

Table des matières

1 Préambule.....	3
1.1 Rappel en électromagnétisme :.....	3
1.2 Avantages du MAS.....	3
1.3 Économies d'énergie, écoconception, développement durable : la normalisation en vigueur au 26/03/12.....	3
2 Constitution et fonctionnement du Moteur Asynchrone triphasé.....	7
2.1 Constitution (résumé).....	7
2.2 Accessoires de surveillance.....	8
3 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé.....	9
4 Présentation physique du MAS.....	9
4.1 Plaque à bornes.....	9
4.2 Plaque signalétique ou plaque d'identification.....	9
5 Formules et relations, couplage, sens de rotation.....	12
5.1 Tensions et couplages.....	12
5.1.1 ETOILE.....	12
5.1.2 TRIANGLE.....	12
5.2 Influence des variations de tension sur le fonctionnement du MAS.....	13
5.3 Sens de rotation.....	14
5.4 Expression de la puissance électrique = puissance absorbée.....	14
5.5 Fréquences - Vitesses.....	14
5.5.1 Fréquence (Vitesse) de synchronisme = fréquence du champ tournant.....	14
5.5.2 Fréquence (Vitesse) de rotation du moteur = fréquence de rotation du rotor.....	14
5.5.3 Fréquences (vitesses) de synchronisme courantes.....	15
5.5.4 Calcul du glissement.....	15
5.5.5 Vitesse angulaire :.....	15
5.6 Puissance mécanique : puissance utile.....	15
5.7 Rendement.....	15
6 Courbes caractéristiques du MAS et des différentes charges.....	16
6.1 Allures de couples résistants caractéristiques.....	16
6.2 Démarrage direct du MAS : courbes caractéristiques.....	16
6.3 Point de fonctionnement du moteur en charge.....	16
6.4 Quadrants de fonctionnement.....	17
7 Choix du matériel de « départ-moteur ».....	17
8 Maintenance des MAS.....	19
9 Autres démarrages du MAS.....	20
9.1 Démarrage étoile-triangle.....	22
9.1.1 Principe.....	22
9.1.2 Conséquence.....	23
9.1.3 Cas d'impossibilité.....	23
9.1.4 Avantages.....	23
9.1.5 Inconvénients.....	23
9.1.6 Influence de la position du relais thermique sur son réglage.....	24
9.2 Autres démarrages.....	25
9.2.1 Démarrage par auto-transformateur.....	25
9.2.2 Démarrage par élimination de résistances au stator (ou démarrage statorique).....	25
9.2.3 Démarrage rotorique ou Élimination de résistances au rotor.....	25
9.2.4 Démarrages électroniques (voir chapitre sur « la variations de vitesse »).....	26
9.3 Conclusion sur les démarrages de MAS.....	27
10 Freinage des moteurs asynchrones.....	28
10.1 Introduction.....	28
10.2 Freinages électriques.....	28
10.2.1 Freinage par injection de courant continu (principe identique au frein par courant de Foucault).....	28
10.2.2 Freinage hyper synchrone.....	29
10.2.3 Freinage par contre courant.....	29
10.3 Freinages mécaniques.....	30
10.3.1 Introduction.....	30
10.3.2 Frein à appel de courant.....	30
10.3.3 Frein à manque de courant.....	31
10.4 Synthèse sur les freinages de moteurs asynchrones.....	31
11 Annexes techniques.....	32
11.1 Les services (CEI 60034-1).....	32
11.2 Mode de fixation et position de montage (CEI 60034-7).....	33
11.3 Les modes de refroidissement (CEI 60 034-6) : code IC (International Cooling).....	34

1 Préambule

1.1 Rappel en électromagnétisme :

- tout conducteur soumis à une variation de champ produit une force électromotrice induite pouvant être à l'origine de courant, s'il existe un circuit électrique
- tout conducteur parcouru par un courant produit un champ magnétique dont l'allure dans le temps lui est identique (aux phénomènes de saturation près).

On appelle « machines électriques » les convertisseurs d'énergie électrique basés sur les lois de l'électromagnétisme.

On distingue deux sortes de machines :

- les machines tournantes (moteur, génératrice, alternateur)
- la machine statique (transformateur)

Dans les machines tournantes, on distingue :

- les moteurs : convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique.
- les générateurs : convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le **moteur asynchrone** représente environ 80% du parc « moteurs électriques », c'est de loin le plus répandu...
...Même si les solutions électroniques du 21^{ème} siècle ont tendance à faire développer d'autres solutions...

1.2 Avantages du MAS

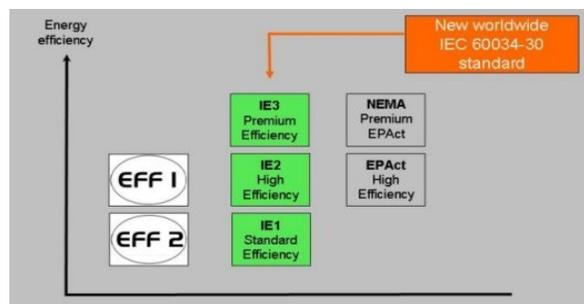
- une maintenance réduite car pas de balais ni collecteur (voir paragraphe 8 Maintenance des MAS)
- sa robustesse
- son prix (facile à produire, en série)

1.3 Économies d'énergie, écoconception, développement durable : la normalisation en vigueur au 26/03/12.

Nouvelle norme de classification du rendement des moteurs électriques : CEI 60034-30 (Septembre 2008)

Actuellement, diverses normes de rendement pour les moteurs asynchrones existent dans des régions et des pays différents du globe. Il peut également s'agir suivant les régions d'une recommandation ou d'une réglementation légale. Outre les diverses normes et lois sur les classes de rendement, il existe aussi toute une variété de méthodes de test différentes pour déterminer le rendement. Ainsi, non seulement est-il difficile de comparer les différentes classes de rendement sur le plan international, mais la certification pour chaque marché des moteurs fabriqués demande beaucoup d'efforts.

C'est pourquoi la CEI a développé une norme visant à harmoniser les classes de rendement au niveau **mondial**. La nouvelle norme CEI 60034-30:2008 doit remplacer les divers systèmes nationaux. Dans le même temps, la norme CEI 60034-2-1:2007 introduit un nouveau procédé de mesure des rendements qui doit également être harmonisé au niveau mondial.

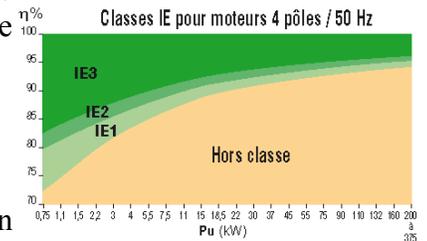


La norme internationale CEI 60034 applicable aux machines électriques tournantes pour moteurs triphasés à induction à cage à mono-vitesse, **précédemment** regroupés sous les classes d'efficacité EFF1 à EFF3 (cette classification a disparu officiellement depuis le 16 juin 2011, elle n'est présentée ici que pour des raisons de correspondance avec des machines déjà installées):

- EFF1 Moteurs à haut rendement
- EFF2 Moteurs à efficacité renforcée
- EFF3 Moteurs normaux

La norme CEI 60034 est désormais modifiée par une partie 30 (CEI 60034-30): classes de rendement pour les moteurs à induction triphasés à cage mono-vitesse (code IE). Elle propose une norme unifiée **internationalement** qui classe les moteurs à induction basse tension dans de nouvelles classes de rendement:

- IE3 Rendement premium
- IE2 Haut rendement
- IE1 Rendement standard (commercialisation interdite depuis le 16 juin 2011)



Cette classification remplace donc les classes de rendement EFF, NEMA/EPAct existantes.

Au Mexique, la norme en vigueur, ([NOM-016-ENER-2010](#) pour moteurs triphasés de 0,746 à 373kW) n'y fait référence qu'à titre bibliographique :

NOM-016-ENER-2010, art. 14. Concordancia con normas internacionales : Esta norma oficial mexicana no concuerda con ninguna norma internacional, por no existir referencia alguna en el momento de su elaboración.

Cependant, ses spécifications se rapprochent souvent de la classification IE3, plus rarement de IE2... Donc un peu en avance sur l'Europe dans le calendrier d'application ! À noter que n'y sont inscrits que les moteurs alimentés 60Hz.

PAYS / ZONE	NORME ou RÉGLEMENTATION	NOM	LABEL	DATE	OBLIGATION	GAMMES CONCERNÉES	PRODUITS
Europe	CEI 60034-2	CEMEP	EFF 2/1	1 janvier 2008	non	2 & 4P 1,1 à 90 kW IP55	Eff2 ou Eff1
	CEI 60034-2-1 / CEI 60034-30	EuP	IE2	16 juin 2011	oui	2,4 & 6P 0,75 à 375 kW IP55 et IP23	IE2
			IE3	1 janvier 2015		2,4 & 6P 7,5 à 375 kW IP55 et IP23	IE2 + IE3*
IE3	1 janvier 2017	2,4 & 6P 0,75 à 375 kW IP55 et IP23	IE3*				
Israël	CEI 60034-2		EFF 1	1 janvier 2006	oui	2 & 4P 1,1 à 90 kW IP55	Eff1 ou IE2
USA	IEEE 112- B	EPAct'92	EPAct	1 janvier 1997	oui	2,4 & 6P 0,75 à 400 kW IP55 et 23	IE1 ou IE2
		EPAct'05	NEMA Premium	1 janvier 2011	oui	2,4 & 6P 0,75 à 350 kW IP55 et 23	IE3
Canada	CAN/CSA-C390-93	NRCan	EPAct	1 janvier 1997	oui	2,4 & 6P 0,75 à 150 kW IP55 et 23	IE1 ou IE2
			NEMA Premium	1 janvier 2011	oui	2,4 & 6P 0,75 à 375 kW IP55 et 23	IE3
China	GB 18613-2005	GB/T 1032	Grade 3	1 octobre 2008	non	2,4 & 6P 0,55 à 315 kW IP55	IE1
			Grade 2	1 juillet 2011	oui	2,4 & 6P 0,55 à 315 kW IP55	IE2
			Grade 1	1 octobre 2008	non	2,4 & 6P 4 à 315 kW IP55	IE3
Australie	AS NZS 1359.5-2000	MEPS		1 avril 2006	oui	2,4 & 6P 0,75 à 185 kW	IE1 ou IE2
New Zealand	Méthode A (IEEE 112-B) Méthode B (CEI 60034-2)						IE1 ou IE2
Korea	KS C CEI 61972 CEI 60034-2-1	MKE's		1 juillet 2008	oui	2,4 & 6P 45 à 200 kW IP55 et IP23	IE1 ou IE2
				1 janvier 2010	oui	2,4 & 6P 0,75 à 200 kW IP55 et IP23	IE1 ou IE2
Mexico	NOM016 ENER 1977		EPAct	1 janvier 1997	oui	2,4 & 6P 0,75 à 400 kW IP55 et 23	IE1 ou IE2
	NOM016 ENER 2010		NEMA Premium	1 janvier 2011	oui	2,4 & 6P 0,75 à 350 kW IP55 et 23	IE3
Brazil	NBR 5383-1 part 1		EPAct	1 janvier 1997	oui	2,4 & 6P 0,75 à 400 kW IP55 et 23	IE1 ou IE2
			NEMA Premium	1 janvier 2011	oui	2,4 & 6P 0,75 à 350 kW IP55 et 23	IE3

MEPS	Minimum Efficiency Performance Standards	*IE3 ou IE2 + variateur
CEMEP	European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics	IE 1 = standard efficiency
EuP	Energy using Product	IE 2 = high efficiency
EPAct	Energy Policy Act	IE 3 = premium efficiency
NRCan	Natural Resources Canada	
MKE's	Ministry of Knowledge Economy/s	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
CEI / CEI	International Electrotechnical Commission	
CSA	Canadian Standards Association	

Depuis le 16 juin 2011, tous les moteurs commercialisés doivent donc être IE2 ou IE3.

À compter du 1er janvier 2015, seuls les moteurs IE3 seront autorisés pour un fonctionnement en ligne direct, bien que les moteurs IE2 avec variateur de vitesse soient aussi admis pour la plage de puissance de 7,5 - 375kW.



À compter du 1er janvier 2017, seuls les moteurs IE3 seront autorisés.

