



# *La bible du Démarrage*

*Ecrité par M P. CHASSIGNEUX*

*Révisée par G. ODIN*

*Publication par J-Ph. ABRAHAM*

## Table des matières

I.	LE CHOIX DU MOTEUR.....	3
a.	Généralités et notions essentielles – Utilité d’un démarreur .....	3
b.	MOTEUR A CAGE D’ÉCUREUIL.....	4
1.1.1.	Avantages.....	4
1.1.2.	Inconvénients.....	4
1.1.3.	Caractéristiques .....	4
c.	MOTEUR À BAGUES (ou à rotor bobiné).....	6
1.1.4.	Avantages.....	6
1.1.5.	Inconvénients.....	6
1.1.6.	Caractéristiques .....	7
d.	MOTEUR A COURANT CONTINU.....	11
1.1.7.	Principe de fonctionnement.....	11
1.1.8.	Différents types de moteurs à courant continu :.....	11
II.	LE CHOIX DU DÉMARREUR.....	13
a.	GENERALITES.....	13
2.1.1.	Quelques définitions.....	13
2.1.2.	Temps de démarrage.....	13
2.1.3.	Courant moyen de démarrage :.....	14
2.1.4.	Service :.....	14
b.	MOTEUR A CAGE.....	15
2.1.5.	1. Démarrage direct.....	15
2.1.6.	Démarrage direct – Principe et fonctionnement.....	16
2.1.7.	Démarrage par couplage étoile triangle.....	19
2.1.8.	Démarrage étoile triangle – Principe et fonctionnement.....	19
2.1.9.	Démarrage par résistances statoriques.....	21
2.1.10.	Démarreurs par résistances statoriques – Principe et fonctionnement.....	22
2.1.11.	Démarrage par autotransformateur.....	25
2.1.12.	Démarrage par autotransformateur – Principe et fonctionnement.....	26
2.1.13.	Démarrage progressif électronique.....	27
c.	MOTEUR A BAGUES – Démarrage par résistances rotoriques.....	28
2.1.14.	Démarreurs rotoriques – Principe et fonctionnement.....	28
2.1.15.	Différents types de démarreurs rotoriques.....	29
2.1.16.	Différents modes de court-circuitages utilisés.....	30
d.	DÉMARREUR RALENTISSEUR PROGRESSIF DIGITAL 4-800 KW/ 220-660V.....	32
e.	MOTEUR A COURANT CONTINU.....	33
2.1.17.	Démarrage par résistances :.....	33
2.1.18.	Principe et fonctionnement :.....	33
f.	GENERALITES SUR LES RESISTANCES DE DEMARRAGE.....	34
2.1.19.	Présentation.....	34
2.1.20.	Souplesse au démarrage :.....	34
2.1.21.	Entretien :.....	34
2.1.22.	Délai de réponse :.....	34

# I. LE CHOIX DU MOTEUR

En règle générale, il est important de connaître les limites de pointes d'intensité supportables par le réseau ou le générateur, facteur déterminant dans le choix des types de moteur.

A partir de là, deux critères principaux permettent de fixer le choix du type de moteur, et donc son mode de démarrage en fonction du résultat à obtenir, ce sont :

La limite maximale pour les pointes de courant.

La valeur du couple de démarrage, assurant dans les plus mauvaises conditions le décollage et l'accélération normale, en sachant qu'avec un moteur à cage, le couple moteur est croissant avec la vitesse, et qu'il est décroissant pour une valeur donnée de résistance dans le rotor dans le cas du moteur à rotor bobiné.

D'autre part, la question du coût global restant tout de même importante, il faut savoir que le prix d'un moteur à cage est nettement inférieur à celui d'un moteur à bagues ou à celui d'un moteur à courant continu de même puissance.

## A. GENERALITES ET NOTIONS ESSENTIELLES – UTILITE D'UN DEMARREUR

Le courant initial de démarrage est le courant qui s'établit après amortissement des phénomènes transitoires éventuels, lorsqu'on applique à l'ensemble constitué du démarreur et du moteur, et à vitesse nulle, la tension nominale prévue pour ce dernier. Ce courant est appelé courant de démarrage.

A un courant initial correspond le couple initial obtenu à la mise sous tension (vitesse nulle) appelé couple de démarrage.

Dans un grand nombre de cas, et pour des raisons diverses, nous sommes amenés à réduire l'une de ces grandeurs afin de rentrer dans une certaine fourchette de tolérances. Ce sera le rôle du démarreur.

## B. MOTEUR A CAGE D'ÉCUREUIL

### 1.1.1. Avantages

Coût peu élevé.

Simplicité de l'appareillage de commande.

Couple croissant pendant l'accélération.

### 1.1.2. Inconvénients

Fortes intensités au démarrage

De ce fait, on l'utilisera sur des machines qui ne nécessitent pas de couple de démarrage trop élevé, et qui ne présentent pas d'inertie des masses en mouvement trop importante.

En effet, si l'on réduit la pointe d'intensité, le couple de démarrage sera également réduit dans des proportions importantes.

Par ailleurs, pour les machines à forte inertie, le moteur à cage supportera mal l'échauffement entraîné par la forte intensité pendant le démarrage dans ses enroulements, ceci pouvant même dans certains cas extrêmes amener sa destruction.

### 1.1.3. Caractéristiques

Les constructeurs de moteurs donnent pour les moteurs à cage un certain nombre de caractéristiques importantes sur leurs catalogues, dont les rapports obtenus en démarrage direct  $I_d/I_n$  (Intensité de démarrage direct par rapport à l'intensité nominale), et  $C_d/C_n$  (couple de démarrage direct par rapport au couple nominal), nécessaires pour déterminer le mode démarrage.

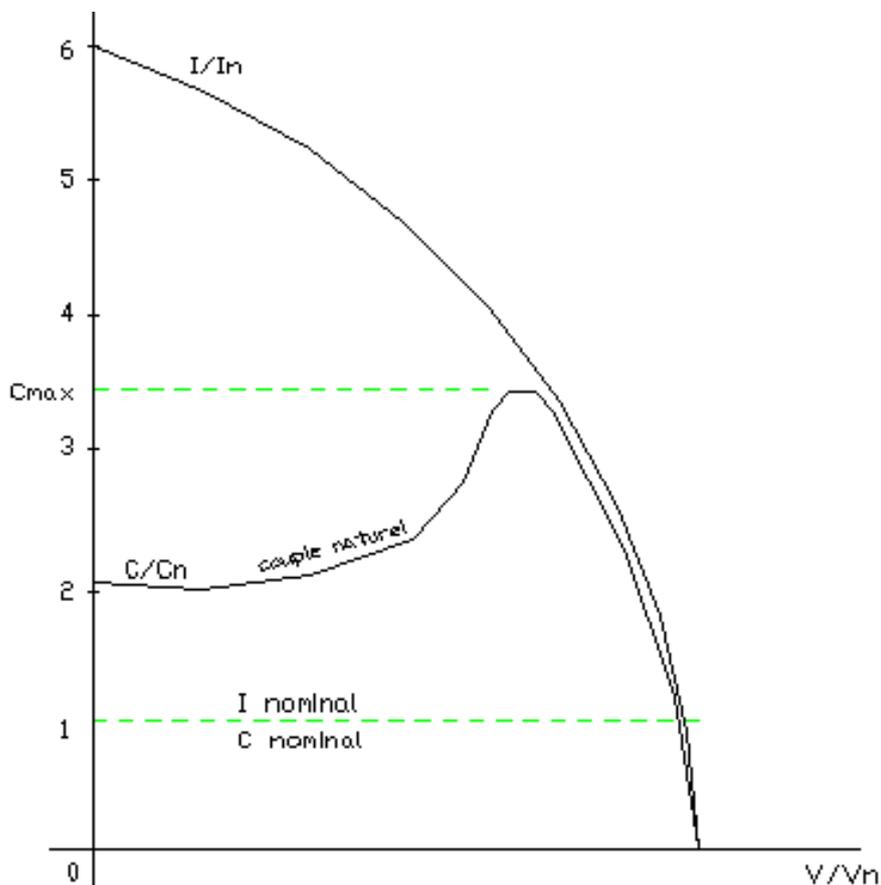
Ces caractéristiques sont des valeurs mesurées par le constructeur sur un prototype (essais de type) et sont considérées comme exactes pour tous les moteurs de même type (même si en fait elles diffèrent un peu).

Suivant les moteurs, les valeurs du rapport  $I_d/I_n$  varient dans le plus grand nombre des cas entre 4 et 8. Les valeurs du rapport  $C_d/C_n$  peuvent varier entre 1.5 et 2.5.

Note : Certains moteurs spéciaux ont des caractéristiques différentes, soit favorables (avec  $I_d/ I_n$  de l'ordre de 3 et  $C_d/ C_n$  de l'ordre de 2) soit défavorables (avec  $I_d/ I_n$  de l'ordre de 5 ou 6, et  $C_d/ C_n$  de l'ordre de 0.5 ou 0.7). Ce sont des moteurs de construction spéciale, ou de fortes puissances. Les moteurs moyenne tension ont aussi quelquefois des caractéristiques défavorables.

Figure 1 Moteur à cage – caractéristiques de démarrage direct

C.



