

Démarrage des moteurs asynchrones

Ce travail a pour but d'exposer au lecteur les problèmes posés par le démarrage des moteurs asynchrones (partie A) et les principes des solutions adoptées (partie B).



A) Position du problème

Un entraînement électromécanique est constitué :

- d'un moteur électrique alimenté par un démarreur via un réseau basse tension,
- d'un accouplement,
- d'une machine.

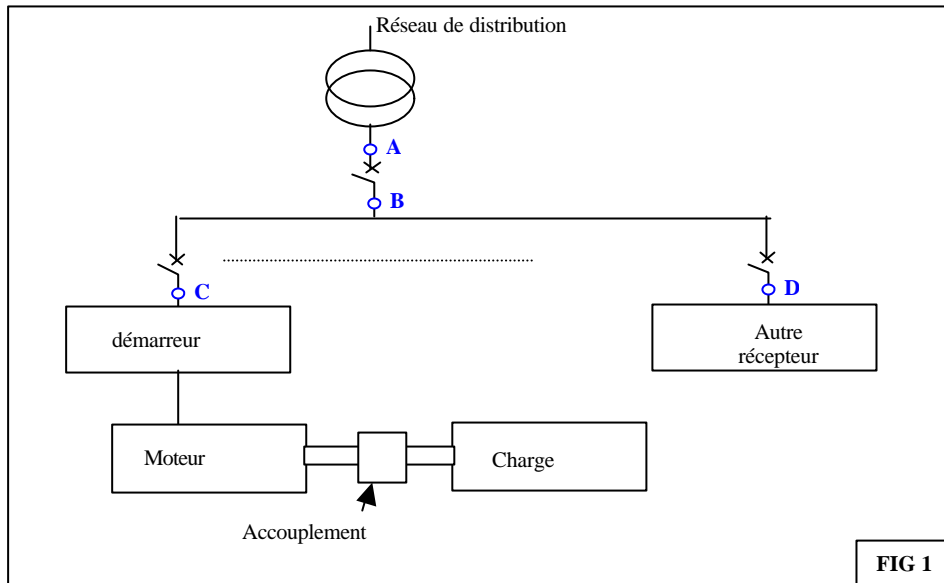


FIG 1

La vitesse angulaire Ω de l'arbre moteur est régie par l'équation $J \frac{d\Omega}{dt} = C_{moteur} - C_{résistant}$ avec :

J : moment d'inertie des parties tournantes,

C_{moteur} : couple délivré par le moteur,

$C_{résistant}$: couple résistant dû à la charge.

Le terme $\frac{d\Omega}{dt}$ représente la variation de la vitesse ($\frac{d\Omega}{dt} > 0$: accélération, $\frac{d\Omega}{dt} < 0$: décélération). On appelle souvent le terme $C_{moteur} - C_{résistant}$ couple d'accélération que l'on note $C_{acc} = C_{moteur} - C_{résistant}$.

En régime permanent le moteur doit entraîner en rotation la machine à son point de fonctionnement nominal : $C_{moteur} = C_{résistant}$, il n'y a pas d'accélération : $\frac{d\Omega}{dt} = 0$.

Au démarrage il faut accélérer ($\frac{d\Omega}{dt} > 0$). Le couple d'accélération C_{acc} doit être positif donc le couple moteur au démarrage doit être supérieur au couple résistant : $C_{moteur} > C_{résistant}$.

Un couple d'accélération important correspond à un démarrage de courte durée, mais l'ensemble mécanique entraîné peut subir un « à-coup » préjudiciable.