Rendements minima imposés par la CEI 60034

14

Nouvelles normes et directives de rendement des moteurs Leroy-Somer

kW	60 Hz								
	IE-1 rendement niveau "STANDARD"			IE-2 rendement niveau "HAUT"			IE-3 rendement niveau "PREMIUM"		
	2 pôles	4 pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87,6	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94,0	93,7	94,7	95,0	94,6
90	93,0	93,0	92,9	94,1	94,2	94,0	95,0	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,8	93,8	93,8	94,8	94,9	94,8	95,6	95,8	95,6
200 à 375	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8

Tableau des valeurs de rendements assignés (50Hz)

Nouvelles normes et directives de rendement des moteurs Leroy-Somer

15

kW	60 Hz								
	IE-1 rendement niveau "STANDARD"			IE-2 rendement niveau "HAUT"			IE-3 rendement niveau "PREMIUM"		
	2 pôles	4 pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles
0,75	77,0	78,0	73,0	75,5	82,5	80,0	77,0	85,5	82,5
1,1	78,5	79,0	75,0	82,5	84,0	85,5	84,0	86,5	87,5
1,5	81,0	81,5	77,0	84,0	84,0	86,5	85,5	86,5	88,5
2,2	81,5	83,0	78,5	85,5	87,5	87,5	85,5	89,5	89,5
3,7	84,5	85,0	83,5	87,5	87,5	87,5	85,5	89,5	89,5
5,5	86,0	87,0	85,0	88,5	89,5	89,5	88,5	89,5	91,7
7,5	87,5	87,5	86,0	89,5	89,5	89,5	90,2	91,7	91,0
11	87,5	88,5	88,0	90,2	91,0	90,2	91,0	92,4	91,7
15	88,5	89,5	89,5	90,2	91,0	90,2	91,0	93,0	91,7
18,5	89,5	90,5	90,2	91,0	92,4	91,7	91,7	93,6	93,0
22	89,5	91,0	91,0	91,0	92,4	91,7	91,7	93,6	93,0
30	90,2	91,7	91,7	91,7	93,0	93,0	92,4	94,1	94,1
37	91,5	92,4	91,7	92,4	93,0	93,0	93,0	94,5	94,1
45	91,7	93,0	91,7	93,0	93,6	93,6	93,6	95,0	94,5
55	92,4	93,0	92,1	93,0	94,1	93,6	93,6	95,4	94,5
75	93,0	93,2	93,0	93,6	94,5	94,1	94,1	95,4	95,0
90	93,0	93,2	93,0	94,5	94,5	94,1	95,0	95,4	95,0
110	93,0	93,5	94,1	94,5	95,0	95,0	95,0	95,8	95,8
160	94,1	94,5	94,1	95,0	95,0	95,0	95,4	96,2	95,8
200 à 375	94,1	94,5	94,1	95,4	95,4	95,0	95,8	96,2	95,8

Tableau des valeurs de rendements assignés (60Hz)

source : Leroy Somer - [NOUVELLES NORMES ET DIRECTIVES DE RENDEMENT APPLICABLES AUX MOTEURS À INDUCTION TRIPHASÉS À CAGE](#)

Tabla 2.- Valores de eficiencia nominal a plena carga para motores verticales y horizontales, en por ciento

Potencia Nominal, kW	Potencia Nominal cp	MOTORES CERRADOS				MOTORES ABIERTOS			
		2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,746	1	77,0	85,5	82,5	74,0	77,0	85,5	82,5	74,0
1,119	1,5	84,0	86,5	87,5	77,0	84,0	86,5	86,5	75,5
1,492	2	85,5	86,5	88,5	82,5	85,5	86,5	87,5	85,5
2,238	3	86,5	89,5	89,5	84,0	85,5	89,5	88,5	86,5
3,730	5	88,5	89,5	89,5	85,5	86,5	89,5	89,5	87,5
5,595	7,5	89,5	91,7	91,0	85,5	88,5	91,0	90,2	88,5
7,460	10	90,2	91,7	91,0	88,5	89,5	91,7	91,7	89,5
11,19	15	91,0	92,4	91,7	88,5	90,2	93,0	91,7	89,5
14,92	20	91,0	93,0	91,7	89,5	91,0	93,0	92,4	90,2
18,65	25	91,7	93,6	93,0	89,5	91,7	93,6	93,0	90,2
22,38	30	91,7	93,6	93,0	91,0	91,7	94,1	93,6	91,0
29,84	40	92,4	94,1	94,1	91,0	92,4	94,1	94,1	91,0
37,30	50	93,0	94,5	94,1	91,7	93,0	94,5	94,1	91,7
44,76	60	93,6	95,0	94,5	91,7	93,6	95,0	94,5	92,4
55,95	75	93,6	95,4	94,5	93,0	93,6	95,0	94,5	93,6
74,60	100	94,1	95,4	95,0	93,0	93,6	95,4	95,0	93,6
93,25	125	95,0	95,4	95,0	93,6	94,1	95,4	95,0	93,6
111,9	150	95,0	95,8	95,8	93,6	94,1	95,8	95,4	93,6
149,2	200	95,4	96,2	95,8	94,1	95,0	95,8	95,4	93,6
186,5	250	95,8	96,2	95,8	94,5	95,0	95,8	95,4	94,5
223,8	300	95,8	96,2	95,8	---	95,4	95,8	95,4	---
261,1	350	95,8	96,2	95,8	---	95,4	95,8	95,4	---
298,4	400	95,8	96,2	---	---	95,8	95,8	---	---
335,7	450	95,8	96,2	---	---	95,8	96,2	---	---
373	500	95,8	96,2	---	---	95,8	96,2	---	---

Exclusions de l'écoconception

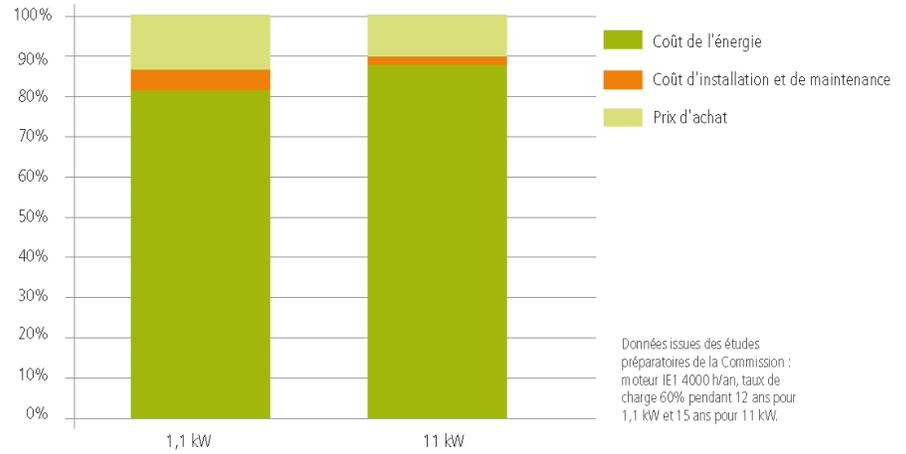
En raison de leur service cyclique, les servomoteurs sont exclus.

La norme ne s'applique pas non plus :

- aux moteurs conçus pour fonctionner en immersion complète dans un liquide
- aux moteurs complètement intégrés dans un produit
- aux moteurs conçus spécifiquement pour fonctionner dans au moins une condition suivante :
 - altitude > 1 000 mètres au-dessus du niveau de la mer,
 - températures d'air ambiant > 40°C,
 - température de service maximale > 400 °C,

- températures d'air ambiant $< -15^{\circ}\text{C}$ pour tous les moteurs ou $< 0^{\circ}\text{C}$ pour les moteurs avec refroidissement à air,
- température de l'eau de refroidissement $< 5^{\circ}\text{C}$ ou $> 25^{\circ}\text{C}$ à l'entrée du moteur
- dans des atmosphères potentiellement explosibles, telles que définies dans la directive ATEX 94/9/CE;
- aux moteurs-freins.

Bien que la CEI 60034 ne s'applique pas à ces cas, certains constructeurs ont décidés de l'appliquer dans leur fabrication (exemple : « Moteur frein FCR » de Leroy Somer).



Et pour finir, un argument commercial :

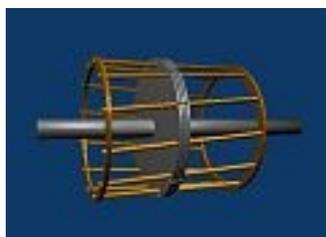
2 Constitution et fonctionnement du Moteur Asynchrone triphasé.

2.1 Constitution (résumé)

- le **stator** : c'est la partie magnétique fixe du MAS. Elle comporte des enroulements qui, alimentés en énergie électrique, vont produire un champ magnétique tournant. Le stator est fixé sur la carcasse.

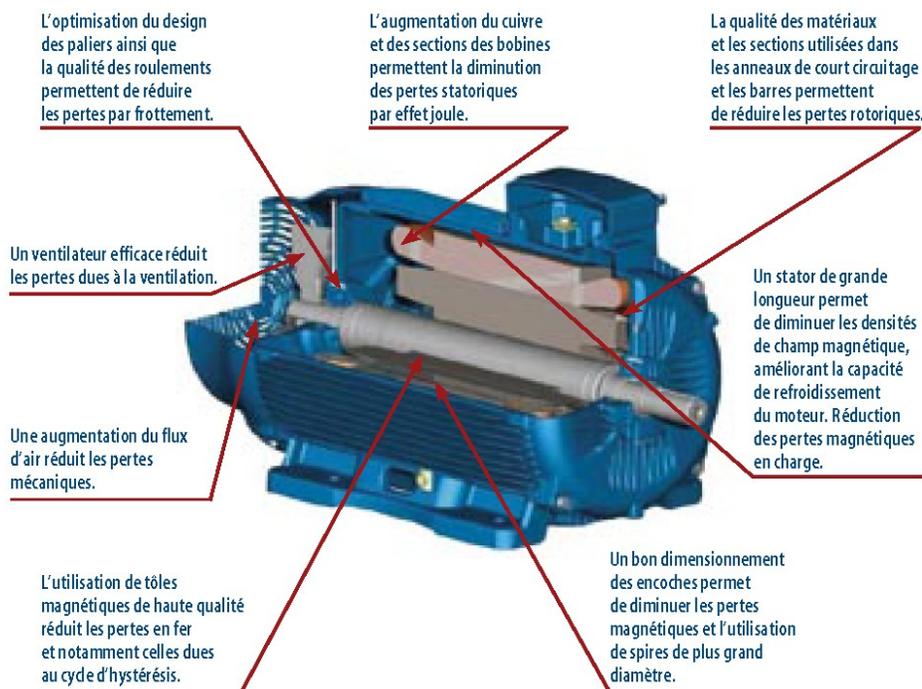


- le **rotor** : partie libre en rotation comportant des conducteurs qui seront soumis au champ tournant. Ces conducteurs peuvent être soit des bobines (technologie en voie de disparition) soit des barres de cuivres ; on parle alors de rotor en court-circuit (ou à cage à d'écureuil¹). La rotation possible grâce aux paliers supportés par la carcasse.



- la **plaque à bornes** : fixée sur la carcasse, elle comporte un ensemble de 6 bornes permettant de connecter les bobines statoriques à l'alimentation électrique en effectuant le couplage (voir paragraphe 4.1).
- la **plaque d'identification (ou plaque signalétique)**² : fixée sur la carcasse, elle représente la fiche d'identité du MAS (voir paragraphe 4.2).

Mais, comment fabrique-t-on un MAS Haut Rendement ? La figure ci-dessous illustre certains procédés employés (source : revue « Mesures », numéro 822 de février 2010)

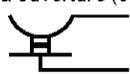
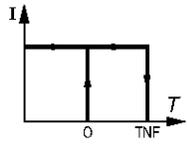
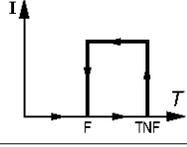
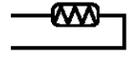
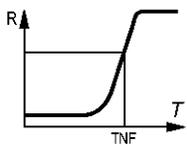
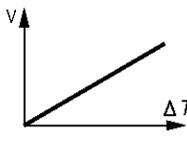
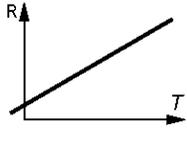


1 Cage d'écureuil : « jaula de ardilla » dans les normes mexicaines, donc traduction littérale intégrale.

2 Plaque signalétique : « placa de datos » dans les normes mexicaines

2.2 Accessoires de surveillance

La température du moteur est un élément essentiel à surveiller ! Certaines techniques de protection en font une surveillance indirecte par évaluation de l'échauffement dû au courant absorbé (cas du relais de protection thermique). Mais il est également possible de prévoir ce contrôle lors de l'achat du moteur. Ci-après, un exemple de matériels courants intégrables par le constructeur (source : Leroy Somer) :

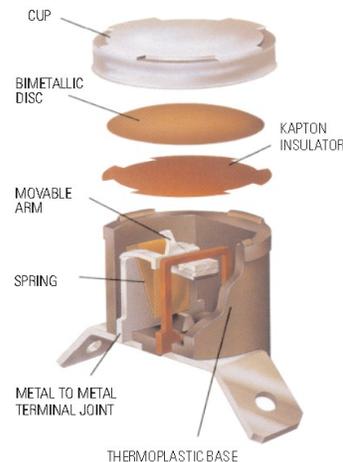
Type	Principe du fonctionnement	Courbe de fonctionnement	Pouvoir de coupure (A)	Protection assurée	Montage Nombre d'appareils*
Protection thermique à ouverture PTO	bilame à chauffage indirect avec contact à ouverture (O) 		1,6 sous 250 V à $\cos \varphi$ 0,6	surveillance globale surcharges lentes	Montage dans circuit de commande 2 ou 3 en série
Protection thermique à fermeture PTF	bilame à chauffage indirect avec contact à fermeture (F) 		1,6 sous 250 V à $\cos \varphi$ 0,6	surveillance globale surcharges lentes	Montage dans circuit de commande 2 ou 3 en parallèle
Thermistance à coefficient de température positif CTP	Résistance variable non linéaire à chauffage indirect 		0	surveillance globale surcharges rapides	Montage avec relais associé dans circuit de commande 3 en série
Thermocouples T (T<150°C) Cuivre Constantan K (T<1000°C) Cuivre Cuivre-Nickel	Effet Peltier		0	surveillance continue ponctuelle des points chauds	Montage dans les tableaux de contrôle avec appareil de lecture associé (ou enregistreur) 1 par point à surveiller
Sonde thermique au platine PT 100	Résistance variable linéaire à chauffage indirect		0	surveillance continue de grande précision des points chauds clés	Montage dans les tableaux de contrôle avec appareil de lecture associé (ou enregistreur) 1 par point à surveiller

- TNF : température nominale de fonctionnement.