## MOTEUR À BAGUES (OU A ROTOR BOBINE)

### 1.1.4. Avantages

Permet d'obtenir des couples élevés pour des courants relativement faibles,  
Permet d'ajuster au mieux le couple moteur au couple résistant, en jouant sur les valeurs des pointes et le nombre de crans,  
Grande souplesse pour les démarrages,  
Permet le réglage de vitesse.

### 1.1.5. Inconvénients

Les moteurs à bagues sont plus onéreux que les moteurs à cage,  
Nécessite un appareillage de court-circuitage rotorique.  
Cependant, le moteur à bagues, plus encombrant, plus élaboré, donc plus cher que le moteur à cage offre l'avantage de maintenir jusqu'aux valeurs maximales de couple une relative proportionnalité entre les valeurs de couple et d'intensité. Le stator reste toujours sous pleine tension. L'insertion de résistances dans le rotor permet d'ajuster les valeurs de couple de façon très précise.

Le moteur à bagues permet d'adapter au mieux les valeurs de couple et les pointes d'intensité à la forme du couple résistant de la machine entraînée. Le nombre de crans de démarrage est déterminé en fonction des pointes d'intensité maximales tolérées par le réseau, des pointes maximales de couple tolérées par la mécanique entraînée, et de la courbe du couple résistant machine.

A noter que le moteur permet le réglage de vitesse, avec une assez bonne précision et stabilité, et avec un appareillage relativement peu onéreux, mais avec une dissipation calorifique importante dans les résistances. Chaque point de 'glissement' est défini par une vitesse et un couple résistant.

### 1.1.6. Caractéristiques

Les constructeurs des moteurs donnent pour les moteurs à bagues un certain nombre de caractéristiques importantes, dont les constantes rotoriques (tension et intensité rotorique) :

Quand son rotor est ouvert, un moteur à rotor bobiné fonctionne comme un transformateur. On peut donc parler de primaire et de secondaire, ainsi que de rapport de transformation. On peut donc également calculer ce rapport de transformation, en mesurant la tension primaire (au stator) et la tension secondaire (tension rotorique entre bagues), et calculer le rapport :

$$\frac{U_s}{U_r}$$
$$U_r$$

Ce rapport de transformation est inhérent à la construction du moteur. Pour une même puissance, il est totalement différent suivant le constructeur.

**Note :** La connaissance des constantes rotoriques du moteur concerné est impérative pour la détermination d'un démarreur rotorique. Certains anciens moteurs n'ont plus de plaque signalétique, ou ont été rebobinés, si bien que l'on ne connaît plus ces constantes. Il est toujours possible de mesurer le rapport de transformation de ce moteur, par mesure des tensions statorique et rotorique sur le moteur fonctionnant en transformateur (balais relevés).

Le calcul de la tension rotorique nominale se fait par la formule  $U_s$  nominale x Rapport de transformation et le calcul de l'intensité peut se déduire de ce calcul par application de cette formule approximative :

$$I_r = \frac{P(W)}{U_r * 1.62}$$

$P(W)$  étant la puissance du moteur.

Note sur la mesure du courant rotorique :

Il est très difficile de mesurer l'intensité rotorique nominale :

L'intensité nominale est celle qui circule dans les enroulements rotoriques quand le moteur délivre sa puissance nominale. Avant de mesurer  $I_r$  pour l'assimiler à la constante rotorique, il faut s'assurer que le moteur délivre bien sa puissance nominale (par ex, mesures des grandeurs électriques au stator).

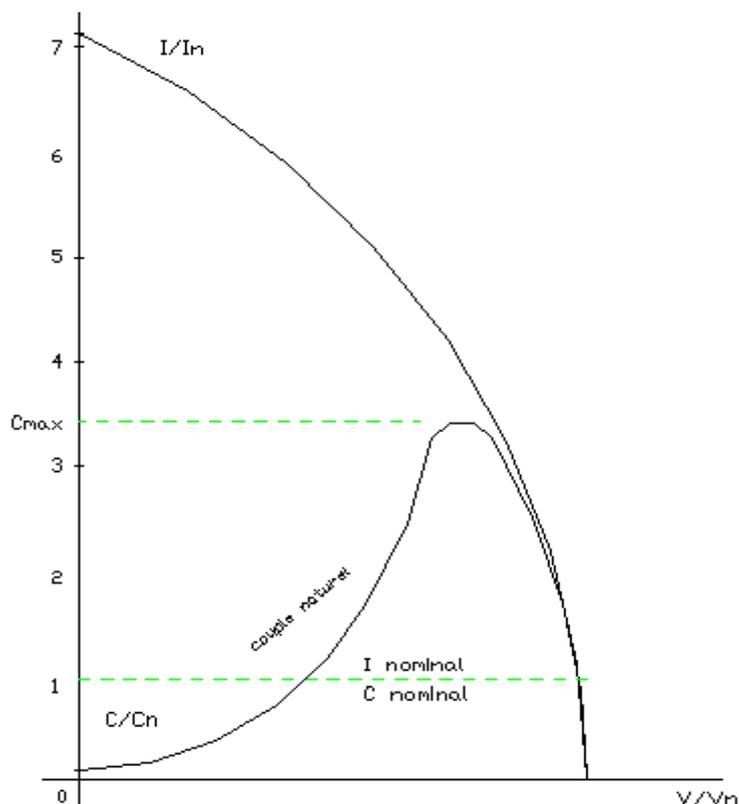
La fréquence des courants rotoriques est proportionnelle à la différence de vitesse entre le champ tournant et la vitesse rotor, et donc proportionnelle au glissement. En pleine vitesse, et pour un moteur 50Hz, le glissement nominal est de l'ordre de 2%. La fréquence des courants rotoriques est donc de l'ordre de 1Hz. Toutes les précautions nécessaires doivent donc être prises pour l'utilisation d'organes

de mesure adéquats (TC, pinces de mesure, ampèremètre thermique, oscilloscope...) donnant toutes garanties sur la fiabilité des mesures de courant aux basses fréquences.

Note sur les couples et intensités au démarrage :

Les caractéristiques de démarrage d'un moteur à bagues en court-circuit (bagues court-circuitées) sont très défavorables : Un couple souvent très bas, ou quasiment nul, un appel de courant souvent très important. Il est donc absolument prohibé d'effectuer un démarrage direct.

Figure 2 Moteur à rotor bobiné – Démarrage en court-circuit



On peut dans certains cas (récupération d'anciens moteurs, rénovation d'installations...) tenter de démarrer un tel moteur sur démarreur électronique, mais cela nécessite au préalable un essai de couple. Si ce couple n'est pas suffisant pour assurer un démarrage correct, on pourra peut-être insérer dans le rotor une certaine résistance afin de remonter ce couple.

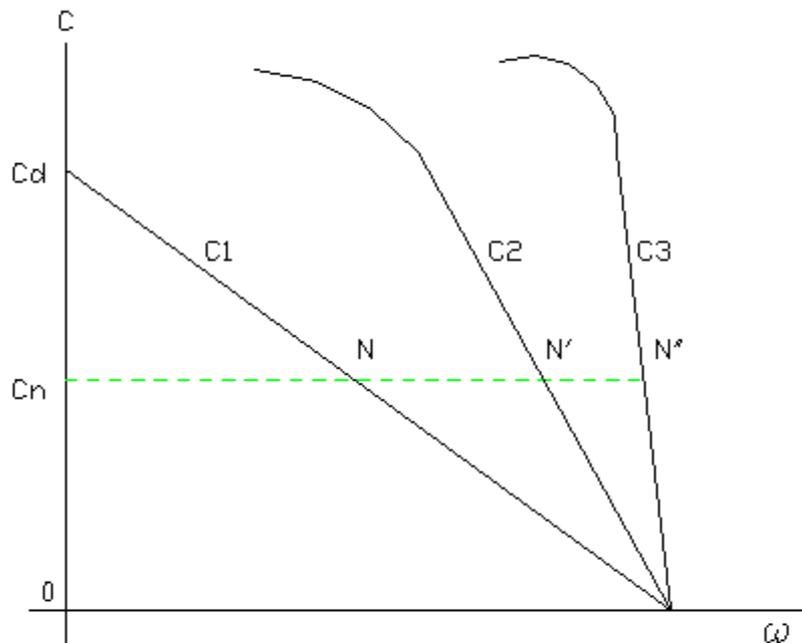
Conditions normales de démarrage d'un moteur à rotor bobiné  
Le glissement d'un moteur est déterminé par la formule suivante :

$$\frac{V_s - V}{V_s}$$

Où  $V_s$  est la vitesse de synchronisme et  $V$  la vitesse réelle.

Le glissement d'un moteur à induction est proportionnel à la résistance du circuit rotorique. Par diminutions successives des résistances dans le circuit rotorique, la caractéristique couple/ vitesse  $C = f(\omega)$  se déplace de  $C_1$  en  $C_2$ , puis en  $C_3$ .

Figure 3 Moteur à bagues – Caractéristiques  $C = f(\omega)$



La valeur conventionnelle de résistances.

$$R_u = \frac{1000P}{3I_r^2}$$

Où  $R_u$  est en  $\Omega$

$P$  = Puissance du moteur en W

$I_r$  = Courant rotorique en A

Correspond à la caractéristique passant par le point  $C_n$  de vitesse 0 pour le couple nominal. C'est donc la valeur à insérer dans le rotor (résistance interne du rotor comprise) pour démarrer avec un couple égal au couple nominal.