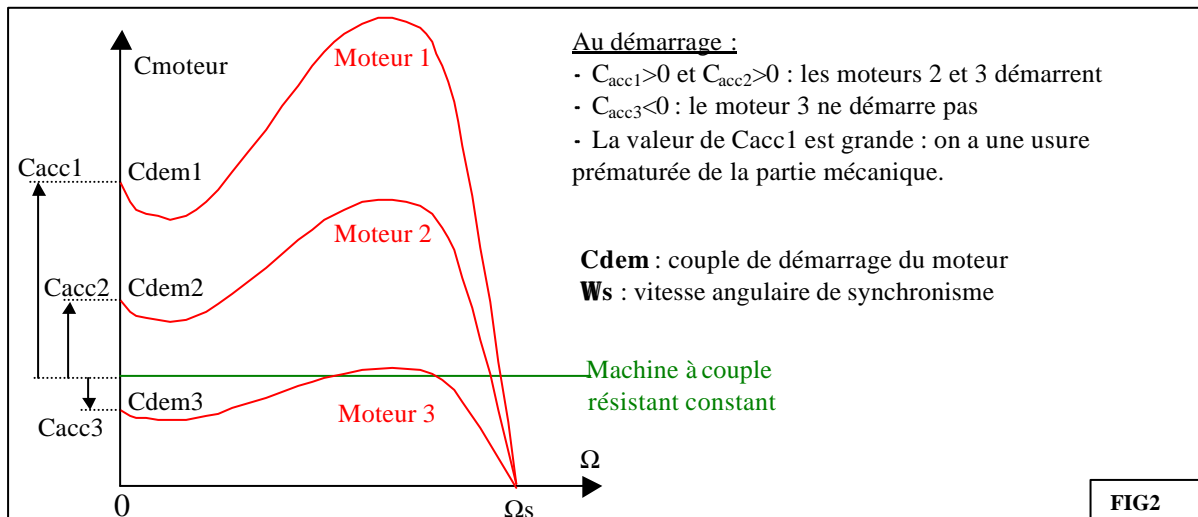


FIG 2

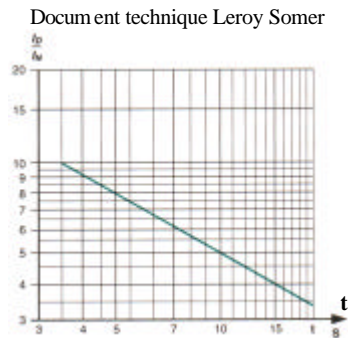
Pendant la phase de démarrage d'une machine, la plage du couple moteur compatible avec un démarrage correct de la charge nécessite un appel de courant important à la mise sous tension (voir annexe 1). Cet appel de courant entraîne :

- **des chutes de tensions supplémentaires** par rapport au régime permanent en deux points (FIG1) :

- en amont du départ moteur (tronçon AB). Celle-ci est perçue par le moteur mais aussi par les récepteurs voisins. Par exemple, si un circuit d'éclairage est connecté au point D, le démarrage d'un moteur au point C peut entraîner une baisse de l'intensité lumineuse sur ce circuit d'éclairage.
- Dans la ligne du moteur (tronçon BC) ; celle-ci est perçue uniquement par le moteur. Par exemple, une chute de tension de 10 % aux bornes du moteur entraîne une perte de couple de 19 % (le couple moteur est proportionnel au carré de la tension d'alimentation), ce qui peut entraîner un blocage du rotor ($C_{\text{moteur}} < C_{\text{résistant}}$) ou un temps de démarrage trop long ($C_{\text{moteur}} > C_{\text{résistant}}$ mais C_{acc} trop faible).

- **des contraintes thermiques** supplémentaires pour le moteur. Les machines sont dimensionnées pour un point de fonctionnement nominal, lors du démarrage il convient de s'assurer que l'échauffement imposé au moteur ne risque pas de le détériorer. C'est-à-dire, qu'il faut s'assurer que le temps de démarrage ne soit pas trop long, compte-tenu de la valeur du courant de démarrage.

- Pour des démarrages à froid, les constructeurs fournissent des abaques :



Temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport ID/IN pour démarrages en partant de l'état froid

- Pour des démarrages fréquents il faut tenir compte de l'évolution de la température des enroulements du moteur et de la classe d'isolation du moteur (voir annexe 3).

En conclusion :

1- A la mise sous tension d'un moteur asynchrone un appel de courant a lieu. On doit s'assurer que le rapport entre le courant de démarrage et le courant nominal (l'installation est prévue pour fonctionner sous ce courant) n'est pas préjudiciable à l'installation.

2- A la mise sous tension le moteur doit délivrer un couple supérieur à celui opposé par la machine entraînée. D'une part, le couple délivré par le moteur doit être suffisamment grand pour que le temps de démarrage ne soit pas trop long ; d'autre part, le couple délivré par le moteur ne doit pas être trop grand pour que l'à-coup de couple n'endommage pas l'ensemble mécanique entraîné.

B) Les deux principes de démarrage d'un moteur asynchrone

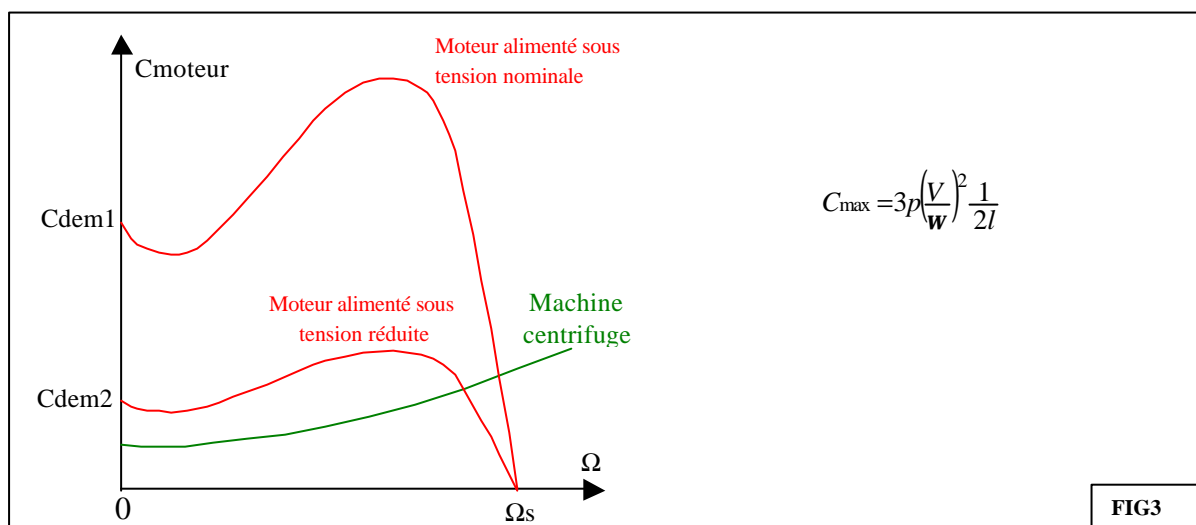
Si l'installation peut supporter l'appel de courant à la mise sous tension du moteur, celui-ci peut être directement couplé sur le réseau ; il démarre sur ses caractéristiques naturelles. Dans le cas contraire, le courant de démarrage doit être limité. Pour cela, on peut agir, pendant la durée du démarrage, sur l'une des deux grandeurs suivantes :