- Les TNF sont choisies en fonction de l'implantation de la sonde dans le moteur et de la classe d'échauffement.

* Le nombre d'appareils concerne la protection des bobinages.

Les **PTO** ou **PTF** portent parfois d'autres noms : « **ipsotherme** » (pour les moteurs), Klixon (dans les chauffages) ou thermostat bimétallique voire simplement **thermocontact**. Ils fonctionnent sur le principe du bilame.



Les thermistances (CTN et CTP) sont également désignées par « **RTD** » (Resistance Temperature Detector).

3 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé

On dispose sur le stator trois bobines identiques réparties géométriquement à 120° l'une de l'autre.

Ces *trois bobines alimentées* par trois tensions décalées à 120° électrique (période = 360°), issues donc d'un *système triphasé*, produisent un *champ magnétique tournant* (champ inducteur), le rotor se trouvant au centre de ce champ. Tant que le rotor a une *fréquence de rotation différente* que celle du champ inducteur, chaque point de rotor « voit » une *variation de champ*. Les conducteurs rotoriques produisent donc une f.é.m. qui, dans le circuit fermé, va donner naissance à des *courants induits*. Ces courants vont à leur tour produire un *champ magnétique induit* qui va s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Cela se traduit concrètement par un phénomène de poursuite du rotor vis à vis du champ tournant sans qu'il n'arrive jamais à le rattraper.

CONCLUSION : Le rotor ne peut jamais tourner à la même vitesse que le stator (sauf entraînement mécanique extérieur)

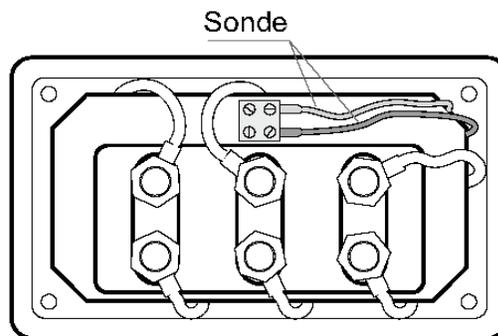
Exemple d'animation sur le champ tournant : http://web.cortial.net/bibliohtml/chptri_j.html

4 Présentation physique du MAS

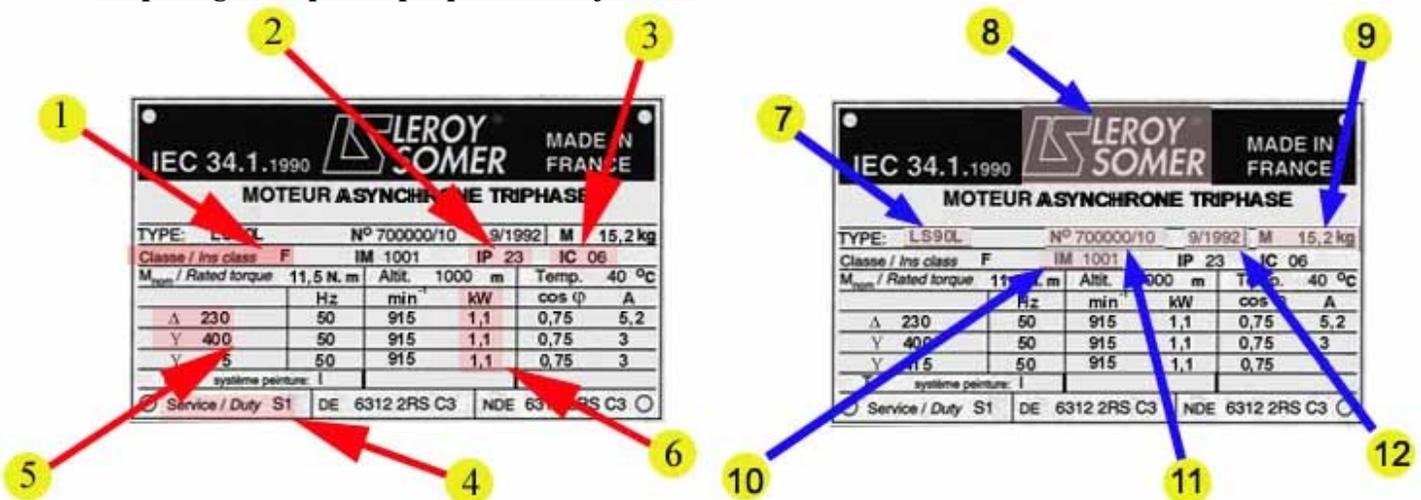
4.1 Plaque à bornes

C'est le dispositif permettant de raccorder le moteur à son alimentation. On n'y retrouve chacune des deux extrémités de chacun des trois enroulements.

Lorsque le moteur comporte des accessoires (protection thermique ou résistance de réchauffage), ceux-ci sont raccordés sur des dominos à vis ou des planchettes par des fils repérés.



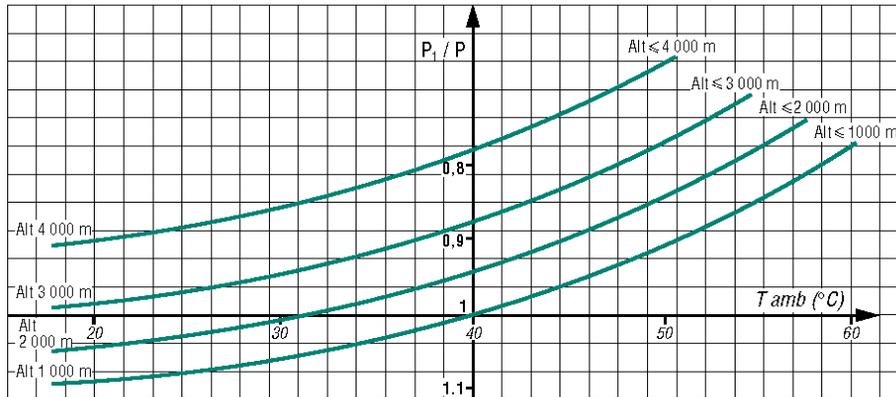
4.2 Plaque signalétique ou plaque d'identification



C'est la carte d'identité du moteur, on y retrouve fréquemment :

- ❶ la classe de température ou classe d'isolant. Elle est repérée par une lettre (ex : B, E ou F) et contient deux renseignements

- la température maximum du moteur : θ_{MAX}
- l'échauffement maximum du moteur : $\Delta\theta_{MAX}$
 - Si on note θ_A la température ambiante, on peut écrire $\theta_{MAX} = \Delta\theta_{MAX} + \theta_A$
 - L'échauffement $\Delta\theta$ est dû aux pertes joules, donc au courant, un déclassement du moteur permettra de diminuer l'échauffement en limitant la puissance utile, qui est alors inférieure à sa valeur nominale.



- ② l'indice de protection IP sur deux chiffres
 - 1er chiffre : protection contre la pénétration des corps solides
 - 2ème chiffre : protection contre la pénétration des corps liquides
- ③ le mode de refroidissement (voir paragraphe 11.3)
- ④ le type de service (ex : S1, le service continu) pour lequel les valeurs inscrites sont « données nominales » (voir paragraphe 11.1).
- ⑤ les caractéristiques d'alimentation électrique (ex : 230/400V 9/5.2A 50Hz). Le MAS accepte en général une variation de plus ou moins 10% au tour de ces valeurs nominales. Les conséquences de ces variations sont illustrées ci-dessous :

	Variation de la tension en %				
	UN-10%	UN-5%	UN	UN+5%	UN+10%
Courbe de couple	0,81	0,90	1	1,10	1,21
Glissement	1,23	1,11	1	0,91	0,83
Courant nominal	1,10	1,05	1	0,98	0,98
Rendement nominal	0,97	0,98	1	1,00	0,98
Cos φ nominal	1,03	1,02	1	0,97	0,94
Courant de démarrage	0,90	0,95	1	1,05	1,10
Echauffement nominal	1,18	1,05*	1	1*	1,10
P (Watt) à vide	0,85	0,92	1	1,12	1,25
Q (var) à vide	0,81	0,9	1	1,1	1,21

* Le supplément d'échauffement selon la norme CEI 60034-1 ne doit pas excéder 10 K aux limites $\pm 5\%$ de U_N .

- ⑥ la puissance utile (on indique toujours ce type de puissance, sauf dans le cas d'une pompe où la puissance absorbée est indiquée) \Rightarrow puissance mécanique (ex : 2.2kW - 3ch)
RAPPEL : 1 ch \Leftrightarrow 736W en Europe (attention, le cheval britannique³ est différent car issu du système impérial : 1HP=746W)
- ⑦ le type et 11 le numéro de série du moteur
- ⑧ le nom du constructeur
- ⑨ la masse du moteur

3 Attention : au Mexique, c'est effectivement le Horse Power britannique qui est utilisé, donc 746W. Voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cheval-vapeur>

- ⑩ la position du montage (voir paragraphe 11.2)

- l'indice de résistance aux chocs : IK

- le rendement nominal $\eta = P_u / P_a$

P_u : Puissance utile (mécanique)

P_a : Puissance absorbée (électrique)

- le facteur de puissance : $\cos \varphi$ (déphasage en sinusoïdal entre V et J). Au démarrage, sa valeur est faible (0,35 environ) puis croît jusque environ 0,8.

- La fréquence nominale de rotation en tr.min^{-1} , *voire de plus en plus fréquemment en « min^{-1} »*

Avec le marquage IE obligatoire depuis juin 2011 (CEI60034-30), voici la nouvelle présentation des plaques signalétiques :

V	Hz	min^{-1}	kW	$\cos \varphi$	A
Δ 230	50	1450	5,50	0,83	18,90
λ 400	50	1450	5,50	0,83	10,90
λ 460	60	1760	5,50	0,74	10,35

* D'autres logos peuvent être réalisés en option :
une entente préalable à la commande est impérative.

V	Hz	min^{-1}	kW	$\cos \varphi$	A
Δ 230	50	1470	30	0,84	96
Y 400					55,6
Y 460	60	1777	30	0,82	49,1

V	Hz	min^{-1}	kW	A	$\cos \varphi$
400 Δ	50	1481	75	140	0,82
690 λ				81	
460 Δ	60	1781	75	123	0,81

Définition des symboles des plaques signalétiques :



Repère légal de la conformité
du matériel aux exigences
des Directives Européennes.