## D. MOTEUR A COURANT CONTINU

### 1.1.7. Principe de fonctionnement

Le rotor (ou induit) supporte des circuits conducteurs en mouvement relatif dans des champs magnétiques fixes, créés par le stator (ou inducteur). Ces machines sont réversibles ; elles peuvent fonctionner soit en génératrices soit en moteur. Elles sont en général capables de fortes surcharges (de courte durée) par rapport à leurs caractéristiques nominales. Leurs propriétés, ainsi que le développement des alimentations statiques, permettent d'effectuer aisément la commande de ces machines, utilisées principalement pour des laminoirs, hélices de propulsion, machines d'extraction, locomotives ou auxiliaires de toutes sortes.

Des régulations de vitesse précises et rapides, avec accélérations ou décélérations constantes, limitations de courant, etc.... peuvent être réalisées.

### 1.1.8. Différents types de moteurs à courant continu :

Il existe plusieurs types de moteurs, différenciés par leur type d'excitation : séparée, shunt, série ou compound.

#### ➤ Moteurs à excitation séparée

Ils sont peu employés, car ils nécessitent deux sources de tension. On les utilise pour des machines de forte puissance dans le but d'améliorer la commutation. (On augmente la tension, on diminue le courant).

#### ➤ Moteurs à excitation shunt

Ils sont très employés. La vitesse obtenue est très stable suivant la valeur du couple résistant.  
Inconvénient : Si le couple résistant subit de brusques variations, il y aura des à-coups importants proportionnels sur la ligne d'alimentation.

#### ➤ Moteurs à excitation série

Ils présentent l'avantage d'un fort couple de démarrage et la possibilité d'un bon réglage de vitesse. D'autre part, le courant ligne varie moins avec les à-coups de couple résistant qu'un moteur shunt. (Moteur série,  $I = k\Phi C_r$ , moteur shunt,  $I = kCr$ ). Il reste très utilisé dans le domaine de la traction.

➤ Moteurs à excitation composée (ou compound)

Il comporte un enroulement d'excitation série et un enroulement d'excitation shunt. Il délivre un couple de démarrage pouvant être très important. Il est plus employé quand le couple résistant comporte de grosses variations.

Un moteur à courant continu est donc caractérisé par son type d'excitation, sa tension nominale, son courant nominal, sa puissance nominale, la résistance interne du circuit induit (moteur shunt ou légèrement compound), les résistances internes des inducteurs (moteurs série ou compound).

Note : Quand elle n'est pas connue, la résistance interne induite peut être assimilée à :

$$R = \frac{1000P_n}{I_n^2} \text{ (kW)}$$

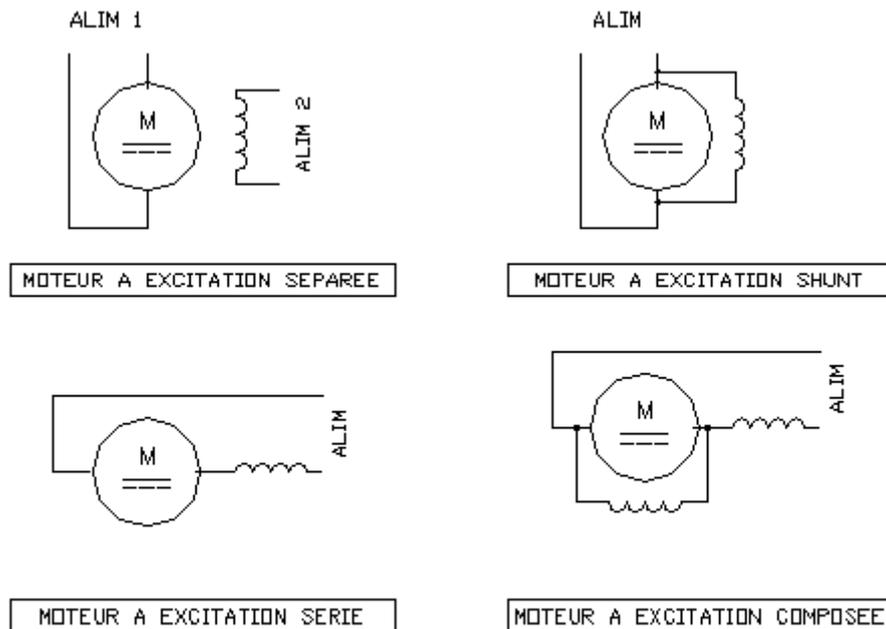


Figure 4 Types d'excitation pour moteurs à courant continu

## II. LE CHOIX DU DÉMARREUR

### A. GENERALITES

#### 2.1.1. Quelques définitions

In	:	Intensité nominale moteur.
Id/ In	:	Caractéristiques en court-circuit.
Cd/ Cn	:	(démarrage direct) propres aux moteurs à cage.
Cdr/ Cn	:	Valeur à laquelle on ramène le couple avec le démarreur.
Idr/ In	:	Valeur à laquelle on ramène l'intensité avec le démarreur.
Cacc	:	Couple accélérateur moyen pendant le démarrage.
Cm	:	Couple moteur (valeur instantanée).
CM	:	Couple maximum (l'une des caractéristiques des moteurs à induction).
Cr	:	Couple résistant (valeur instantanée).

#### 2.1.2. Temps de démarrage

La durée théorique d'un démarrage est donnée par la formule :

$$T = J \frac{d\omega}{C_m - C_r}$$

Où J : moment d'inertie de l'ensemble des pièces à mettre en mouvement, ramené à l'arbre moteur

$\omega$  : vitesse angulaire instantanée;  $\omega_n$  : vitesse angulaire nominale ( , en rd/ s, n en t/ mn)

Le temps de démarrage dépend donc du couple accélérateur moyen, c'est à dire la différence moyenne entre le couple moteur  $C_m$  et le couple résistant  $C_r$ .

Une formule simplifiée prenant en compte ces paramètres peut être donnée :

Où

T : temps de démarrage (en secondes)

$PD^2$  : moment d'inertie des masses en mouvement =  $4MR^2 = 4Xj$

n : vitesse de rotation nominale (t/mn)

P : puissance nominale (en chevaux). Rappel : 1 ch = 736W

Cacc : couple accélérateur moyen

Note : Si le couple accélérateur n'est pas connu, on peut l'estimer (suivant bien entendu le type de machine, le couple de démarrage et le nombre de crans) :

- moteurs à cage : entre 0.3 et 0.6

moteurs à bagues : entre 0.5 et 0.9

### 2.1.3. Courant moyen de démarrage :

Il s'agit de  $I_{thd}$ , courant moyen thermiquement équivalent au courant réel  $I$  pendant la durée du démarrage.

$$I_{thd} = \bar{I}$$

Cette intensité thermique est calculée en fonction des paramètres naturels du moteur, et des paramètres de démarrage. Elle peut être différente dans chaque cran de démarrage dans le cas de démarrage en plusieurs crans.

### 2.1.4. Service :

On appelle service de démarrage le temps global maximum autorisé pendant lequel le moteur est en phase de démarrage, et ce ramené à 1h de temps. Ce paramètre servira à définir le dimensionnement de l'organe auxiliaire éventuel de démarrage (résistance, autotransformateur...)

Généralement, elle est exprimée par les valeurs maximales possibles du :

Nombre de démarrages par heure.

Nombre de démarrages consécutifs.

Temps de démarrage.

Exemple : 10 démarrages par heure, ou 2 démarrages consécutifs correspondent au même calibrage.

## B. MOTEUR A CAGE

### 2.1.5. 1. Démarrage direct

#### ➤ Avantages



Permet de démarrer tout type de machine, même en pleine charge.

Simplicité de l'appareillage de commande.

Couple important, et croissant pendant la durée du démarrage, toujours supérieur au couple nominal.

#### ➤ Inconvénients



Fortes intensités pendant le démarrage.

Pointes de couple pouvant dans certains cas être trop importantes pour certaines machines nécessitant un démarrage plus progressif.

### 2.1.6. Démarrage direct – Principe et fonctionnement

Le moteur est brutalement alimenté sous sa tension nominale. Il s'en suit donc un appel de courant  $I_d$  et un couple  $C_d$  relativement importants. (voir page 6, fig 1).

On peut calculer la puissance en kVA, apparemment élevée, consommée pendant un démarrage. Connaissant le rapport  $I_d / I_n$ , le rendement  $h$  et le facteur de puissance  $\cos j$  à la puissance nominale, on obtient :

$$kVA_{\text{démarrage}} = I_n$$

$$kW_{\text{utile}} = h * \cos j$$

Exemple moyen :

$$I_d / I_n = 6,$$

---

$$h = 92\%, \quad kVA_{\text{dém}} = 8 \times P_{\text{nominale}}$$

$$\cos j = 0.86$$

On peut donc par ce calcul simpliste imaginer la puissance de l'alimentation nécessaire pour assurer un démarrage, soit du transformateur, soit d'un groupe électrogène éventuel.

Certaines machines spéciales permettent de par leur conception de minimiser cette puissance d'appel. Par exemple, les moteurs à double cage, à barres profondes, à rotor long, qui réduisent, sans autre appareillage qu'un démarreur classique les appels de courant. Les moteurs à enroulements partagés (part-windings), où chaque enroulement, électriquement indépendant de l'autre, absorbe la moitié de la puissance globale. Ce moteur est en fait équivalent à deux demi-moteurs, et permet le démarrage en direct sous pleine tension réseau, avec un couple et un courant d'appel réduits dans un rapport de 1 à 2.