- la tension d'alimentation du moteur (qu'il faudra réduire).
- la résistance des enroulements rotoriques (qu'il faudra augmenter).

Démarrage sous tension réduite

La figure ci-dessous montre l'évolution de la courbe couple-vitesse pour deux valeurs différentes de la tension d'alimentation du moteur. Le couple maximum délivré par le moteur étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, toute diminution de celle-ci entraîne une diminution du couple moteur.

Par conséquent, un démarrage sous tension réduite ne peut s'appliquer qu'à des **machines centrifuges**, c'est à dire des machines dont le couple résistant au démarrage est plus faible que le couple résistant en régime nominal (voir FIG3).



Exemple 1 : démarrage étoile-triangle

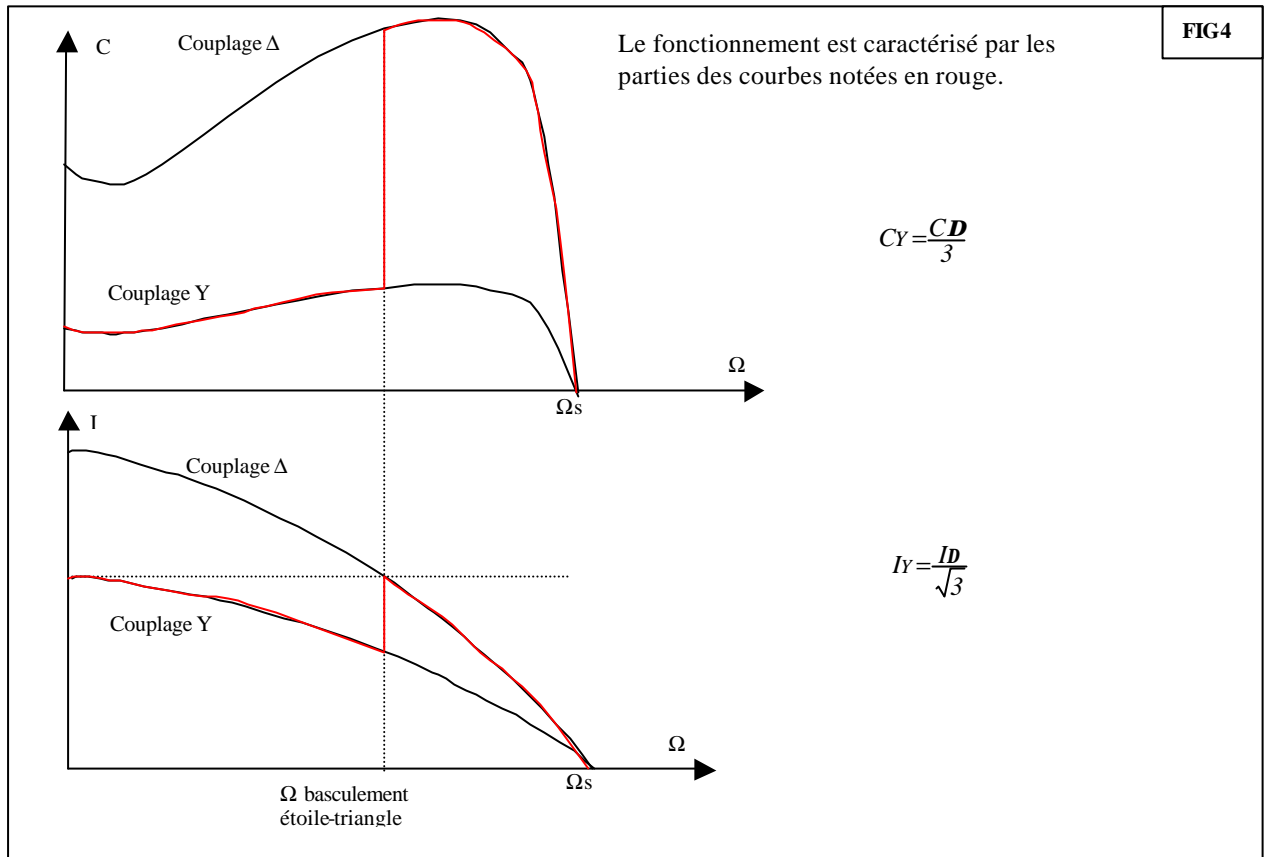
1^{er} temps : à la mise sous tension, les enroulements statoriques du moteur sont couplés en étoile.