MOT 3 ~ : Moteur triphasé alternatif
LSES : Série
132 : Hauteur d'axe
S : Symbole de carter

N° moteur

123456 : Numéro série moteur
E : Mois de production
11 : Année de production
001 : N° d'ordre dans la série
IE2 : Classe de rendement
83,8% : Rendement à 4/4 de charge

IP55 IK08 : Indice de protection
I cl. F : Classe d'isolation F
40°C : Température d'ambiance contractuelle de fonctionnement
S1 : Service - Facteur de marche
kg : Masse
V : Tension d'alimentation
Hz : Fréquence d'alimentation
 min^{-1} : Nombre de tours par minute
kW : Puissance assignée
 $\cos \varphi$: Facteur de puissance
A : Intensité assignée
 Δ : Branchement triangle
Y : Branchement étoile

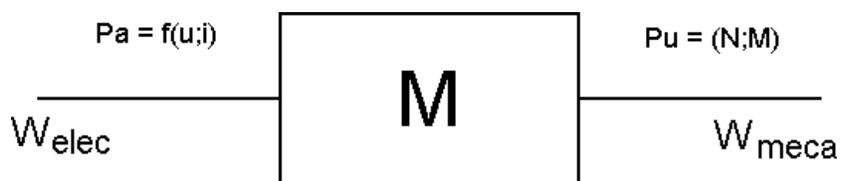
Roulements

DE : Drive end
Roulement côté entraînement
NDE : Non drive end
Roulement côté opposé à l'entraînement
g : Masse de graisse à chaque regraissage (en g)
h : Périodicité de graissage (en heures)

POLYREX EM 103 : Type de graisse

Δ : Niveau de vibration
 H : Mode d'équilibrage

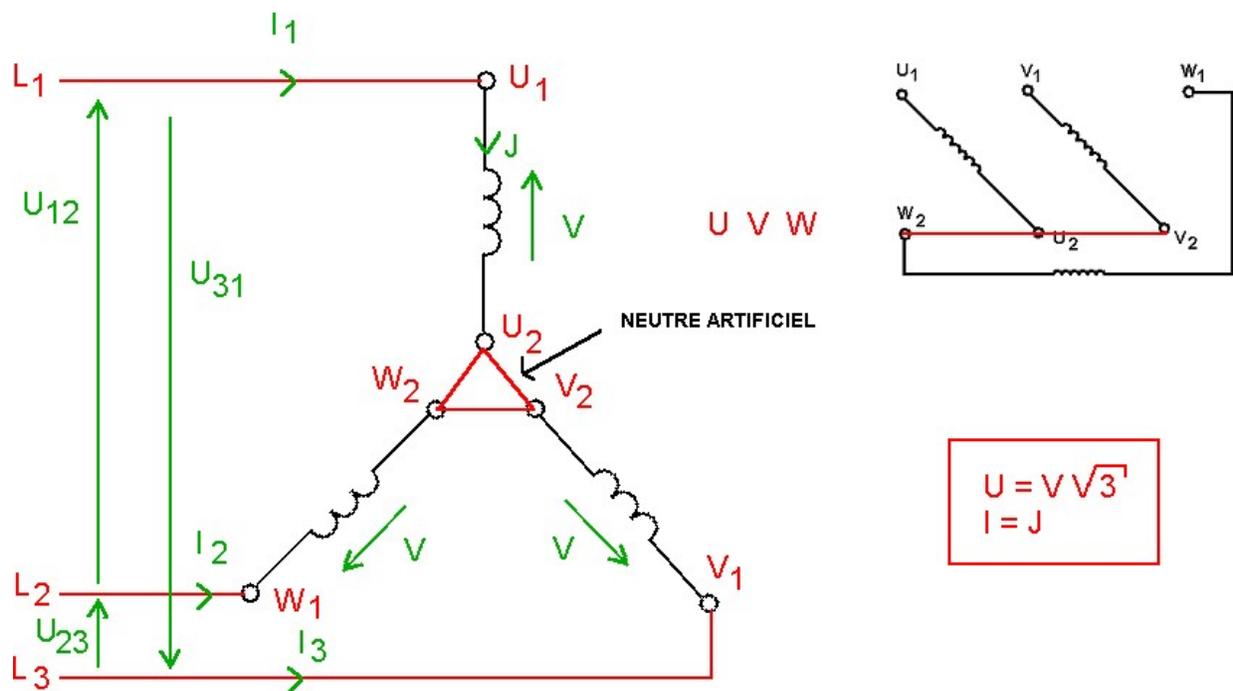
5 Formules et relations, couplage, sens de rotation



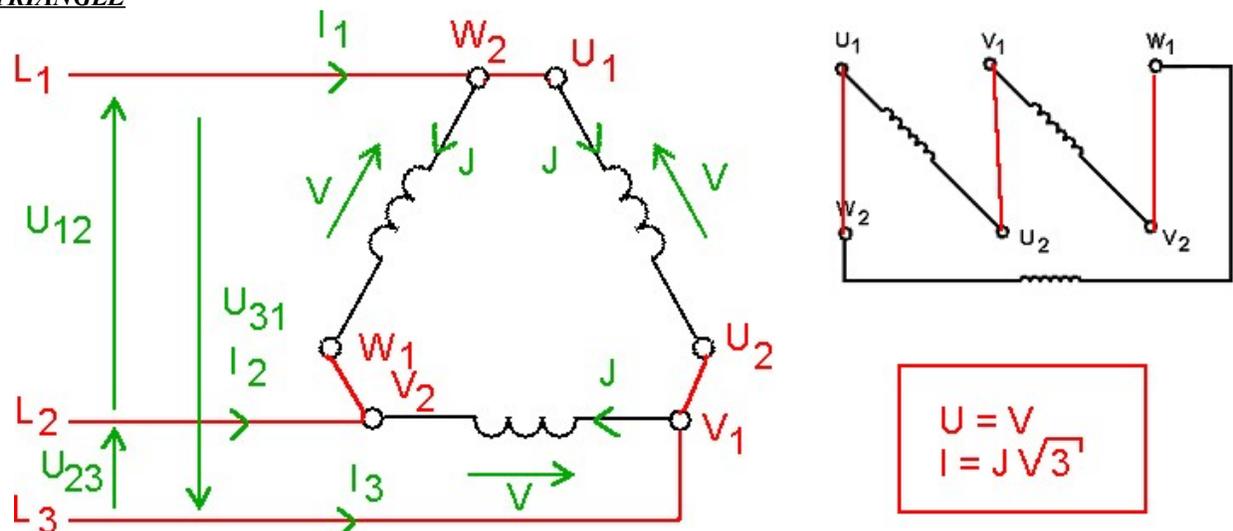
5.1 Tensions et couplages

- tension entre phases (composée) : U
- tension simple : V
- courant en ligne : I
- courant dans les enroulements : J

5.1.1 ETOILE



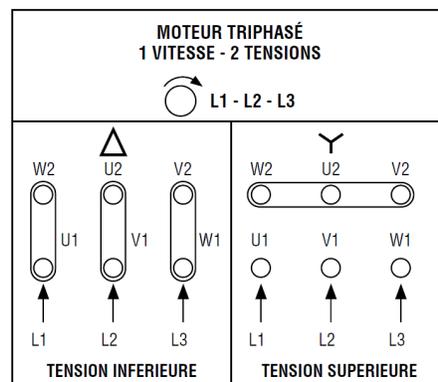
5.1.2 TRIANGLE



ATTENTION : La plus petite des tensions est celle qui doit toujours être appliquée à chaque enroulement pour obtenir un régime nominal.

Donc selon la tension du réseau, chaque enroulement devra être alimenté soit entre deux phases (couplage triangle) soit entre phase et neutre (couplage étoile), sachant que pour le réseau, la tension que l'on précise est systématiquement la tension composée.

RESEAU	MOTEUR	COUPLAGE
3x400V	230/400V	ETOILE
3x230V	230/400V	TRIANGLE
3x660V	400/690V	ETOILE
3x380V	127/200V	IMPOSSIBLE : suralimentation
3x380V	380/660V	TRIANGLE
3x220V	400/690V	IMPOSSIBLE : sous-alimentation
3x660V	380/660V	ETOILE



5.2 Influence des variations de tension sur le fonctionnement du MAS.

Source : Schneider Electric - Catalogue distribution électrique 2002 - page K – Chapitre K1c

Les moteurs sont donnés pour une tension nominale d'alimentation $U_n \pm 5\%$. En dehors de cette plage, les caractéristiques mécaniques se dégradent rapidement. Dans la pratique, plus un moteur est gros, plus il est sensible aux tensions :

- inférieures à U_n : échauffements anormaux par augmentation du temps de démarrage
- supérieures à U_n : augmentation des pertes Joule et des pertes fer (pour les moteurs très optimisés...).

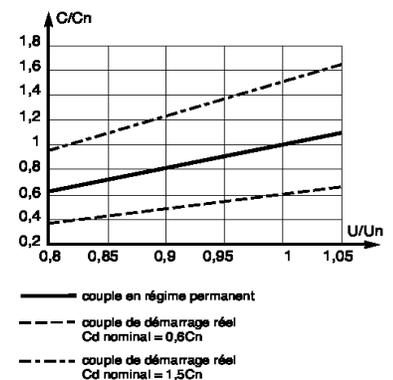
Sur le plan thermique, plus un moteur est gros, plus il peut évacuer de calories, mais l'énergie à dissiper croît encore plus vite. Une baisse de tension d'alimentation, en diminuant fortement le couple de démarrage, fait augmenter le temps de démarrage et échauffe les enroulements.

Exemple :

Un moteur de puissance moyenne alimenté à 90 % de sa tension nominale fournit :

- en fonctionnement : 81 % de son couple nominal au lieu de 100 %
- au démarrage : 121 % du couple nominal au lieu de 150%.

La courbe ci-contre montre que les couples C et C_n varient en fonction du carré de la tension. Ce phénomène passe relativement inaperçu sur les machines centrifuges mais peut avoir de graves conséquences pour les moteurs entraînant des machines à couple hyperbolique ou à couple constant. Ces défauts de tension peuvent réduire notablement l'efficacité et la durée de vie du moteur ou de la machine entraînée.



Effets des variations de la tension d'alimentation

	Variation de la tension en %				
	UN-10%	UN-5%	UN	UN+5%	UN+10%
Courbe de couple	0,81	0,90	1	1,10	1,21
Glissement	1,23	1,11	1	0,91	0,83
Courant nominal	1,10	1,05	1	0,98	0,98
Rendement nominal	0,97	0,98	1	1,00	0,98
Cos φ nominal	1,03	1,02	1	0,97	0,94
Courant de démarrage	0,90	0,95	1	1,05	1,10
Echauffement nominal	1,18	1,05*	1	1*	1,10
P (Watt) à vide	0,85	0,92	1	1,12	1,25
Q (var) à vide	0,81	0,9	1	1,1	1,21

* Le supplément d'échauffement selon la norme CEI 60034-1 ne doit pas excéder 10 K aux limites $\pm 5\%$ de U_N .

5.3 Sens de rotation.

Lorsque le moteur est alimenté en U1–V1–W1 ou 1U–1V–1W par un réseau direct L1–L2–L3, il tourne dans le sens horaire lorsqu'on est placé face au bout d'arbre. En permutant l'alimentation de 2 phases, **et seulement deux**, le sens de rotation sera inversé (il y aura lieu de s'assurer que le moteur a été conçu pour les 2 sens de rotation).

5.4 Expression de la puissance électrique = puissance absorbée

$$P_a = U \cdot I \sqrt{3} \cdot \cos(\varphi) = 3 \cdot V \cdot J \cdot \cos(\varphi) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} U : \text{tension composée donc entre phases } (V) \\ V : \text{tension simple donc aux bornes d'un enroulement } (V) \\ I : \text{courant en ligne } (A) \\ J : \text{voir courant dans un enroulement } (A) \\ \cos(\varphi) : \text{facteur de puissance sans unité} \end{cases}$$

En ETOILE

-la mesure de J est possible car il est égal à I

-la mesure de V n'est possible que si on a accès au point étoile ou au neutre

En TRIANGLE

-la mesure de V est possible car elle est égale à U

-la mesure de J est souvent impossible

Dans tous les cas, U et I sont accessibles pour la mesure.

5.5 Fréquences - Vitesses

5.5.1 Fréquence (Vitesse) de synchronisme = fréquence du champ tournant

$$N_s = \frac{f}{p} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} N_s : \text{vitesse de synchronisme } (tr.s^{-1}) \\ f : \text{fréquence du courant d'alimentation } (Hz) \\ p : \text{nombre de paires de pôles } (Hz) \end{cases}$$

5.5.2 Fréquence (Vitesse) de rotation du moteur = fréquence de rotation du rotor

$$N = N_s(1 - g) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} N_s : \text{vitesse de synchronisme } (tr.s^{-1} \text{ ou } tr.min^{-1}) \\ N : \text{vitesse de rotation du rotor dans la même unité que } N_s \\ g : \text{glissement sans unité} \end{cases}$$

$$\text{Soit : } g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

5.5.3 Fréquences (vitesses) de synchronisme courantes

Nombre de pôles	2	4	6	8	10	12
Paires de pôle p	1	2	3	4	5	6
N_s (s^{-1}) sous 50Hz	50	25	16,7	12,5	10	8.33
N_s (min^{-1}) sous 50Hz	3 000	1 500	1 000	750	600	500
N_s (s^{-1}) sous 60Hz	60	30	20	15	12	10
N_s (min^{-1}) sous 60Hz	3600	1800	1200	900	720	600

5.5.4 Calcul du glissement

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} N_s : \text{fréquence de synchronisme (tr.s}^{-1} \text{ ou tr.min}^{-1}) \\ N : \text{fréquence de rotation dans la même unité que } N_s \\ g : \text{glissement sans unité} \end{cases}$$

- au démarrage : $g = 100\%$
- en rotation : $g < 1$ tant que le MAS n'est pas entraîné par la charge
- en régime nominal : $g_N = 3$ à 10%

5.5.5 Vitesse angulaire :

$$\Omega = 2\pi N \quad \text{avec} \quad \begin{cases} N : \text{vitesse ou fréquence de rotation (tr.s}^{-1} \text{ ... parfois Hz)} \\ \Omega : \text{vitesse angulaire (rad.s}^{-1}) \end{cases}$$

5.6 Puissance mécanique : puissance utile

$$P_U = M \Omega \quad \text{avec} \quad \begin{cases} P_U : \text{puissance utile donc mécanique (W)} \\ M : \text{moment du couple (N.m)} \\ \Omega : \text{vitesse angulaire en rad.s}^{-1} \end{cases}$$