La figure 5 représente l'allure des caractéristiques couple/ vitesse de ces différents moteurs/

La figure 5bis représente le schéma de puissance des démarreurs pour moteurs à simple cage et à enroulements séparés.

La figure 6 représente l'allure des caractéristiques Intensité/ vitesse et couple/ vitesse des moteurs à cage et des moteurs à enroulements partagés.

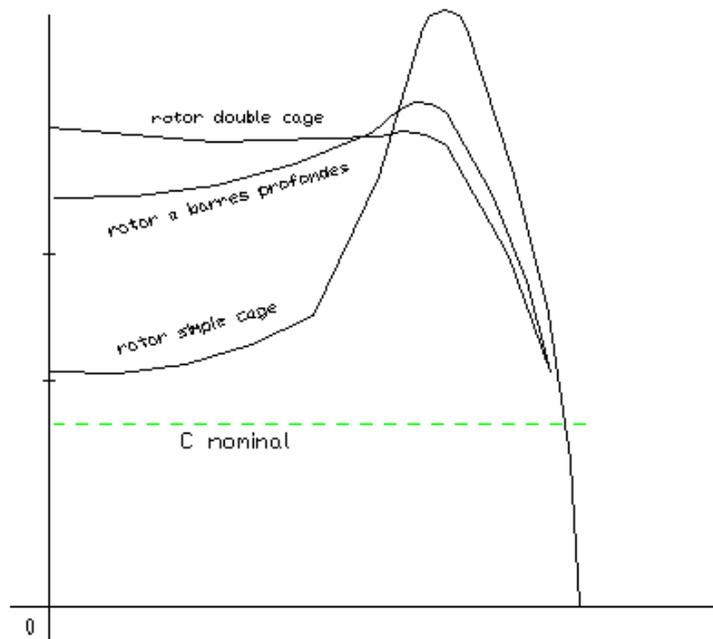


Figure 5 Caractéristiques couple/ vitesse des différents types de cage

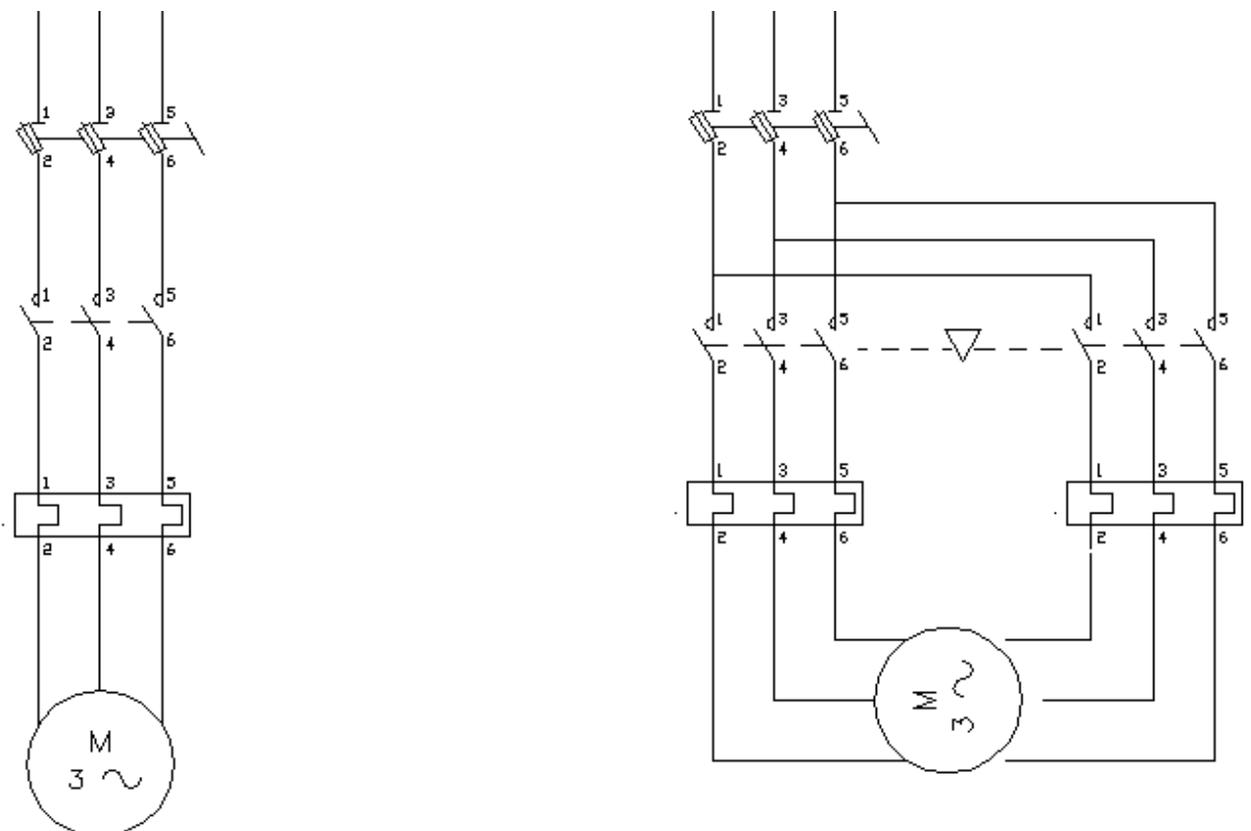


Figure 5 bis Moteur à cage - DEMARRAGE DIRECT - Moteur à enroulements partagés

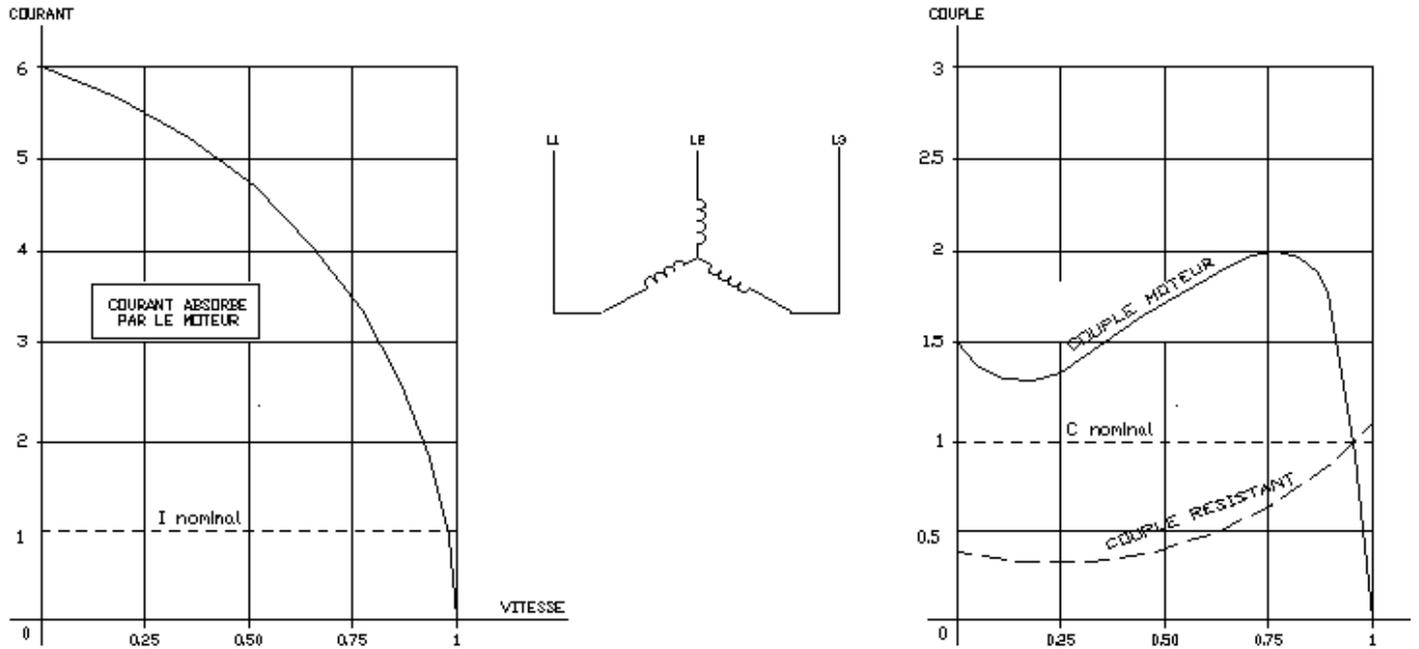


Figure 6 Moteur à cage – Caractéristiques Intensité et couple

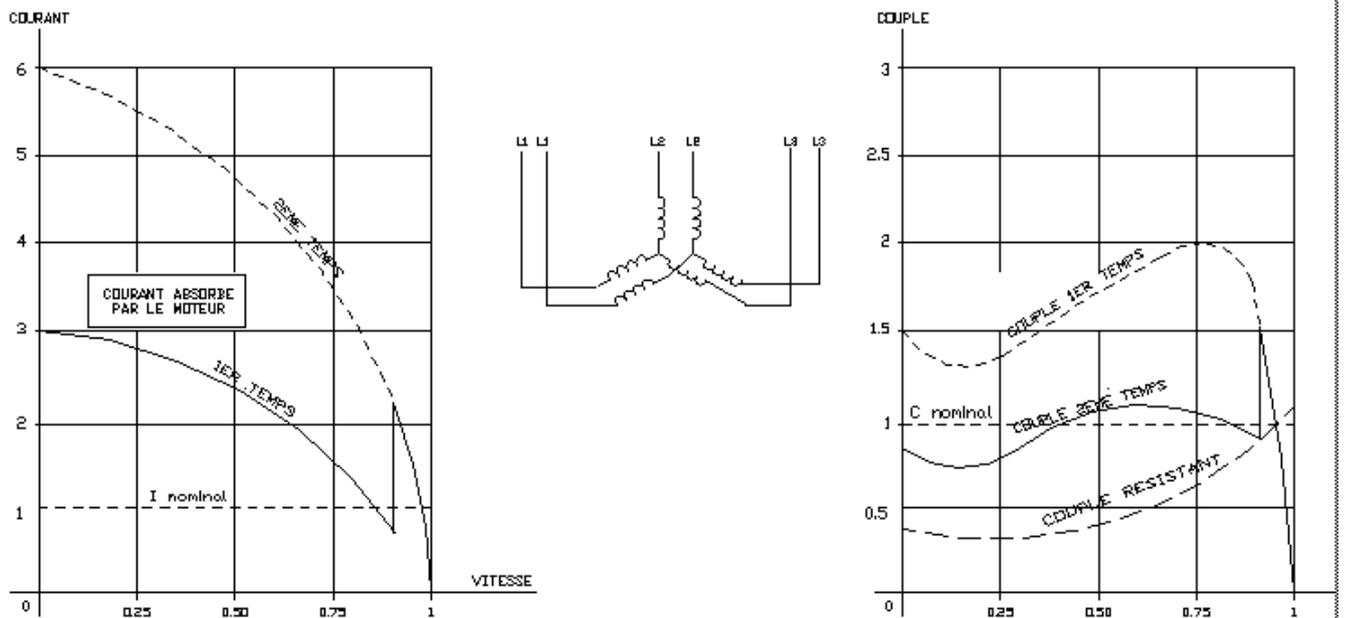


Figure 6 bis Moteur à enroulement partagés – Caractéristiques Intensité et couple

### 2.1.7. Démarrage par couplage étoile triangle

#### ➤ Avantages

Intensité de démarrage réduite au tiers de sa valeur en direct.

Couple de démarrage réduit au tiers de sa valeur en direct.

Mise en œuvre simple.

#### ➤ Inconvénients

Ne s'applique qu'aux moteurs bitension à 6 bornes sorties, dont le couplage triangle correspond à la tension réseau

Couple moteur assez faible.

Pointes de courant et de couple importantes, au passage d'étoile en triangle.

Ouverture du stator pendant le passage, induisant des pointes transitoires très dommageables dans les enroulements inductifs.

Ne convient pas aux machines centrifuges.

#### ➤ Caractéristiques

A la mise sous tension, couplage étoile du stator. Le moteur démarre sous tension réduite, avec une intensité et un couple de démarrage réduits dans un rapport de 3 par rapport aux caractéristiques de démarrage direct du moteur.

Lors du passage triangle (2<sup>ème</sup> temps), le moteur est couplé sous sa tension nominale : et si l'on n'a pas atteint un régime de vitesse suffisant, le fait de rejoindre ses caractéristiques naturelles amène dans le moteur de fortes pointes d'intensité et de couple, nettement supérieures aux valeurs de démarrage.

Le couplage d'étoile en triangle amène également différents phénomènes complexes, dus au fait que le moteur se comporte au 2<sup>ème</sup> temps comme un générateur qu'on couple sur le réseau, d'où surtensions et surintensités très élevées.