Ainsi, le couple de démarrage est divisé par 3 et l'appel de courant par $\sqrt{3}$.

2^{ème} temps : les enroulements statoriques sont couplés en triangle, le moteur fonctionne sur ses caractéristiques naturelles.

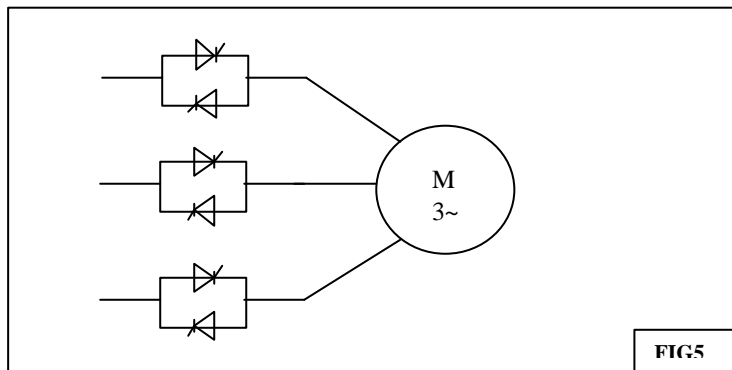
La valeur de la vitesse angulaire, à l'instant où le basculement du couplage étoile vers le couplage triangle a lieu, est d'une grande importance :

- si cette vitesse est trop faible l'appel de courant est très important,
- si cette vitesse est trop proche de la vitesse de synchronisme le moteur risque de caler (si $C_{\text{moteur}} < C_{\text{résistant}}$).



Exemple 2 : démarrage progressif

On augmente progressivement la tension efficace aux bornes du moteur, ce qui évite les à-coups tout en réduisant la pointe du courant d'appel. Ce résultat est obtenu par l'intermédiaire d'un gradateur à thyristors.



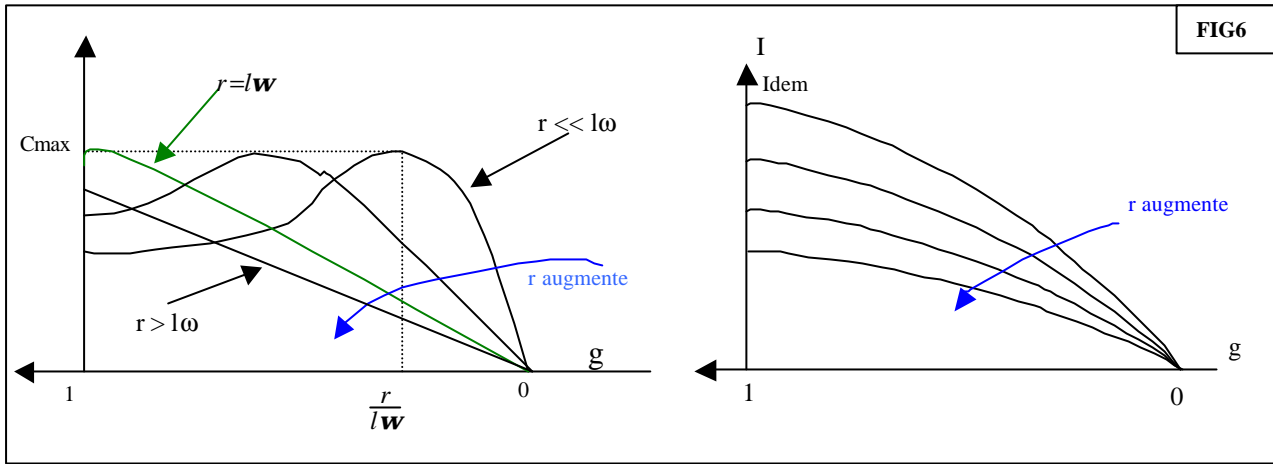
Démarrage par augmentation de la résistance rotorique.

Observons l'allure de la courbe couple-vitesse pour différentes valeurs de la résistance rotorique r.

- Si $r = l\omega$, le couple de démarrage est égal au couple maximum, mais les performances du moteur en régime permanent sont altérées ; la vitesse du moteur est sensible aux variations du couple résistant (annexe 1).
- Si $r > l\omega$, on obtient une meilleur réduction du courant d'appel mais le couple de démarrage est inférieur au couple maximum.
- Si $r \ll l\omega$, c'est le cas du démarrage direct.