5.7 Rendement

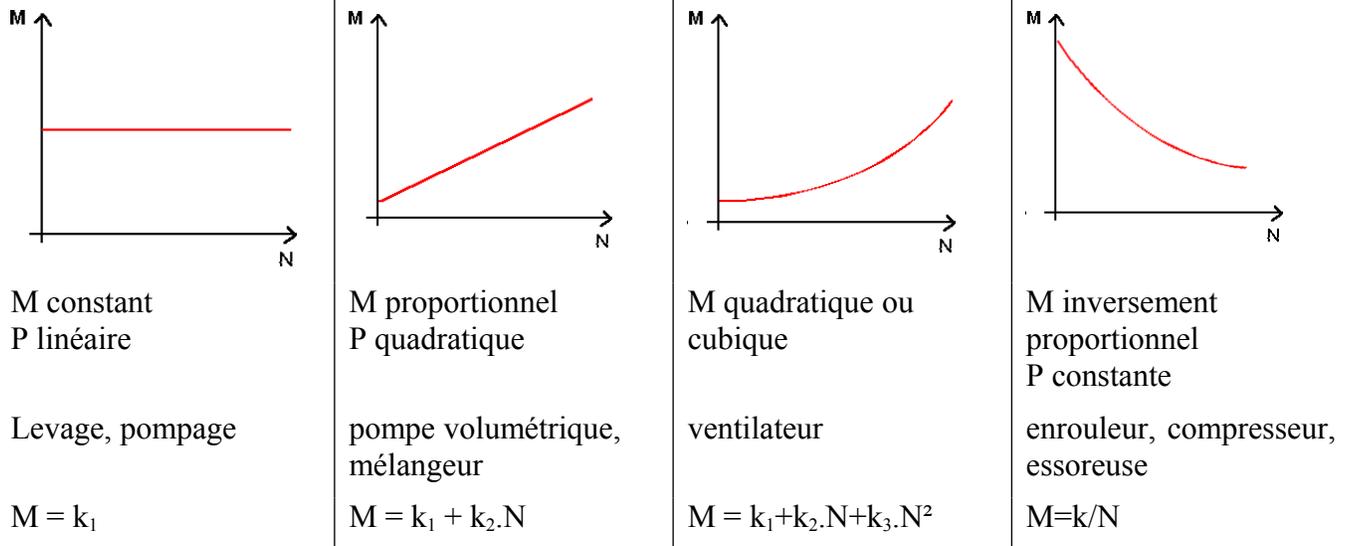
$$\eta = \frac{P_u}{P_A} = \frac{M \Omega}{U.I\sqrt{3} \cdot \cos(\varphi)} = \frac{M \Omega}{3 V.J \cos(\varphi)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} M : \text{couple moteur en N.m} \\ P_U : \text{puissance utile en W} \\ P_A : \text{puissance absorbée en W} \\ U, V, I, J : \text{voir courant et tensions} \end{cases}$$

Dans le cadre de l'écoconception d'une installation motorisée, on prendra en compte les éléments suivants :

- Le rendement d'un MAS est optimum autour de son point nominal de fonctionnement.
- Dans le cas où le MAS est trop peu chargé, ce rendement peut devenir très faible.
- L'association d'un MAS avec un variateur de vitesse permet fréquemment d'améliorer le rendement de la motorisation.

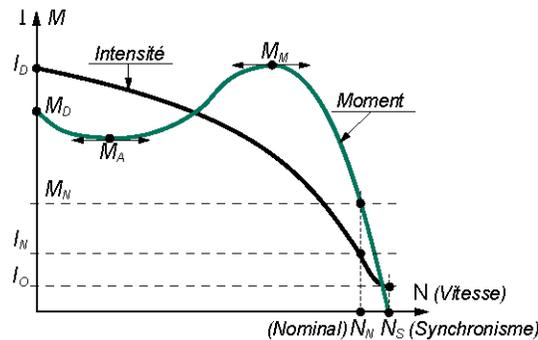
6 Courbes caractéristiques du MAS et des différentes charges.

6.1 Allures de couples résistants caractéristiques



6.2 Démarrage direct du MAS : courbes caractéristiques

C'est le plus simple des démarrages, on applique au moteur l'alimentation du réseau dès le début. La pointe d'intensité dans le moteur lors du démarrage peut atteindre 4 à 8x I_N .



À gauche du couple maximum M_M , on ne peut obtenir un point de fonctionnement stable.

Il faut impérativement que le point de fonctionnement se situe à droite du point d'inflexion du couple maximum.

6.3 Point de fonctionnement du moteur en charge

Il s'agit évidemment d'un point d'équilibre, dont on rappelle qu'il consiste en une situation stable i.e. sans évolution (la vitesse ne change pas mais n'est pas forcément nulle). Or le principe fondamental de la dynamique (PFD) indique :

$$M_m - M_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} M_m : \text{couple moteur en } N.m \\ M_r : \text{couple résistant en } N.m \\ J : \text{moment d'inertie en } kg.m^2 \\ \frac{d\Omega}{dt} : \text{accélération angulaire en } rad.s^{-2} \end{cases}$$

La quantité $\{M_m - M_r\}$ est appelée « couple d'accélération ».

Le principe fondamental de la dynamique permet aussi de calculer un temps de démarrage :

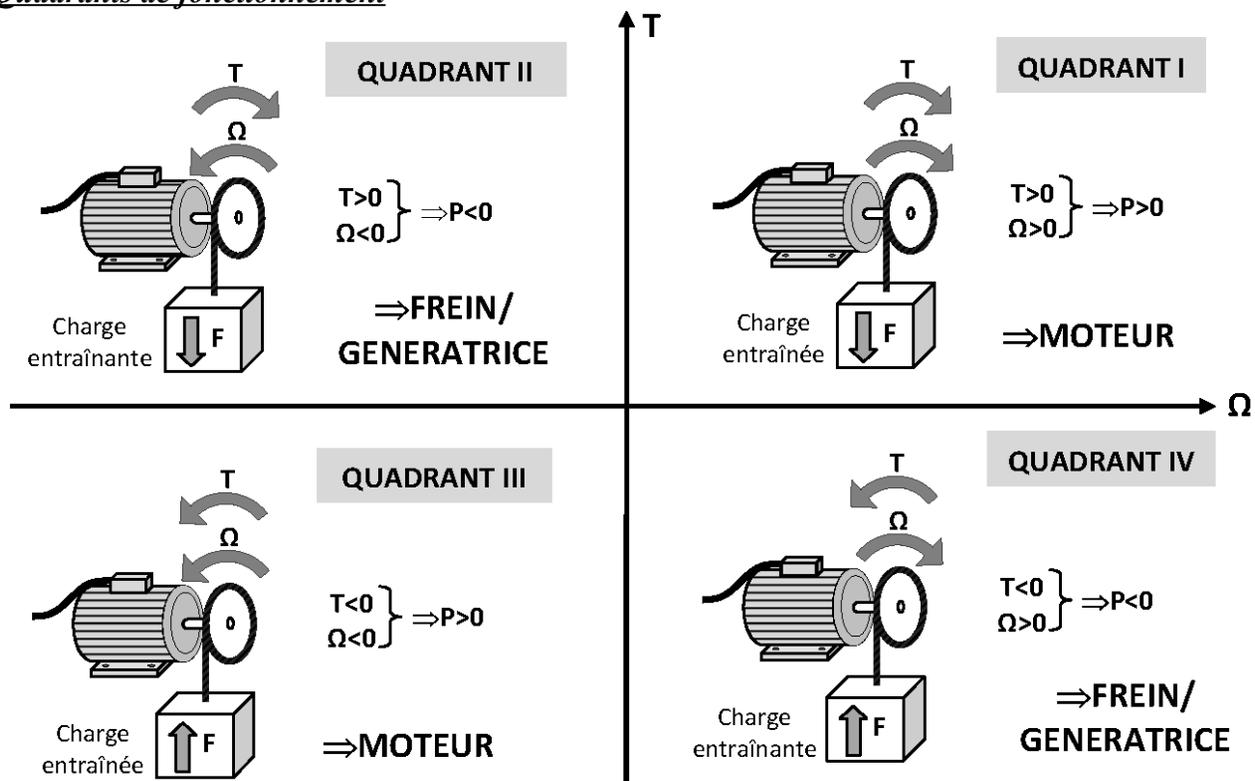
$$dt = J \cdot \frac{\Omega_{final} - \Omega_{initial}}{M_m - M_r} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} M_m : \text{couple moteur en N.m} \\ M_r : \text{couple résistant en N.m} \\ J : \text{moment d'inertie en kg.m}^2 \\ \Omega_{final} \text{ et } \Omega_{initial} : \text{vitesse angulaire en rad.s}^{-1} \end{cases}$$

Par simplification, on considère les deux couples comme constants sur la durée du démarrage, considérant leur valeur moyenne sur la phase de variation de vitesse.

CONSEQUENCES du PFD :

- Si $M_M > M_R$; $d\Omega/dt > 0$ le moteur accélère dans le sens positif (ou décélère en sens négatif)
- Si $M_M < M_R$; $d\Omega/dt < 0$ le moteur décélère dans le sens positif (ou décélère en sens positif)
- Si $M_M = M_R$; $d\Omega/dt = 0$ le moteur conserve une vitesse constante (nulle ou non nulle)

6.4 Quadrants de fonctionnement



7 Choix du matériel de « départ-moteur ».

(cas simple du démarrage direct en solution ancienne 3 produits)

Un départ-moteur peut être constitué de 1, 2, 3 ou 4 appareillages différents assurant une ou plusieurs fonctions. Dans le cas d'association de plusieurs appareils, il est nécessaire de les coordonner de façon à garantir un fonctionnement optimisé de l'application moteur. Les paramètres à prendre en compte pour protéger un départ-moteur sont multiples, ils dépendent :

- de l'application (type de machine entraînée, sécurité d'exploitation, cadence de manœuvre, etc.)
- de la continuité de service imposée par l'utilisation ou par l'application
- des normes à respecter pour assurer la protection des biens et des personnes.

Les fonctions électriques à assurer sont de natures très différentes :

- protection :
 - Protéger le démarreur et les câbles contre les court-circuits. Cette fonction est assurée par un disjoncteur (autrefois par des fusibles).
 - Protéger le moteur et les câbles contre les faibles surintensités ($< 10 I_n$). Les relais (ou déclencheurs) thermiques assurent la protection contre ce type de défaut.
 - Protections spécifiques supplémentaires : par exemple contre les défauts d'isolement, les manques de tension, l'inversion d'ordre des phases, etc...
- Commande : mettre en marche et arrêter le moteur éventuellement mise en vitesse progressive voire régulation de la vitesse.
- Isolement ou sectionnement : isoler le circuit en vue d'opérations de maintenance sur le départ-moteur.

Un départ-moteur doit satisfaire aux règles générales de la CEI 60947-4-1 qui précise les points suivants :

- coordination des composants du départ-moteur
- classes de déclenchement des relais thermiques
- catégories d'emploi des contacteurs
- coordination d'isolement.

Coordination type 1 et type 2 :

La norme définit des essais à différents niveaux d'intensité, essais qui ont pour but de placer l'appareillage dans des conditions extrêmes. Selon l'état des constituants après essais, la norme définit 2 types de coordination :

- Coordination type 1

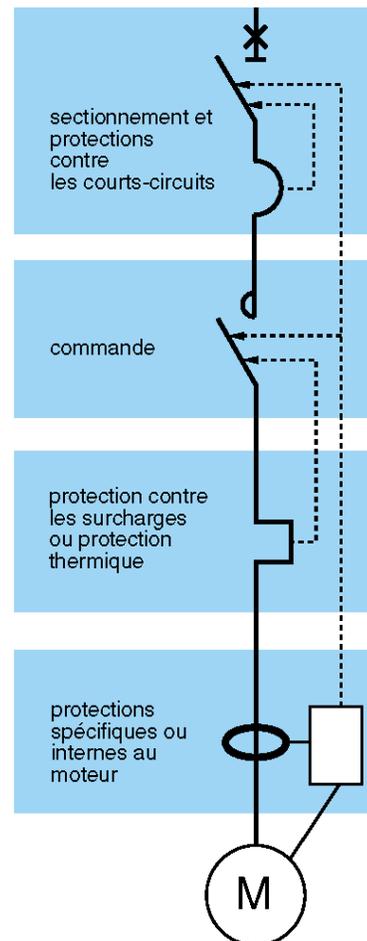
Il est accepté une détérioration du contacteur et du relais sous 2 conditions :

- aucun risque pour l'opérateur
- les éléments autres que le contacteur et le relais thermiques ne doivent pas être endommagés.

- Coordination type 2

Il est seulement admis une légère soudure des contacts du contacteur ou du démarreur, s'ils sont facilement séparables. Après essais de coordination de type 2, les fonctions des appareillages de protection et de commandes sont opérationnelles.

Afin d'assurer convenablement le type de coordination souhaitée, il est généralement possible de se référer aux tables fournies par le constructeur. Exemple ci-dessous : coordination type 2 pour MAS en démarrage direct.