Le système est donc limité aux faibles puissances, et dans la pratique, se retrouve de moins en moins.

### 2.1.8. Démarrage étoile triangle – Principe et fonctionnement

Il s'agit d'un démarrage sous tension réduite.

L'enroulement moteur est connecté en étoile lors de la mise sous tension, et reconnecté en triangle en fin de démarrage. L'appel de courant et le couple développé sont d'environ le tiers des valeurs correspondantes en démarrage direct sous pleine

tension, puisque la diminution de tension est faite dans le rapport  $\sqrt{3}$ . (couplage étoile - triangle) voir fig 7.

L'un des inconvénients de ce mode de démarrage est la rupture du courant pendant le passage. Les enroulements étant très inductifs, il s'ensuit des pointes de courant transitoires très importantes au passage d'étoile en triangle. Différentes méthodes sont utilisées pour pallier à ce phénomène :

Etoile - triangle résistif - triangle, où une résistance est mise en série au passage en triangle. Les phénomènes transitoires et l'appel de courant de passage sont diminués, mais la coupure subsiste.

Etoile triangle sans coupure, où la résistance est connectée un court instant avant l'ouverture du contacteur étoile, afin d'éviter toute interruption du circuit.

Un autre inconvénient est la pointe de courant qui se produit généralement à l'enclenchement du contacteur triangle, quand on passe sur la courbe naturelle du moteur, suivant la forme du couple résistant de la machine entraînée.

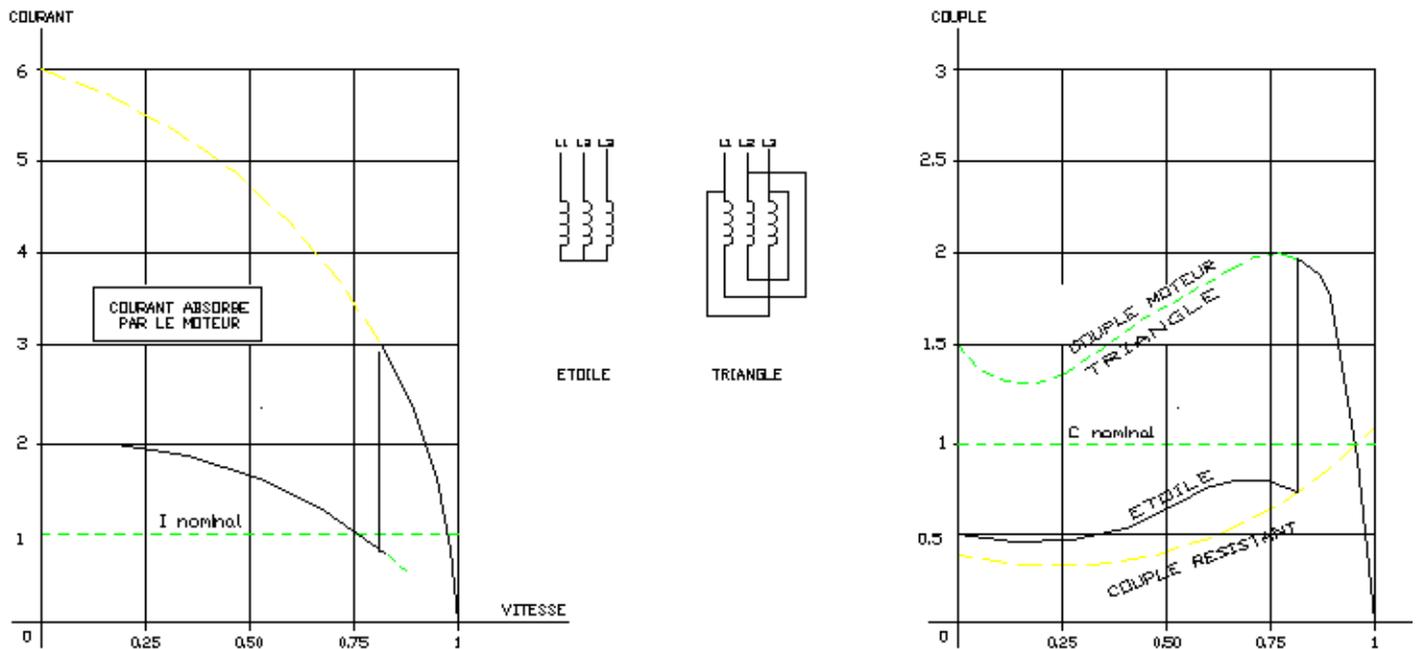


Figure 7 Démarrage étoile-triangle - courbes caractéristiques

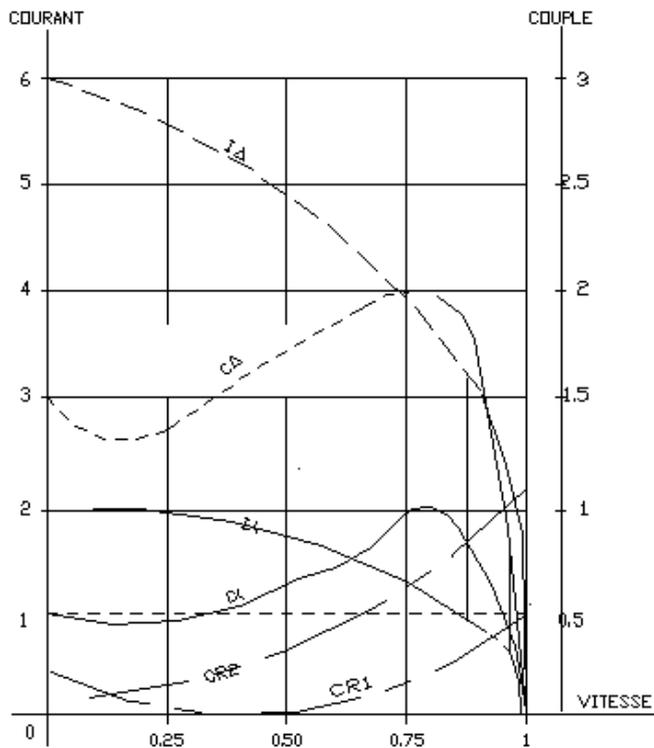


Figure 7 bis Etoile triangle – courbes comparatives suivant 2 couples résistants

Exemple d'un même démarreur, soit sur une pompe centrifuge vanne fermée (courbe CR1) soit sur un ventilateur ou une pompe centrifuge démarrante vanne ouverte (courbe CR2). On peut voir que la pointe au passage (CR1) est  $< I_n$ , mais que sur CR2 elle est  $> 3 \times I_n$ , alors qu'à la mise sous tension elle est de  $2 \times I_n$ .