Par conséquent, en démarrant à $r = l\omega$ puis en diminuant r, lorsque la vitesse angulaire Ω augmente, on obtient :

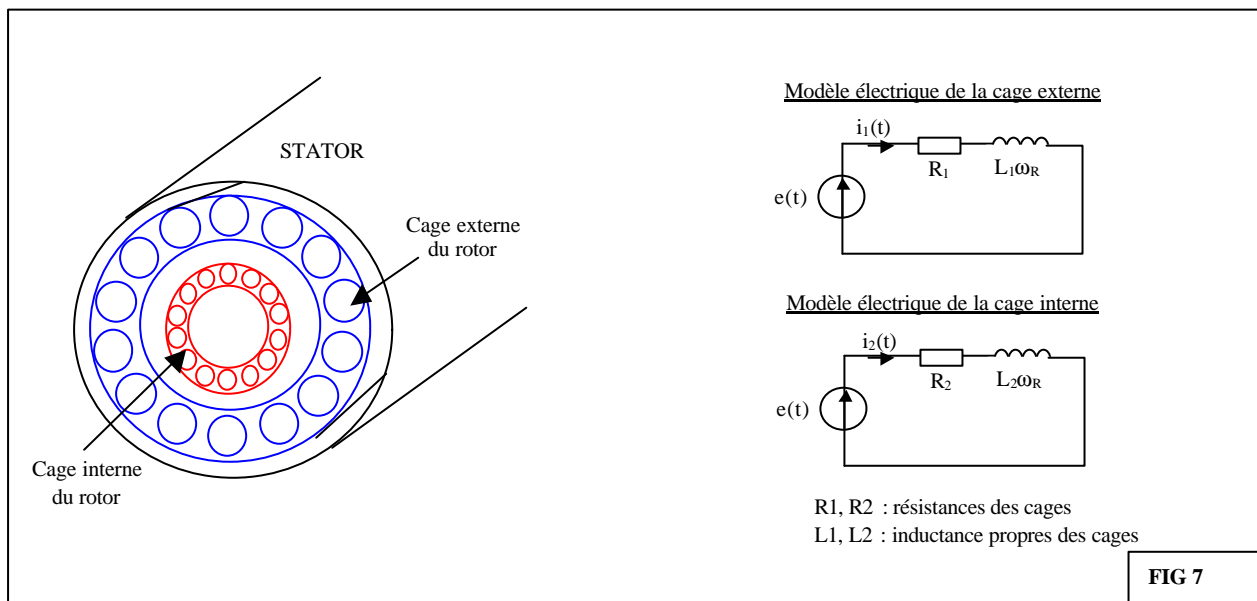
- un couple de démarrage maximum,
- l'atténuation de l'appel de courant,
- de bonnes performances en régime permanent.



Exemple 1 : Moteur à double cage

Un ingénieur français, Paul Boucherot (1869 – 1943) a imaginé un moteur à double cage qui possède au démarrage un couple élevé, tout en conservant en marche normale les qualités d'un moteur ordinaire. Le rotor possède deux cages coaxiales :

- la cage externe, placée à la périphérie du rotor, est fabriquée dans un matériau possédant une forte résistivité (laiton, bronze). Cette cage est très résistante (R_1 est grand) et présente peu de fuites magnétiques par rapport au stator (L_1 est faible) .
- la cage interne, profondément noyée dans le circuit magnétique du rotor, est fabriquée dans un matériau possédant une faible résistivité (cuivre) . Cette cage est peu résistante (R_2 est faible) mais a une grande dispersion magnétique par rapport au stator (L_2 est grand) .
- les deux cages sont électriquement indépendantes.



Au démarrage, la pulsation ω_R des courants $i_1(t)$ et $i_2(t)$ est égale à la pulsation du réseau. Ainsi, l'impédance de la cage interne est très supérieure à l'impédance de la cage externe ; les courants qui circulent dans la cage interne sont faibles devant les courants qui circulent dans la cage externe. Par conséquent, la cage interne n'a que peu d'influence sur le fonctionnement du moteur ; il se comporte alors sensiblement comme si la cage extérieure de forte résistance existait seule (le couple est élevé) .

En marche normale la pulsation ω_R des courants $i_1(t)$ et $i_2(t)$ est faible. Ainsi, l'impédance de la cage externe est très supérieure à l'impédance de la cage interne ; les courants qui circulent dans la cage externe sont faibles devant les courants qui circulent dans la cage interne. Par conséquent, la cage externe n'a que peu d'influence sur le fonctionnement du moteur ; il se comporte alors sensiblement comme si la cage intérieure de faible résistance existait seule (les performances sont celles d'un moteur ordinaire) .

Exemple 2 : Moteur à cage à encoches profondes

Le rotor à double cage est difficile à construire, donc d'un coût élevé. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie des avantages de ce type de rotor, en construisant une cage rotorique unique avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique.