Selon Schneider :

Performance : U = 500/525 V

disjoncteurs		H		L	
NS100-STR22ME	50/35 kA	70/50 kA			
NS160-STR22ME	50/35 kA	70/50 kA			
NS250-STR22ME	50/35 kA	70/50 kA			
NS400-STR43ME	50/35 kA	70/50 kA			
NS630-STR43ME	50/35 kA	70/50 kA			

Démarrage :

	STR22ME	STR43ME
normal	classe 10	classe 10
long		classe 20

moteurs P (kW)	I (A) 500 V	I (A) 525 V	I ₀ max	disjoncteurs type	décl./L.u.	I _{rt} h (A)	I _{rm} (A)	contacteurs (t) type
4	6,5	6,5	10	NS100	STR22ME	6/10	13 I _{rt} h	LC1-D80
5,5	9	9	12,5	NS100	STR22ME	7,5/12,5	13 I _{rt} h	LC1-D80
7,5	12	12	15,5	NS100	STR22ME	7,5/12,5	13 I _{rt} h	LC1-D80
11	15	15	20	NS100	STR22ME	12/20	13 I _{rt} h	LC1-D80
15	18,4	18,4	20	NS100	STR22ME	12/20	13 I _{rt} h	LC1-D80

MOTEUR :	<ul style="list-style-type: none"> -Charge : puissance utile, fréquence de rotation, couple -Réseau : fréquence d'alimentation, tension d'alimentation -Environnement : indice de protection, classe d'échauffement, dimensions, montage,
CONTACTEUR :	<ul style="list-style-type: none"> -nombre de pôles -nombre et type de contacts auxiliaires -tension et fréquence bobine -puissance (courant d'emploi dans la catégorie considérée)
RELAIS THERMIQUE :	<ul style="list-style-type: none"> -plage de réglage -classe (10, 20, 30...) -différentiel, compensé, montage direct sous contacteur, etc...
FUSIBLES :	<ul style="list-style-type: none"> -type (aM pour le MAS) -taille et forme -calibre -présence du percuteur -tension
SECTIONNEUR :	<ul style="list-style-type: none"> -taille des fusibles associés -nombre de pôles -contacts auxiliaires de précoupure -DPM (dispositif contre la marche monophasée = détection du percuteur) -tension assignée, calibre

8 Maintenance des MAS

L'un des avantages majeurs du moteur asynchrone est justement une maintenance très réduite. Évidemment, comme pour toutes les motorisations, il est conseillé de vérifier régulièrement le bon serrage de la fixation du moteur ainsi que de son accouplement.

De même, il est nécessaire d'éliminer régulièrement les poussières et autres objets pouvant obstruer les ouïes d'aération ainsi que les ailettes de refroidissement : en effet, leur accumulation peut dégénérer le système de refroidissement de la machine.

La maintenance de type électrique est quasiment inexistante, mis à part le contrôle périodique d'isolement.

En fait, la seule maintenance qui doit être réalisée de façon régulière concerne les roulements à billes : certains modèles sont graissés à vie mais d'autres doivent être graissés de façon préventive selon le tableau périodique indiqué par leur constructeur. Dans ce dernier cas, la plaque signalétique indique généralement la périodicité de lubrification ainsi que la quantité et la qualité de graisse. Attention : les indications portées sont valables pour des

machines travaillant à une température ambiante inférieure à 40 °C. Si la température ambiante est plus importante, il faut généralement augmenter la périodicité de lubrification de 50 %.

Δ 440	60	3568	200	0.9l
Δ 460		3572		
DE	6316 C3	035 g	ESSO UNIREX N3	
NDE	6316 C3	2900 h		

Voici en exemple les instructions de graissage donné par Leroy Somer⁴ :

Toujours commencer par nettoyer le canal de graisse usagée

Dans le cas d'utilisation de la graisse indiquée sur la plaque, retirer les caches et nettoyer les têtes des graisseurs.

Un graissage n'est vraiment efficace que si le moteur est en fonctionnement pour assurer une bonne répartition de la graisse neuve dans le roulement.

Si (essentiellement pour des raisons de sécurité), le graissage ne peut s'effectuer moteur en marche :

- *arrêter le moteur ;*
- *injecter seulement la moitié de la quantité de graisse plaquée ;*
- *faire tourner le moteur quelques minutes ;*
- *réintroduire le complément pour atteindre la quantité de graisse indiquée.*

En outre, une maintenance curative doit être mise en œuvre dès la perception de bruits anormaux : en effet, un roulement à billes détérioré produit un sur-échauffement. Il faut donc le remplacer au plus vite.

Lorsque le remplacement d'un roulement est nécessaire, **il faut remplacer aussi l'autre roulement**. Les joints d'étanchéité seront changés systématiquement à l'occasion du changement des roulements. Le roulement arrière (N.D.E.) doit être monté libre pour accepter la dilatation de l'arbre rotor.



Dans le cas de moteurs antidéflagrants, donc situés en zone à risque d'explosion, il est évident que la maintenance préventive est plus importante car elle est liée à la surveillance fréquente des matériels de ce type de zone. On apportera par exemple un soin particulier à l'examen des gaines, presse-étoupes et isolants des conducteurs électriques. Les instructions spécifiques donné par le constructeur doivent être lues conjointement avec les normes NFC 15 100, NF EN 60079-14 (*Installations électriques en atmosphères explosives gazeuses*), NF EN 60079-17 (*inspection et entretien dans les emplacements dangereux*) et NF EN 50281-1-2 (*matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles - partie 1-2: matériels électriques protégés par enveloppes – sélection, installation et entretien*).

9 Autres démarrages du MAS

OBJECTIF : diminuer les pointes d'intensité lors de la phase de démarrage du MAS afin de diminuer la chute de tension sur le réseau d'alimentation. La norme NF C15-100 impose d'ailleurs des valeurs maximales en son paragraphe 552-2.

On rappelle que sur certains moteurs à cage d'écureuil, cette pointe d'intensité peut atteindre 5 à 8 fois le courant nominal !!! Des technologies de construction particulières permettent éventuellement de réduire cette appel de courant : on peut citer entre autres le cas des rotors bobinés ou l'utilisation d'encoches profondes. **On gardera cependant à l'esprit que toute diminution du courant entraîne également une diminution du couple.**

⁴ Source : http://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/2197_fr.pdf

En général, l'utilisation d'un procédé de démarrage est nécessaire pour les moteurs d'une puissance à partir de 5,5kW. On trouve davantage de précisions dans la norme NF C 15100 dont un extrait est reproduit ci-dessous :

559.6.1 Limitation des troubles dus au démarrage des moteurs

Le courant absorbé par tout moteur lors de son démarrage doit rester limité à une valeur qui ne soit pas préjudiciable à l'installation qui l'alimente et n'apporte pas de troubles inacceptables au fonctionnement des autres appareils reliés à la même source.

Dans le cas des moteurs alimentés directement par un réseau de distribution publique, leurs démarrages n'entraînent en général pas de perturbations excessives si l'intensité de démarrage n'est pas supérieure aux valeurs du tableau 55A.

Tableau 55A – Intensités maximales de démarrage des moteurs

	LOCAUX	INTENSITÉ MAXIMALE DE DÉMARRAGE	
		Réseau aérien	Réseau souterrain
Moteur raccordé	d'habitation (branchement à puissance limitée)	45 A	45 A
en monophasé	autres (branchement à puissance surveillée)	100 A	200 A
Moteur raccordé	d'habitation (branchement à puissance limitée)	60 A	60 A
en triphasé	autres (branchement à puissance surveillée)	125 A	250 A

Au-delà de ces intensités, l'alimentation des moteurs est subordonnée à l'accord préalable du distributeur d'énergie afin que des dispositions soient prises pour que leur utilisation reste compatible avec la conservation des installations de distribution et la desserte sans troubles graves des usagers.

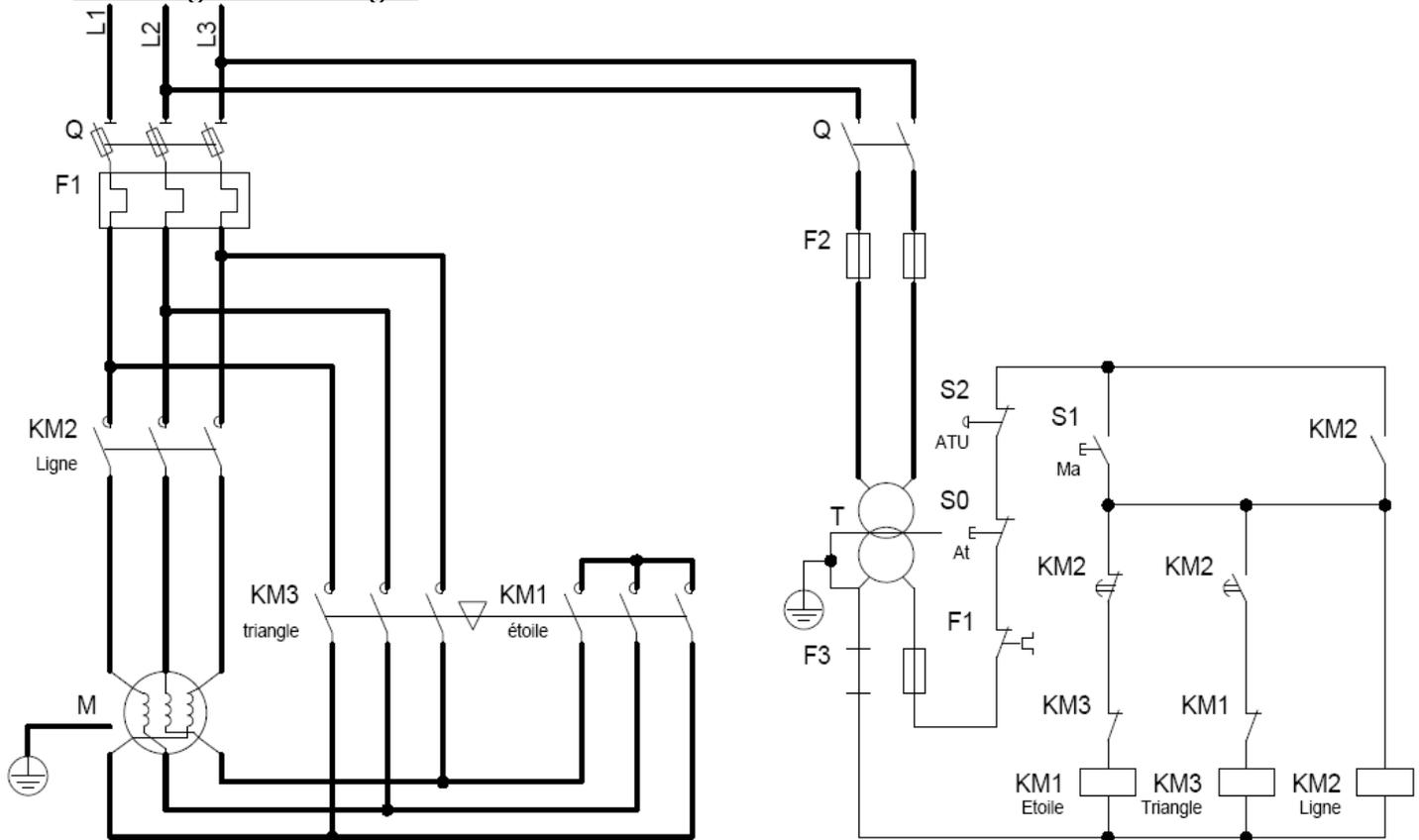
(...)

Les valeurs du tableau 55A permettent, avec les moteurs utilisés le plus couramment, les valeurs suivantes de puissance assignée du tableau 55B.

Tableau 55B – Puissance maximale des moteurs alimentés directement (kVA)

TYPES DE MOTEURS LOCAUX	Monophasé 230 V	Triphasé 400 V	
		à démarrage direct pleine puissance	autres modes de démarrage
Locaux d'habitation	1,4	5,5	11
Autres {	3	11	22
réseau aérien			
Locaux {	5,5	22	45
réseau souterrain			

9.1 Démarrage étoile-triangle



9.1.1 Principe

Lors de la mise sous tension du moteur, on le couple en étoile, la tension sur chaque enroulement est alors divisée par $\sqrt{3}$; le courant est alors divisé par 3 (proportionnellement au carré de la tension) et le couple aussi.