### 2.1.9. Démarrage par résistances statorique

#### ➤ Avantages

Alimentation moteur en tension réduite croissante.

On peut ajuster le couple de décollage à la valeur désirée.

Mise en vitesse sans à-coups.

Système économique.

Convient bien pour les machines à couple croissant.

#### ➤ Inconvénients

Le courant de démarrage est réduit seulement suivant la  $\sqrt{3}$  de la réduction du couple.

Donc couple initial assez faible, si l'on veut une réduction conséquente du courant.

Nécessite un système de court-circuitage des résistances.

➤ **Caractéristiques**

Le système fonctionne suivant le principe de chute de tension dans des résistances en série avec le stator. Au fur et à mesure de la mise en vitesse, le courant absorbé diminue, la chute de tension aux bornes des résistances diminue, et la tension aux bornes du moteur augmente. Le couple croît donc de manière plus sensible qu'en mode étoile triangle, et le court-circuitage de la résistance, qui se fait sans ouverture du circuit, n'entraîne que de faibles pointes de I et C.

Ce mode de démarrage, peu onéreux, est très utilisé pour les démarrages de machine à couple croissant, quelle que soit la puissance.

**2.1.10. Démarreurs par résistances statorique – Principe et fonctionnement**

Il s'agit également d'un démarreur sous tension réduite. Mais le fait que la tension aux bornes du moteur soit croissante lors de la mise en vitesse donne à la courbe du couple moteur une pente croissante nettement plus prononcée qu'avec un démarreur étoile triangle.

Le court-circuitage des résistances en fin de démarrage se fait généralement en un seul temps ; quelques cas particuliers de couples résistants croissant très vite avec la vitesse nécessitent un court-circuitage en 2 étapes, mais cela reste un cas très particulier.

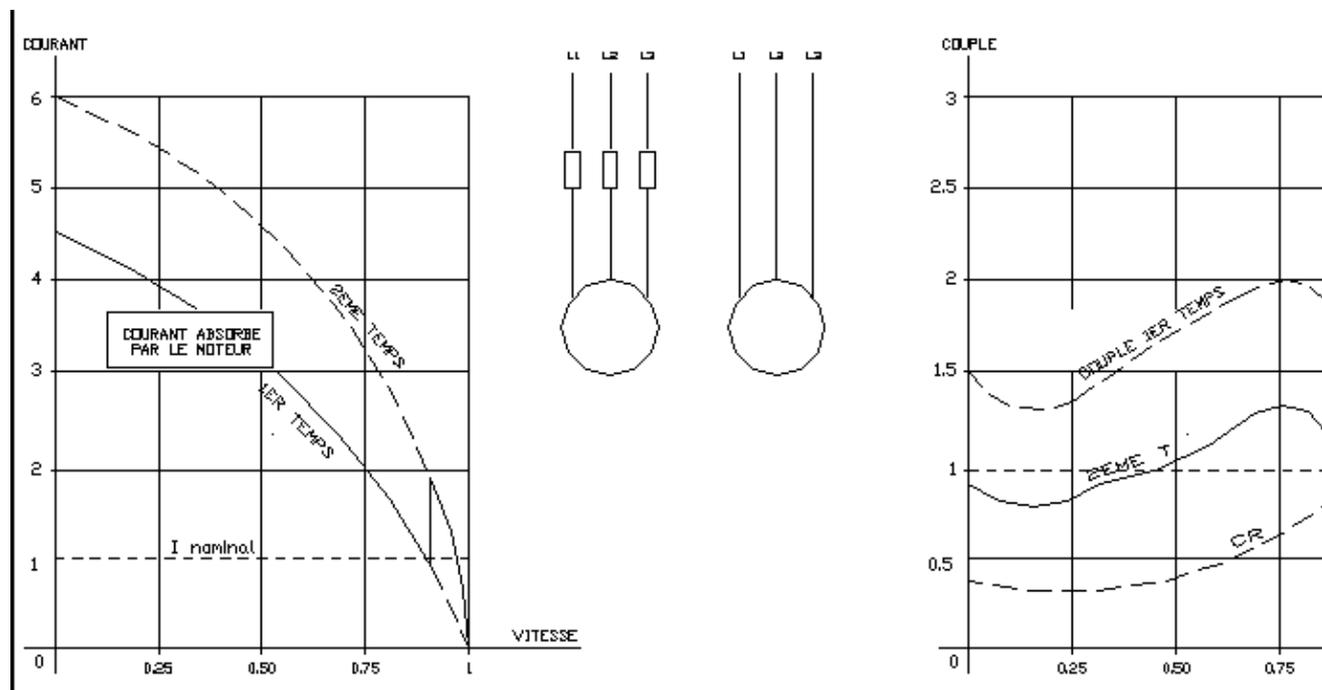


Figure 8 Démarreur par résistances statoriques – courbes caractéristiques

Deux types de schémas peuvent être envisagés. L'un (représenté à gauche) fonctionnant avec 2 contacteurs de même calibre, l'autre (représenté à droite) permettant de fixer le calibre du contacteur en série avec les résistances à  $I_n/2$ .

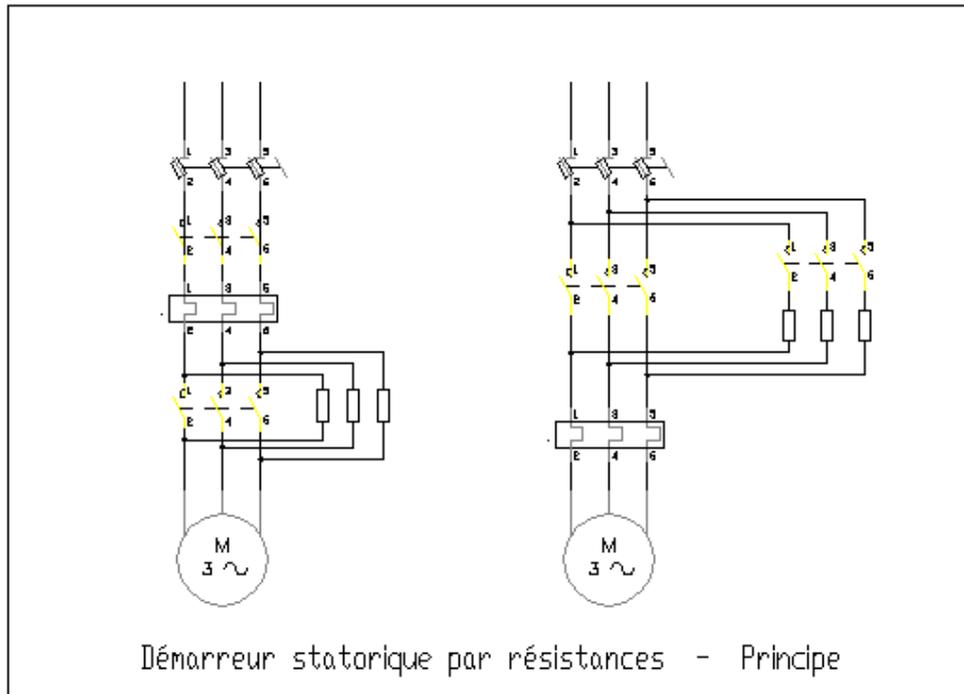


Figure 9

Une variante du démarrage par résistances statorique est le démarrage par inductance série, dont le fonctionnement est similaire au démarreur résistif, si ce n'est que la chute de tension aux bornes de l'inductance est en quadrature avec le courant, si bien que le facteur de puissance au démarrage est encore diminué par rapport au démarrage direct, et que les phénomènes transitoires sont accrus.