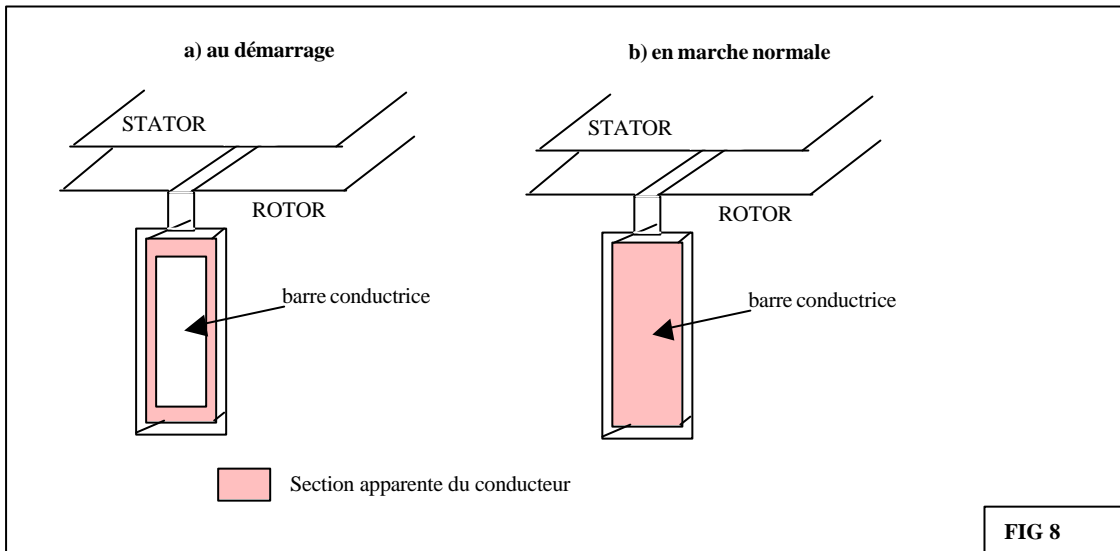
La résistance d'une barre a pour expression :

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

avec R : résistance de la barre, L : longueur de la barre, S : section de la barre et ρ : résistivité du matériau.

Lors du démarrage, les lignes de courant se concentrent à la périphérie de la barre (FIG 8-a) et tendent à assigner une section de conducteur apparente réduite, et par conséquent une résistance importante.

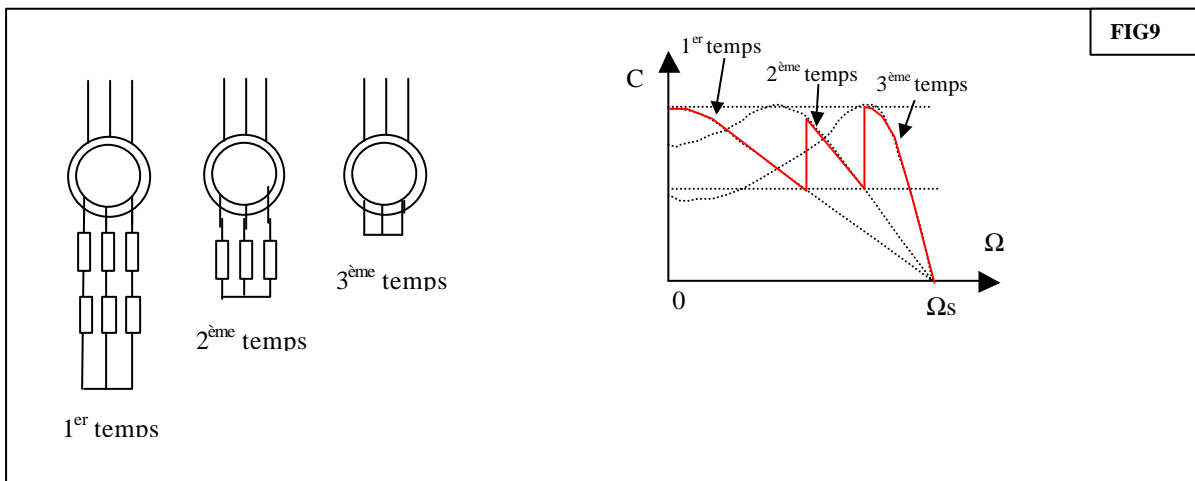
En marche normale, les lignes de courant occupent la pleine section de la barre (FIG 8-b), et retrouvent un circuit de faible résistance.



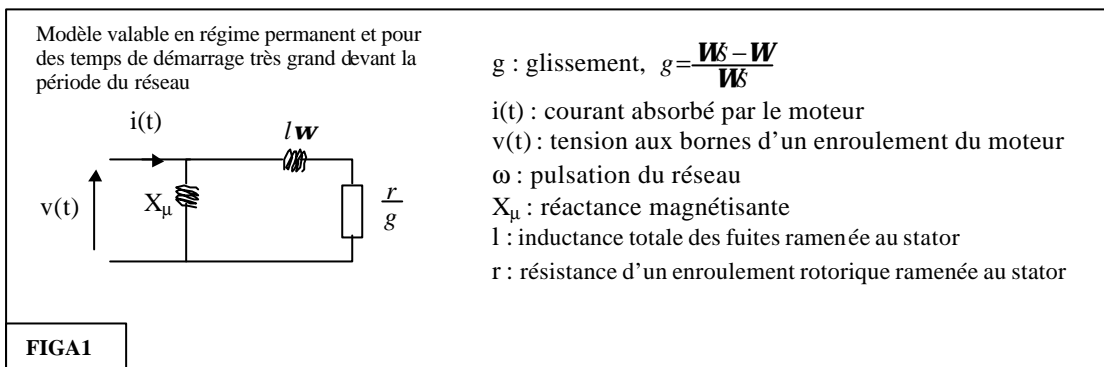
Exemple 3 : moteurs à rotors bobinés

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilées sur l'arbre de la machine. Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuits complémentaires (résistances, électronique de puissance ...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse.