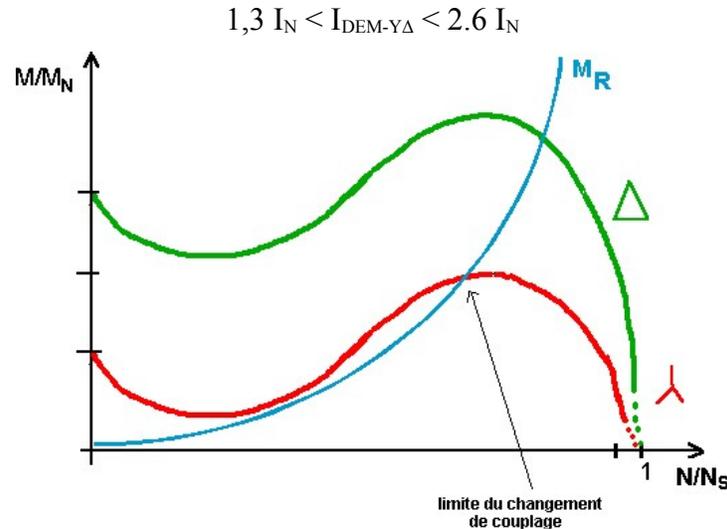
On rappelle les caractéristiques en démarrage direct :
$$\begin{cases} 4I_N \leq I_{D \text{ direct}} \leq 8I_N \\ 0,5 M_N \leq M_{D \text{ direct}} \leq 4M_N \end{cases}$$

En utilisant un démarrage étoile-triangle (noté $Y\Delta$), on a alors :

$$\begin{cases} I_{D Y\Delta} \approx \frac{1}{3} I_{D \text{ direct}} \rightarrow 1,6 I_N \leq I_{D Y\Delta} \leq 2,6 I_N \\ M_{D Y\Delta} \approx \frac{1}{3} M_{D \text{ direct}} \rightarrow 0,2 M_N \leq M_{D Y\Delta} \leq 1,7 M_N \end{cases}$$

9.1.2 Conséquence

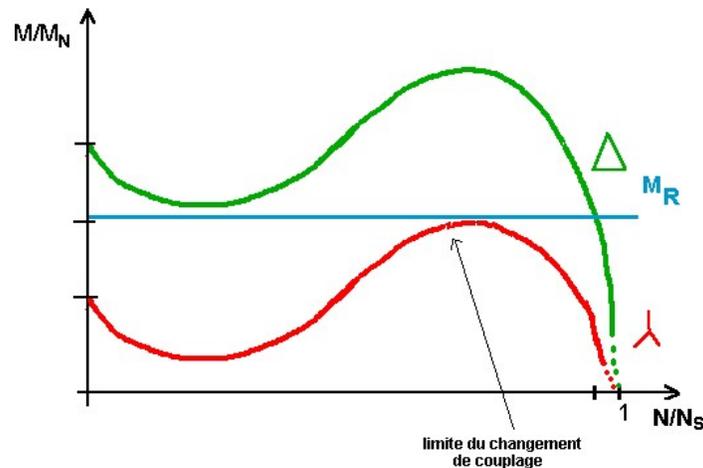
La pointe d'intensité au démarrage est effectivement limitée, le couple de démarrage étant très réduit, ce procédé est réservé à des cas où le moteur démarre à vide, ou au moins avec de faibles charges.



La zone dans laquelle le passage doit se faire en couplage triangle est la zone où le couple en étoile est supérieur au couple résistant, car il faut conserver une accélération positive.

Dans notre exemple, elle est à gauche du point limite repéré.

9.1.3 Cas d'impossibilité



Ci-dessus, la courbe de couple du moteur en étoile est inférieure à celle du couple résistant. Par conséquent le démarrage en étoile est impossible !!!

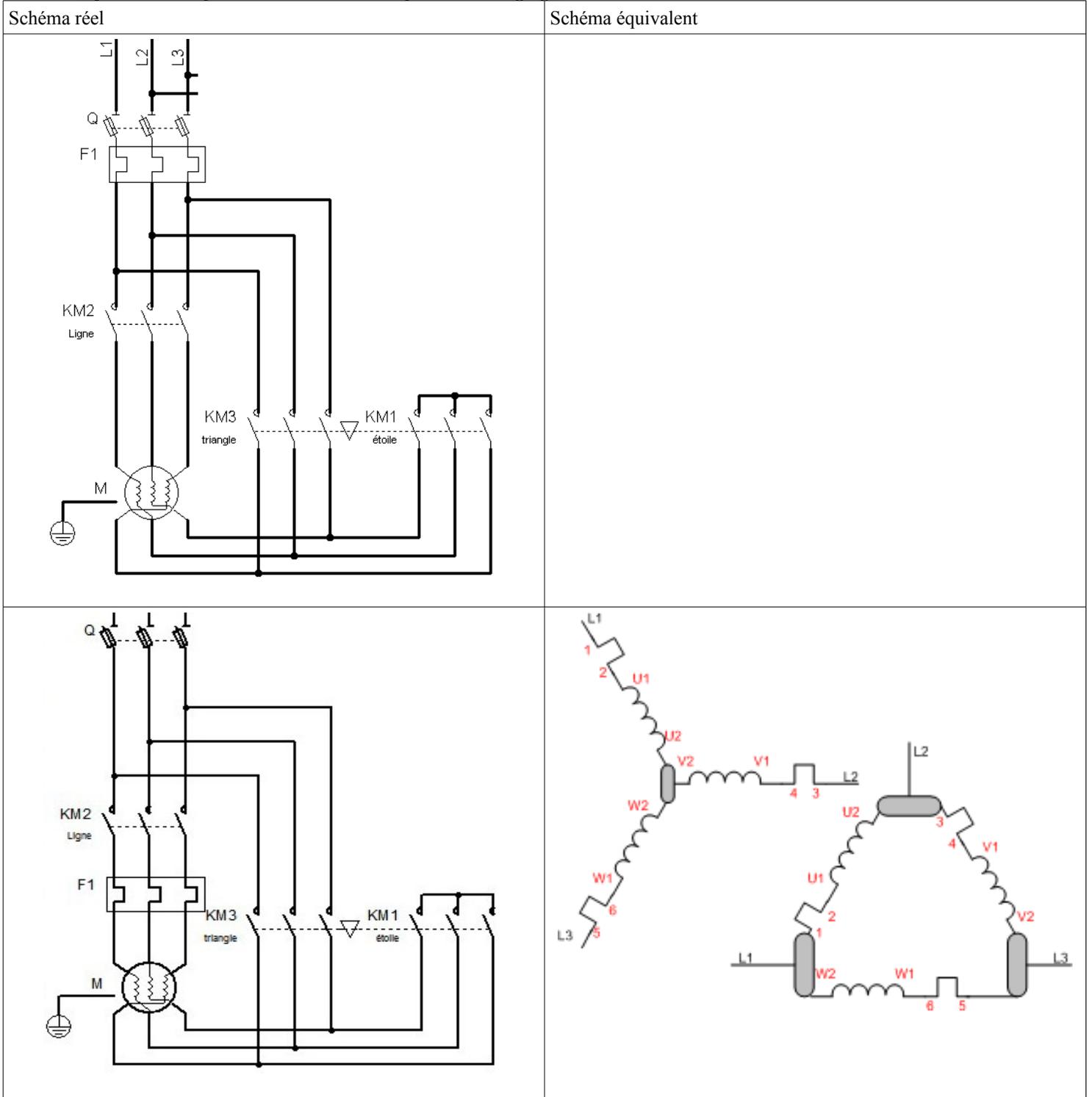
9.1.4 Avantages

- simple à mettre en œuvre
- peu onéreux
- applicable dès que le couplage nominal du moteur considéré sur le réseau est triangle

9.1.5 Inconvénients

- peu de couple au démarrage
- l'à-coup lors du passage en triangle (le MAS n'est plus alimenté pendant un bref instant, une légère pointe d'intensité peut être visible, avec sa conséquence sur le couple. (Une solution avec insertion de résistance existe mais ne sera pas étudiée ici).

9.1.6 Influence de la position du relais thermique sur son réglage



Il faut faire très attention au schéma pour déterminer si le réglage doit se faire sur la plus grande valeur inscrite sur la plaque signalétique (courant absorbé en ligne en triangle) ou selon le courant nominal de chaque enroulement (plus petite valeur indiquée sur la plaque).

Remarque économique : le montage « F1 sur enroulements » offre la particularité de pouvoir embrocher le relais thermique d'où :

- inutile d'acheter le module complémentaire de raccordement de câbles
- gain de temps liés à la diminution du câblage (main d'œuvre).

Mais les autres possibilités de raccordement sont nombreuses et d'autres solutions de câblage permettent de cumuler les avantages (non étudiées ici).

9.2 Autres démarrages

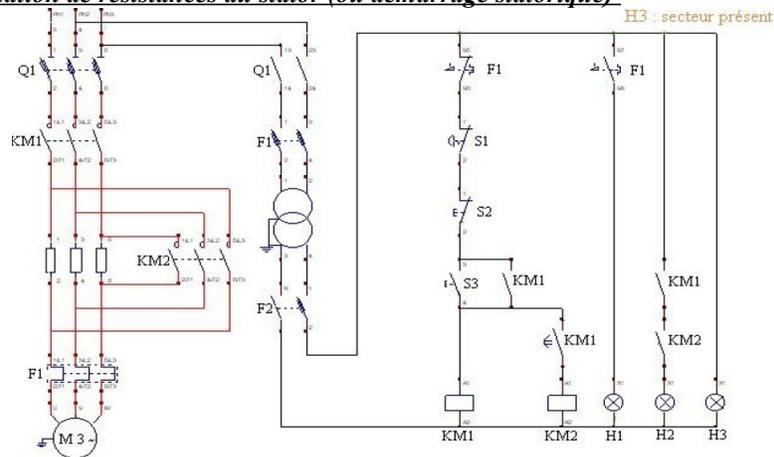
9.2.1 Démarrage par auto-transformateur

un autotransformateur est une machine statique dont le principe de fonctionnement est identique à celui du transformateur. Ce qui différencie un transformateur et un autotransformateur, c'est le fait que les enroulements primaire et secondaire aient une partie de spires communes.

Il n'y a donc pas d'isolation galvanique entre primaire et secondaire dans un autotransformateur.

On utilise l'autotransformateur pour diminuer la tension d'alimentation lors du démarrage du moteur et il est ensuite shunté. Ce mode de démarrage est onéreux à cause de l'autotransformateur. Il n'est pratiquement plus employé qu'en haute tension (moteurs HT, en général 5kV), où l'électronique nécessite encore des progrès avant d'être totalement opérationnelle ou sur les MAS en BT de puissance très importante (>150kW).

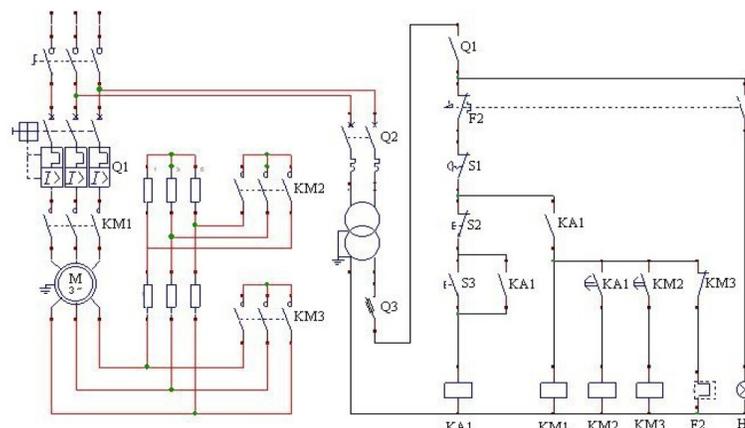
9.2.2 Démarrage par élimination de résistances au stator (ou démarrage statorique)



Lors du démarrage, on insère en série avec le moteur deux ou trois groupes de résistances : on limite ainsi le courant. Les résistances seront ensuite progressivement shuntées. Ce procédé nécessite beaucoup de matériel.

En général, ce mode de démarrage limite peu la pointe d'intensité afin de conserver un couple permettant de démarrer sous forte charge.

9.2.3 Démarrage rotorique ou Élimination de résistances au rotor.



On rappelle que le moteur asynchrone est avant tout une machine électrique, c'est-à-dire de la même famille que le transformateur : on considère que son rotor est le secondaire d'un transformateur tandis que son stator représente le primaire.

La limitation du courant dans le rotor (secondaire) permet donc de diminuer l'appel de courant au stator (primaire). Le couple reste très élevé malgré un courant statorique réduit. On dit que ce procédé possède un excellent rapport couple / courant.

Ce procédé nécessite l'emploi d'un **moteur à rotor bobiné**. Les trois enroulements rotoriques, couplés en étoile, sont accessibles sur la plaque à bornes. La connexion entre la plaque à bornes et ces trois enroulements se fait par contacts glissants entre des balais et trois bagues tournantes (une par enroulement).

L'ensemble est bien évidemment prévu dès la construction.