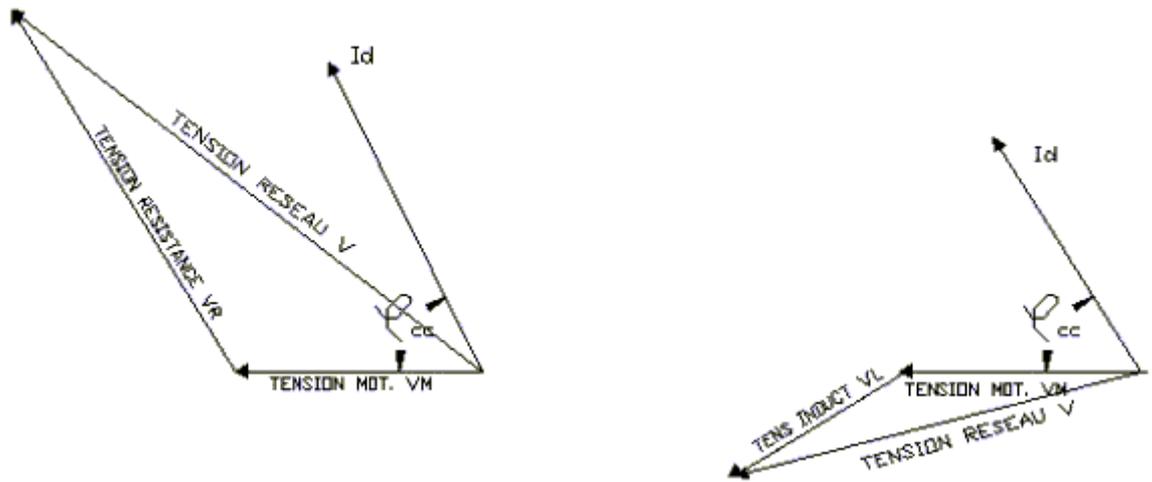


Figure 10 Comparaison des diagrammes de Fresnel résistances-inductances

### 2.1.11. Démarrage par autotransformateur

#### ➤ Avantages



Démarrage sous tension réduite.

Permet un couple de démarrage plus élevé pour un courant plus faible.

Pas d'ouverture de circuit au passage des temps.

Possibilité de prises sur autotransformateur pour obtenir une sélection de couple.

Utilisé principalement pour les moteurs de forte puissance.

Ce mode de démarrage reste très souple, et permet d'obtenir un couple important de démarrage. En effet, intensité et couple sont réduits dans le même rapport.

#### ➤ Inconvénients



Matériel lourd, souvent encombrant

Nécessite 3 contacteurs pour la mise en œuvre

#### ➤ Caractéristiques



Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur, lequel est mis hors circuit en fin de démarrage.

Le démarrage s'effectue en 3 temps.

1<sup>er</sup> temps :

Étoilage de l'autotransformateur, fermeture du contacteur de ligne.

2<sup>ème</sup> temps :

Ouverture du point neutre. Une fraction de l'enroulement de l'autotransformateur reste insérée en série avec le moteur, se comportant comme une inductance.

3<sup>ème</sup> temps :

Un troisième contacteur couple le moteur sur le réseau, et provoque l'ouverture des deux premiers.

### 2.1.12. Démarrage par autotransformateur – Principe et fonctionnement

Il s'agit d'un démarrage sous tension réduite. Avec ce principe, le moteur n'est jamais séparé du réseau, les phénomènes transitoires sont donc très limités. L'inductance des enroulements de l'autotransformateur doit rester faible, afin d'éviter un ralentissement trop important, et le deuxième temps doit rester très bref (quelques fractions de seconde).

Au cours du premier temps, le couple est réduit proportionnellement au carré de la tension, et le courant en ligne dans un rapport très voisin, légèrement plus élevé du fait du courant magnétisant de l'autotransformateur.

Note : Ce mode de démarrage est très utilisé pour le démarrage des moteurs à cage de forte puissance, principalement pour les moteurs Moyenne Tension.

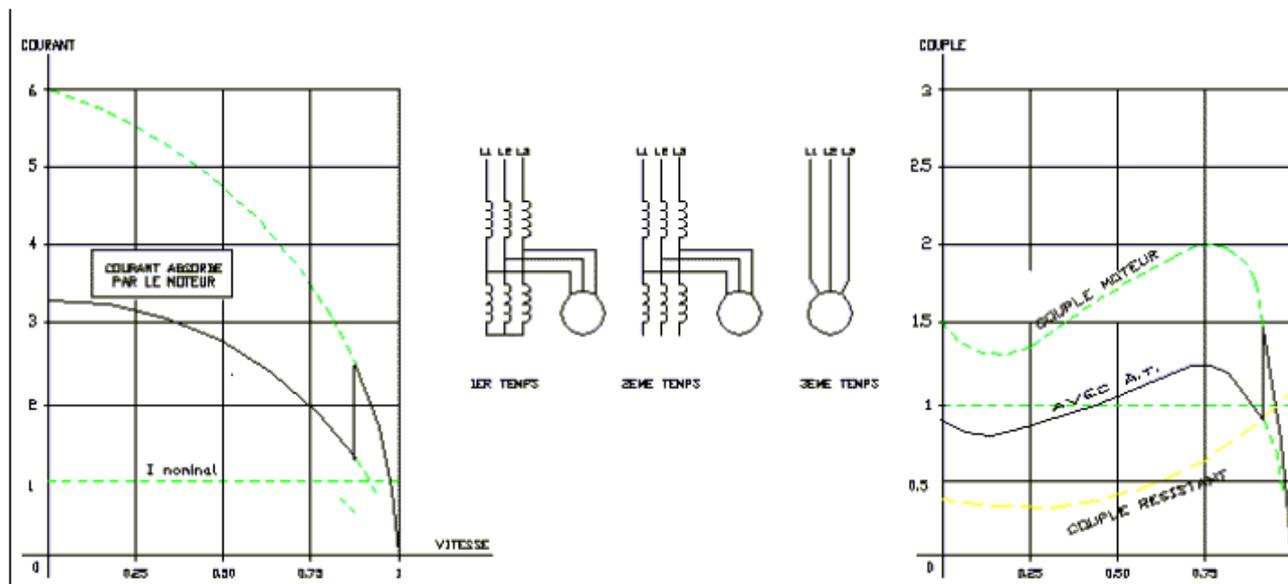


Figure 11 Démarrage par autotransformateur – courbes caractéristiques

### 2.1.13. Démarrage progressif électronique

#### ➤ Avantages



Démarrage progressif par rampe de tension.  
Limitation de l'intensité pendant le démarrage.  
Ajustage et réglage de tous les paramètres.  
Optimisation du démarrage.  
Encombrement réduit.  
Mise en œuvre très simplifiée.

#### ➤ Inconvénients



Convient mal pour les machines à couple résistant élevé et constant.

#### ➤ Caractéristiques



Le fonctionnement en est basé sur le principe du gradateur de puissance.

Le contrôle de la puissance par l'électronique permet d'effectuer un démarrage par accroissement progressif de la tension aux bornes du moteur, produisant ainsi une accélération sans à-coups, et ne consommant que le courant minimum pour atteindre la pleine vitesse avec grande souplesse.

Le démarreur commande la mise en rotation du moteur par application d'une tension initiale ajustable suivant le type de machine entraînée.

Cette tension augmente progressivement jusqu'à la pleine tension, tout en respectant un certain nombre de consignes préalablement fixées :

Limitation du courant pendant le démarrage (plafonnement)

Durée de la rampe de tension

Un réglage de l'intensité nominale du moteur par rapport au calibre nominal du démarreur permet d'ajuster au moteur installé les protections en intensité (surcharge, court-circuit) ainsi que la limitation de courant pendant le démarrage.

Ce type de démarreur assure toutes les protections en tension, en intensité, protection thermique, protection contre les court-circuits et surveillance des branchements et connexions.

## C. MOTEUR A BAGUES – DEMARRAGE PAR RESISTANCES ROTORIQUES

### 2.1.14. Démarreurs rotorique – Principe et fonctionnement

Nous savons que le couple de démarrage d'un moteur asynchrone dépend de la résistance interne du rotor. Nous savons également que les intensités primaire (stator) et secondaire (rotor) sont sensiblement proportionnelles. Nous savons donc réaliser avec un moteur à bagues un type de démarrage adapté à tel ou tel impératif, que ce soit en limitation d'intensité (par ex. démarrage sur groupe électrogène) ou en limitation de couple (par ex. démarrage de tapis de grande longueur), simplement en calculant les bonnes valeurs de résistances à insérer, et la progression de ces valeurs au fur et à mesure du déroulement du démarrage.

Comme nous nous trouvons sur la partie descendante des couples moteurs sur chacune des positions (droites de charges), le couple moteur diminue au fur et à mesure que la vitesse augmente, jusqu'à ce qu'il devienne égal au couple résistant ; nous avons alors stagnation, et il faudra passer à une valeur plus faible de résistances, de manière à changer de caractéristique couple – vitesse et poursuivre l'accélération et la mise en vitesse, et ce en fonction des limitations imposées soit en couple, soit en intensité, et jusqu'au court-circuitage final.

### 2.1.15. Différents types de démarreurs rotoriques

Le passage d'une valeur à une valeur plus faible de résistances peut se faire soit par court-circuitages successifs de tronçons (élimination série), soit par mise en parallèle de tronçons supplémentaires (diminution par mise en parallèle). Cette dernière méthode permet l'utilisation de contacteurs intermédiaires (dits 'accélérateurs') de faible calibre, compte tenu qu'une petite partie seulement du courant global les concerne. Cette solution est donc particulièrement intéressante pour les démarrages à nombre de crans élevés.