On insère dans le circuit rotorique un ensemble de résistances qui sont court-circuitées progressivement pendant la phase de démarrage.



ANNEXE 1 : Expressions du couple et du courant moteur

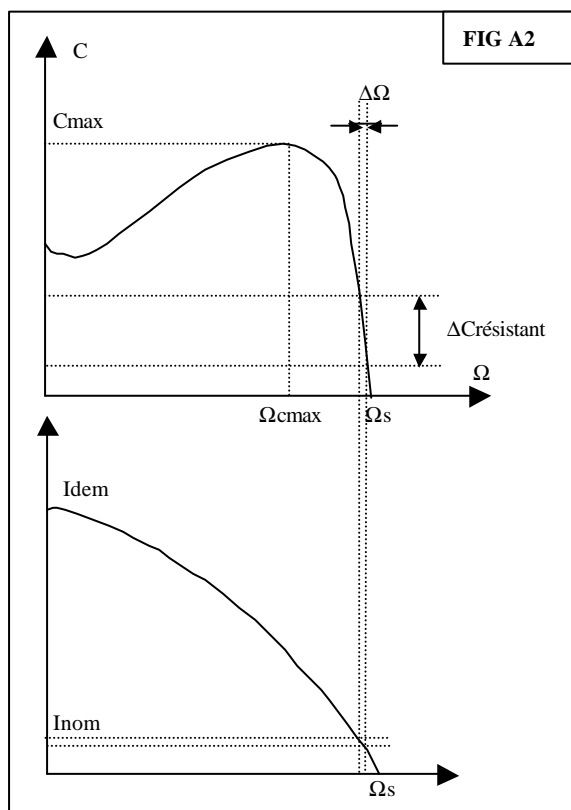


A partir de la modélisation d'une phase du moteur asynchrone donnée en FIG A1 on établit les expressions du couple et du courant :

$$C = 2C_{max} \frac{\frac{g_{cmax}}{g}}{1 + \left(\frac{g_{cmax}}{g}\right)^2}, \text{ le couple est maximum lorsque } g = g_{cmax} = \frac{r}{l\omega} \text{ avec } C_{max} = 3p \left(\frac{V}{l\omega}\right)^2 \frac{1}{2l}$$

$$I = \frac{V}{l\omega} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{g_{cmax}}{g}\right)^2}}, \text{ le courant de démarrage a pour expression } I_{dem} = I(g=1) = \frac{V}{l\omega} \frac{1}{\sqrt{1 + g_{cmax}^2}}$$

Les deux courbes couple-vitesse et courant-vitesse ont chacune la forme suivante (figure A2):



La partie utile (fonctionnement stable du moteur) de cette courbe correspond à $W \in [W_{Cmax}; W_s]$. Les constructeurs fabriquent des moteurs ayant :

1) pour Ω_{cmax} des valeurs proches de Ω_s ; des perturbations du couple résistant n'entraînent que de faibles variations de la vitesse angulaire Ω . La vitesse Ω_{cmax} correspond à une valeur de glissement

$$g_{cmax} = \frac{r}{l\omega} \text{ ce qui entraîne } r \ll l\omega.$$

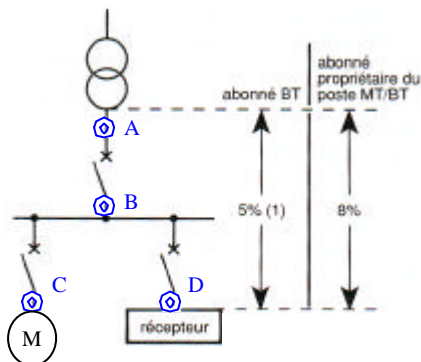
2) un couple de démarrage supérieur au couple nominal. Ainsi, il est possible de démarrer des machines centrifuges ou à couple résistant constant. Pour obtenir un couple de démarrage supérieur au couple nominal il faut un couple maximum important (on peut admettre que $C_{dem} \approx 2C_{max} g_{cmax}$ et $g_{cmax} \ll 1$ car $r \ll l\omega$).

La diminution de l'inductance de fuite l permet d'augmenter le couple maximum, mais la valeur du courant de démarrage augmente en conséquence.

En pratique le couple de démarrage peut varier suivant le moteur de 1,5 à 1,7 fois le couple nominal pour un courant de démarrage variant de 5 à 7 fois le courant nominal.

