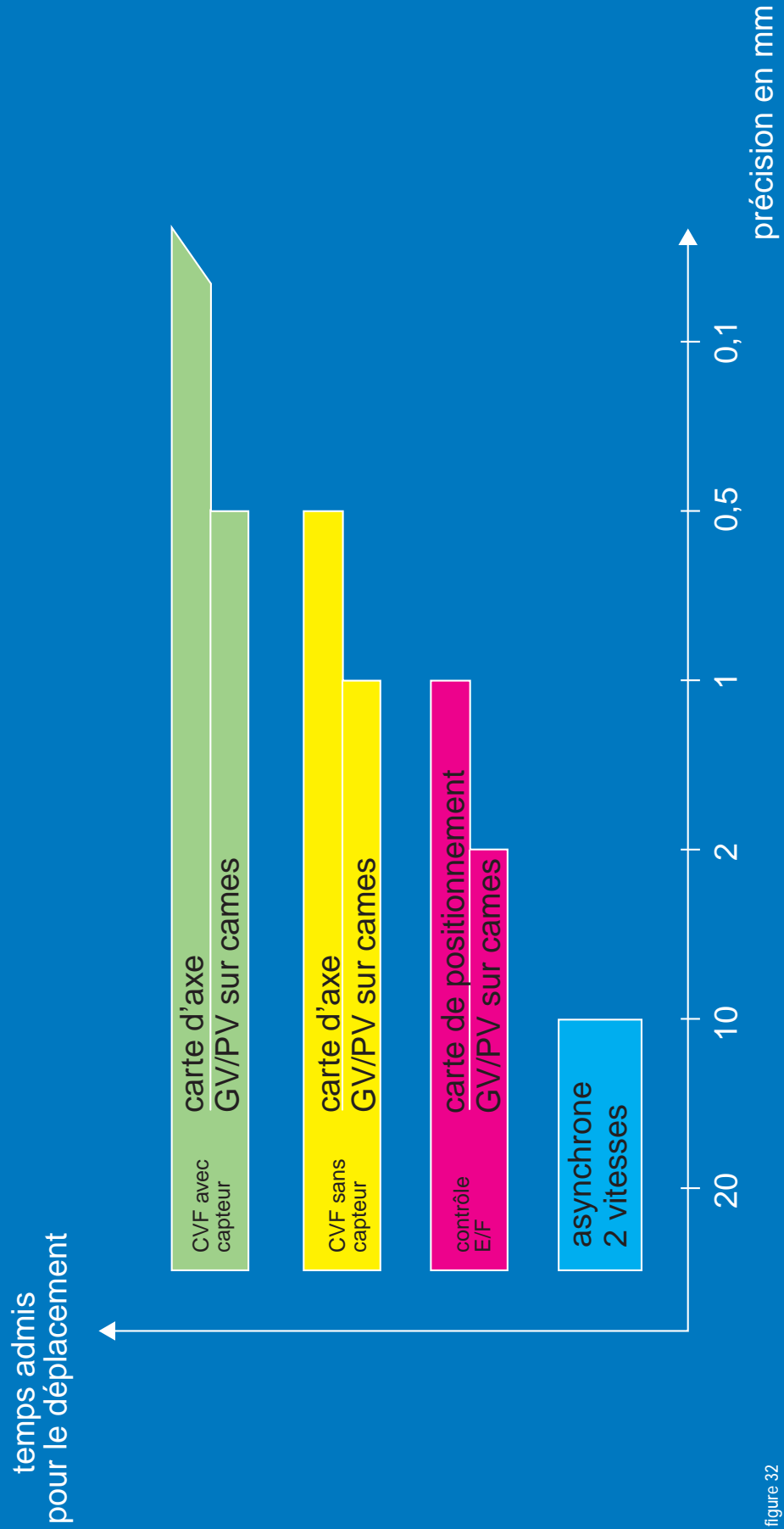


figure 32