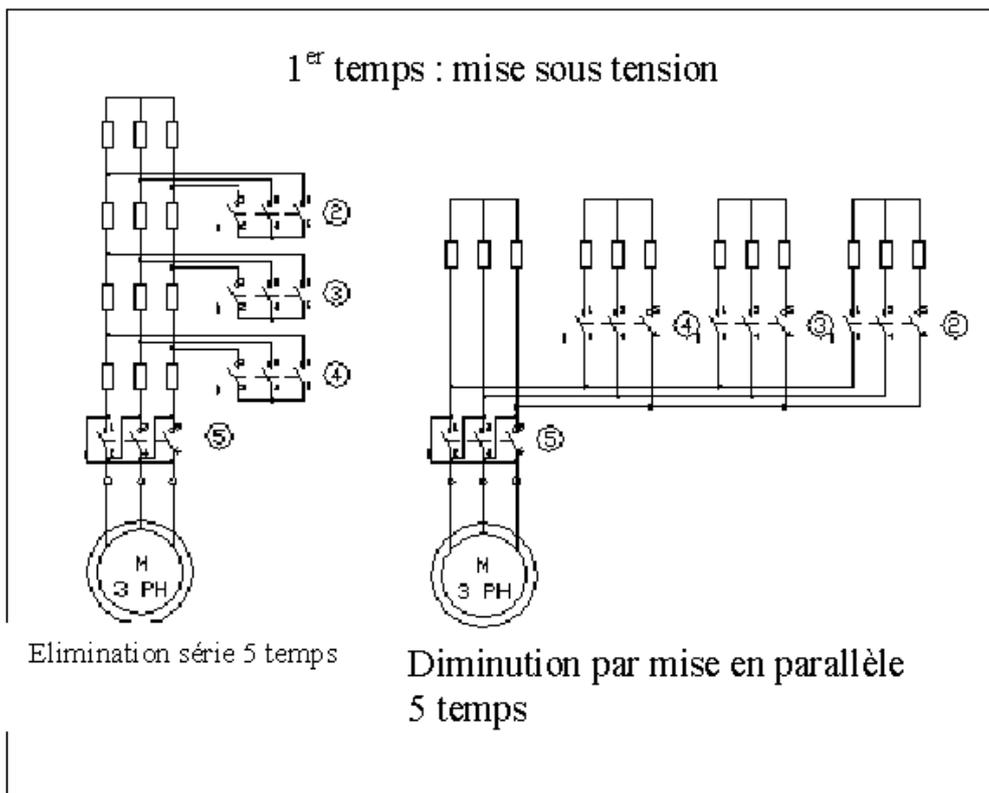


Figure 12 Types de démarreurs rotoriques

### 2.1.16. Différents modes de court-circuitages utilisés

Généralement, les tensions rotoriques maximales admises par les contacteurs utilisés en court-circuitage rotorique sont de deux fois supérieures aux tensions d'emploi pour une utilisation statorique. De même, les contacteurs intermédiaires, caractérisés par un temps de passage du courant assez faible, peuvent être déclassés en conséquence (se référer aux catalogues constructeurs correspondants).

Il existe différentes façons d'effectuer les court-circuitages des différents tronçons par les contacteurs. Ces différentes manières permettent soit de simplifier le montage (par ex. court-circuitage étoile, ou en 'V') soit de gagner encore sur les calibres des contacteurs en effectuant des couplages particuliers (par ex. triangle, ou 'W').

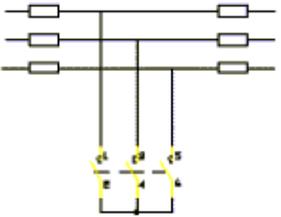
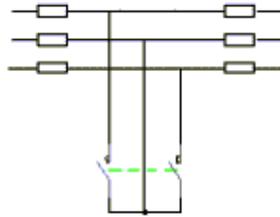
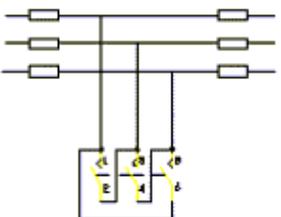
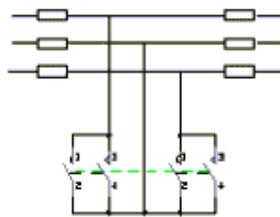
<p style="text-align: center;">ETOILE</p> 	<p style="text-align: center;">COEFF I ROT./I EMPLOI</p> <p style="text-align: center;">1</p>	<p style="text-align: center;">EN V</p> 	<p style="text-align: center;">COEFF I ROT./I EMPLOI</p> <p style="text-align: center;">1</p>
<p style="text-align: center;">TRIANGLE</p> 	<p style="text-align: center;">COEFF I ROT./I EMPLOI</p> <p style="text-align: center;">1.4</p>	<p style="text-align: center;">EN V</p>  <p style="text-align: center;">CONTACTEUR TETRAPOLAIRE</p>	<p style="text-align: center;">COEFF I ROT./I EMPLOI</p> <p style="text-align: center;">1.6</p>

Figure 13 Types de couplage de contacteurs utilisés en court-circuitage rotorique

➤ Réglage de la vitesse :

Pour un couple donné, la valeur du glissement est modifiée par l'insertion d'une résistance dans le rotor, suivant la formule :

$$g = \frac{R_i + R_r}{R_r} g_0$$

où  $g_0$  : glissement rotor court-circuité pour une valeur de couple C

$R_i$  : résistance insérée

$R_r$  : résistance interne du rotor

$g$  : glissement obtenu pour le même couple C avec la résistance  $R_i$  insérée

Il est donc possible, quand les valeurs de couple résistant sont connues pour les différentes vitesses, d'obtenir un certain nombre de positions de glissement et donc d'établir autant de vitesses que l'on veut. L'inconvénient majeur restant bien entendu un mauvais rendement de l'ensemble, dû aux pertes par effet Joule dans les résistances (pertes calorifiques).

Freinage par contre-courant des moteurs à bagues :

Certaines machines nécessitent un freinage énergétique.

Plusieurs systèmes sont utilisés, en particulier le freinage par contre courant pour les moteurs à bagues. Il consiste simplement à inverser deux des trois phases au stator. Le moteur, alimenté en tension inverse, développe un couple négatif ayant tendance à le faire tourner dans le sens contraire ; il s'agit donc d'un couple de freinage (glissement  $> 1$ ). Pour les moteurs à bagues, les caractéristiques couple – vitesse sont fonction des résistances insérées dans le rotor. Généralement, ces résistances insérées sont bien supérieures aux valeurs utilisées pour le démarrage (environ le double).

On aura donc un talon de résistances, inséré entre le point neutre et le premier tronçon de démarrage, qui sera court-circuité pour le démarrage, et mis en service avec les autres résistances pour le freinage.

Application aux moteurs de levage.

#### **D. DÉMARREUR RALENTISSEUR PROGRESSIF DIGITAL 4-800 KW/ 220-660V**

RENDEMENT MAXIMUM.

CONTROLE ELECTRONIQUE TRES PERFORMANT.

LOGICIEL SPECIAL POMPES.

PLUSIEURS MODES D'ACCELERATION ET DE DECELERATION.

ECONOMIE D'ENERGIE.

DOUBLE VITESSE DE FONCTIONNEMENT.

DOUBLE SENS DE ROTATION.

VISUALISATION DES PARAMETRES PAR AFFICHEUR 32 DIGITS.

FACILITE D'INSTALLATION ET D'EXPLOITATION.

## E. MOTEUR A COURANT CONTINU

### 2.1.17. Démarrage par résistances :

Les démarreurs, à insérer en série avec l'inducteur, sont constitués d'un certain nombre d'étages de résistances, équipés de leurs court-circuiteurs. Ils permettent de limiter le courant d'appel à une valeur raisonnable.

### 2.1.18. Principe et fonctionnement :

Concernant les moteurs à excitation shunt, ou légèrement compound, le diagramme de démarrage est tracé de la même façon que pour un moteur à induction bobiné à bagues.

La valeur totale de la résistance qui donne la caractéristique passant par un point C à vitesse nulle a pour valeur :

$$R = \frac{U_n}{I_n \cdot C / C_n}$$

Où  $U_n$ ,  $I_n$  et  $C_n$  sont les valeurs nominales du moteur, et  $r$  sa résistance d'induit.

Concernant les moteurs à excitation série ou compound, le tracé du diagramme de démarrage nécessite la connaissance exacte des caractéristiques moteur (courbe  $n = f(I)$ , résistances internes, éventuellement réaction d'induit...) Ce sont des applications spéciales.

## F. GENERALITES SUR LES RESISTANCES DE DEMARRAGE

### 2.1.19. Présentation

Sobres, robustes, et sans entretien, les résistances DELTA-RESISTANCES sont présentées en coffret de type persiennés, IP23.

La partie active est réalisée en acier inoxydable, qui présente une importante résistance au vieillissement et à l'attaque par les agents corrosifs divers, qui présente également une excellente stabilité dans le temps, un coefficient de température suffisamment faible et des caractéristiques physiques suffisamment stables pour assurer des caractéristiques identiques à tous les démarrages.

### 2.1.20. Souplesse au démarrage :

Le calcul informatique des résistances et des différents éléments modulaires qui doivent les composer confère à nos démarreurs une grande souplesse de démarrage, adaptée parfaitement à chaque moteur et à chaque utilisation.

### 2.1.21. Entretien :

La conception de nos résistances de démarrage permet dans les environnements les plus rudes et les plus néfastes (vibrations, poussière, humidité, chaleur, froid, agents corrosifs...) de fonctionner sans aucun entretien.

L'utilisation de sonde thermique pour la protection des résistances amène une grande sécurité d'utilisation, et une sécurisation contre les démarrages consécutifs trop nombreux ou les démarrages trop longs.

### 2.1.22. Délai de réponse :

L'introduction de l'informatique dans le calcul des résistances et des démarreurs nous permet de répondre immédiatement à tout cas particulier.