ANNEXE 2 : Expressions des chutes de tensions en lignes

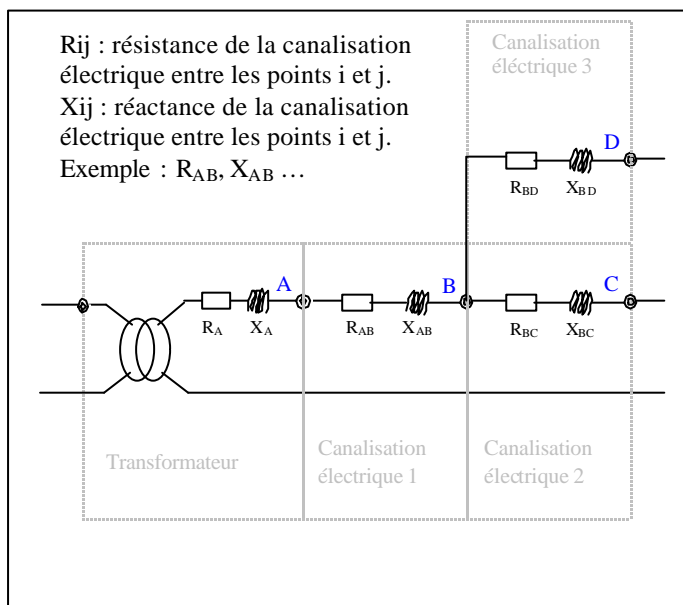
Le bon fonctionnement d'un récepteur est conditionné par la valeur de la tension à ses bornes, la norme NFC 15-100 fixe les limites admissibles des chutes de tension en ligne.



	éclairage	Autres usages (force motrice)
Abonné alimenté par le réseau BT de distribution publique	3 %	5 %
Abonné propriétaire de son poste HTA/BT	6 %	8 % (1)

(1) entre le point de raccordement de l'abonné BT et le moteur.

Au vu de l'expression de la chute de tension ci-dessous, on peut constater qu'un dimensionnement correct de la section des câbles vis à vis du courant nominal et de leur longueur permet de maintenir cette chute de tension, en régime nominal, dans les limites autorisées.



$$\Delta U_{ij} = R_{ij} I \cos \phi + X_{ij} I \sin \phi$$

ΔU_{ij} : chute de tension entre les points i et j (ΔU_{AB} chute de tension entre A et B)

ϕ : déphasage entre le courant de ligne et la tension présente aux bornes du récepteur.

I : intensité du courant dans la canalisation ij.

Remarque : l'expression ci-dessus est valable tant que la chute de tension reste faible devant la valeur de la tension présente au secondaire du transformateur.

Pendant la phase de démarrage d'une machine le courant appelé est très supérieur au courant nominal. Par rapport au régime permanent, le démarrage d'un moteur augmente les chutes de tensions en lignes ΔU_{AB} et ΔU_{BC} .

ANNEXE 3 : Classes d'isolations thermiques et modèles thermiques

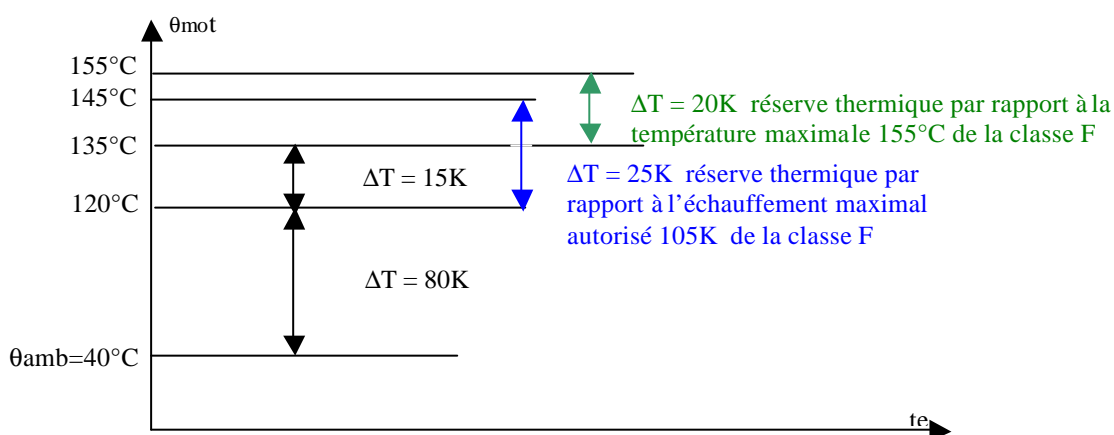
Classes d'isolations thermiques

La norme CEI 34-1 définit des classes d'isolation qui réglementent les échauffements et températures maximales que les machines doivent pouvoir supporter.

	ΔT	Tmax
Classe B	80K	125°C
Classe F	105K	155°C
Classe H	125K	180°C

Un constructeur qui vend une machine de classe F garanti à son utilisateur qu'elle peut supporter un échauffement de 105K par rapport à la température ambiante et une température maximale de 155°C.

Exemple : LEROY-SOMER garanti que la construction de ses machines de classe F conduit à un échauffement maximal des enroulements de 80K pour un fonctionnement normal, et un échauffement supplémentaire de 15K pour une utilisation aux extrêmes de tension ($\pm 10\%$ de U_n).



Modèles thermiques

Ce paragraphe est en cours de rédaction.