On peut considérer que certains moteurs spéciaux dits « à encoches profondes » réagissent selon le même principe :

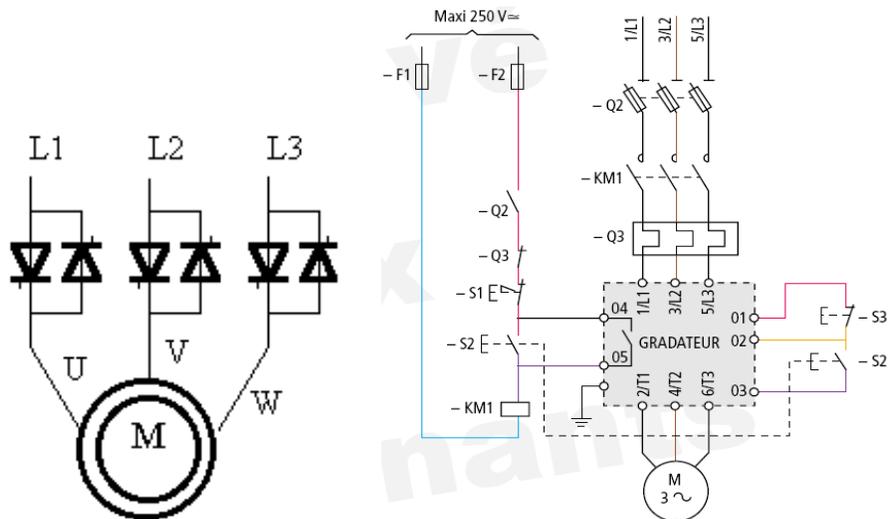
- au démarrage la fréquence des courants rotoriques est élevée, on fait circuler ces courants dans une zone à forte impédance où ils se trouvent donc limités.
- Plus on s'approche de la vitesse de synchronisme, plus la fréquence diminue : on fait alors circuler les courants rotoriques dans une zone à faible impédance.

D'une façon générale, le démarrage rotorique est onéreux par plusieurs points.

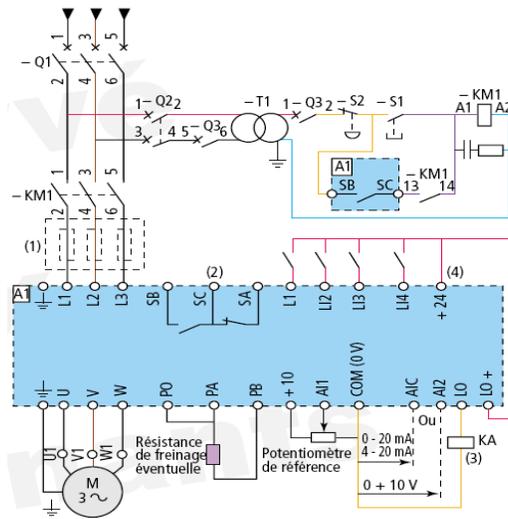
- moteur spécial
- résistance externe
- complexité de câblage

9.2.4 Démarrages électroniques *(voir chapitre sur « la variations de vitesse »)*

- Utilisation d'un **démarrateur électronique** (limitation de U et I selon le principe du gradateur). Le démarreur sera souvent shunté à la fin du démarrage pour limiter les pertes dues à son échauffement. Dans certains cas, on pourra utiliser un seul démarreur pour plusieurs moteurs (démarrage en cascade).



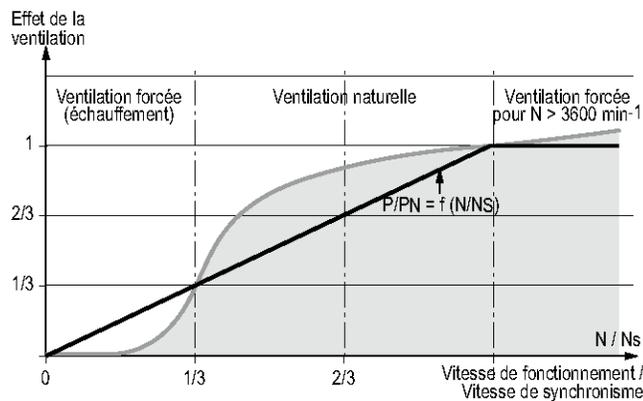
- Utilisation d'un **variateur de vitesse** (U et f sont réglables, ce matériel appartenant à la famille des cycloconvertisseurs). Ce procédé n'est bien entendu utilisé que si l'on a besoin de faire varier la vitesse du moteur lors du cycle normal. Il est impossible de mutualiser un variateur entre plusieurs moteurs : chaque moteur possède le sien.



Attention pour les MAS autoventilés :

En fonctionnant en service prolongé à basse vitesse, la ventilation perdant beaucoup de son efficacité, il est conseillé de monter une ventilation forcée à débit constant indépendant de la vitesse du moteur.

En fonctionnement en service prolongé à grande vitesse, le bruit émis par la ventilation pouvant devenir gênant pour l'environnement, l'utilisation d'une ventilation forcée est conseillée.



9.3 Conclusion sur les démarrages de MAS

- **La pointe de courant génère une chute de tension dans la ligne dont la valeur maximale est imposée par la norme.**

Cette chute de tension peut détériorer les appareils raccordés sur la même ligne ou perturber leur fonctionnement.

- Le problème du démarrage concerne donc essentiellement la limitation de la chute de tension à des valeurs admissibles par la norme (*seront étudiées ultérieurement*). Exemple de valeurs normatives en régime établi :

Chute de tension maximale entre l'origine de l'installation BT et l'utilisation

	éclairage	autres usages (force motrice)
abonné alimenté par le réseau BT de distribution publique	3 %	5 %
abonné propriétaire de son poste HT-A/BT	6 %	8 % (1)

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

- L'étude des équations du moteur asynchrone montre qu'une diminution du courant entraîne forcément une diminution de M.

I : Courant de ligne moteur

M : Couple utile en sortie de l'arbre moteur

Le compromis à réaliser est le suivant :

Limiter le courant pendant le démarrage tout en conservant un couple moteur suffisant pour assurer le démarrage !

Mode de démarrage	direct	Étoile triangle	statorique	rotorique	électronique
Courant de démarrage ⁵	4 à 8 In	1,3 à 2,6 In	4 à 5 In	2 à 3 In	réglable
Couple de démarrage ⁵	0,5 à 4 Mn	0,2 à 1,5 Mn	0,6 à 0,9 Mn	2,5 Mn	réglable
avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Câblage simple • économique • fort couple de démarrage 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu onéreux • câblage assez simple 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de coupure d'alimentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent rapport couple / courant • pas de coupure d'alimentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Performance excellente • contrôles sophistiqués
inconvénients	Pointe d'intensité au démarrage élevé	<ul style="list-style-type: none"> • Couple de démarrage faible • coupure d'alimentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction modeste de la pointe de courant • coût des résistances • câblage important 	<ul style="list-style-type: none"> • Moteur cher • nécessité de résistances 	<ul style="list-style-type: none"> • Prix du variateur • durée de vie • réservé aux ambiances tempérées
applications	Petits moteurs (jusqu'à 5kW)	Moteur démarreur à vide (ventilateurs)	Machines à forte inertie (rotatives d'imprimerie)	Démarrage avec forte charge mais progressive (levage)	Partout sauf désenfumage et autres systèmes de sécurité

10 Freinage des moteurs asynchrones.

10.1 Introduction

Dans certains cas, l'arrêt du moteur peut bien évidemment se faire en « roue libre » (arrêt naturel sans intervention extérieure).

Cependant, de très nombreuses applications nécessitent une intervention appelée « freinage ». Nous ferons la distinction entre :

- le ralentissement du moteur (diminution de sa vitesse jusqu'à l'arrêt)
- le maintien du moteur à une vitesse nulle

10.2 Freinages électriques

- On notera un site internet intéressant dédié au freinage en traction ferroviaire : <http://perso.orange.fr/florent.brisou/Freinage.htm>

10.2.1 Freinage par injection de courant continu (principe identique au frein par courant de Foucault)

Après avoir isolé le moteur de son réseau d'alimentation alternative, on injecte entre deux phases du stator à courant continu.

L'injection de courant continu au stator permet d'obtenir un champ fixe dans lequel tourne encore le rotor.

- ➔ Chaque conducteur rotorique voit donc une variation de champ.
- ➔ Selon la loi de Lenz, $e = -\frac{d\varphi}{dt}$ une force électromotrice naît aux bornes des conducteurs rotoriques.
- ➔ Ces conducteurs rotoriques formant un circuit fermé, il y circule alors un courant induit qui va à son tour créer un champ induit. Ce champ a pour propriété de s'opposer à la cause qui lui a donné naissance : la variation de champ vue par le conducteur rotorique.

⁵ Dans tous les cas, les informations du constructeur donne des valeurs plus précises

- La variation de champ étendu étant due à la fois au champ fixe et au mouvement, le champ induit va s'opposer au mouvement : il y a donc ralentissement.

On remarque que lorsque la vitesse diminue, la force électromotrice induite $e = -\frac{d\varphi}{dt}$ diminue également puisque dt augmente et par voie de conséquence, le ralentissement diminue également.

- Le courant continu à injecter est de l'ordre de $1,3I_N$. Il entraîne donc un échauffement important du moteur pour deux raisons : sa valeur efficace élevée ($1,3I_N$) et, dans le cas d'un moteur auto-ventilé, la diminution du refroidissement avec celle de la vitesse. Il est donc impératif de couper cette injection de courant continu lorsque le moteur est arrêté ; 2 procédés sont utilisés : soit l'emploi d'une temporisation **convenablement réglée** soit l'usage d'un capteur de vitesse de type centrifuge.

Ce procédé ne permet donc pas de maintenir un moteur à l'arrêt !!!

10.2.2 Freinage hyper synchrone

Ce procédé suppose l'alimentation du moteur par un variateur de vitesse. On pilote alors le variateur de façon à diminuer la fréquence de la tension d'alimentation du moteur, ce qui revient à diminuer la fréquence de rotation du champ tournant. Entraîné par la charge, le rotor tourne alors plus vite que le champ tournant : le glissement est alors négatif.

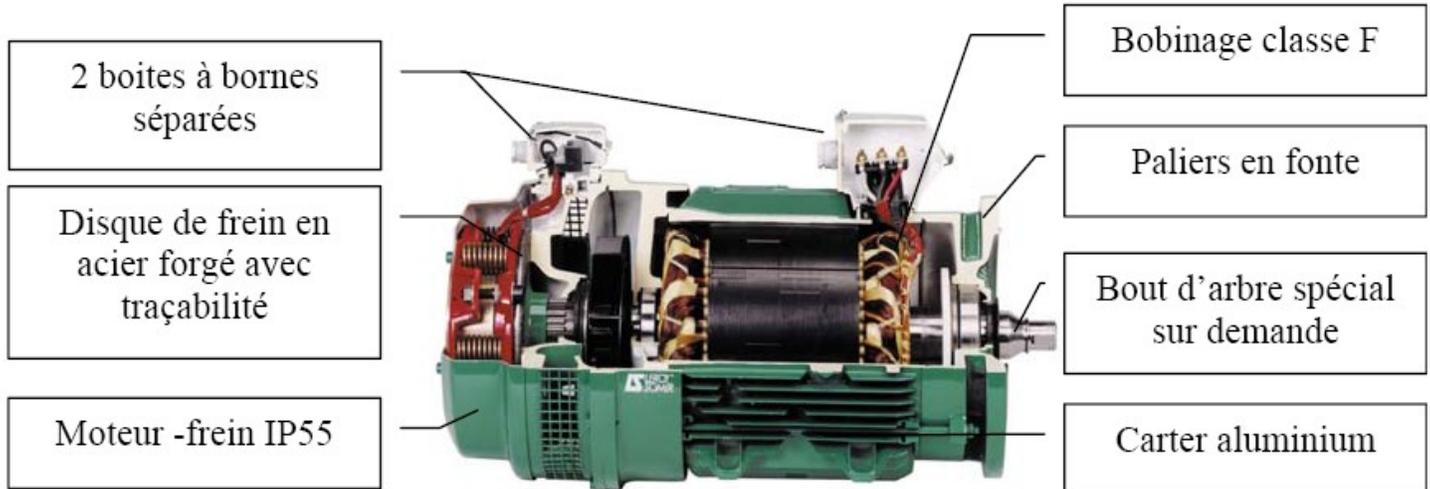
Il est nécessaire que le variateur possède une structure permettant d'évacuer l'énergie qu'il reçoit du moteur (énergie cinétique convertie en énergie électrique) : selon le cas, il renverra cette énergie vers le réseau d'alimentation électrique ou la dissipera dans une résistance dite « de freinage ».

10.2.3 Freinage par contre courant

Le procédé consiste à inverser 2 phases, **et seulement deux**, de l'alimentation du moteur. Ce croisement a pour effet d'inverser le sens de rotation du champ tournant. La difficulté consiste à arrêter cette alimentation croisée avant que le moteur ne se mette à tourner dans l'autre sens. On utilise généralement un capteur de vitesse de type centrifuge pour couper cette alimentation.

Pour limiter le courant dans le stator qui peut atteindre des valeurs très importantes, on insère souvent des résistances en série avec le stator.

10.3 Freinages mécaniques



10.3.1 Introduction

On appelle freinage mécanique les procédés qui consistent à dissiper l'énergie cinétique sous forme d'énergie thermique en utilisant un système de friction. Dans le cas des moteurs électriques, il s'agit généralement d'un sabot qui vient frotter sur l'arbre du moteur ou sur un disque solidaire. On utilise parfois l'appellation « Ferrodo » qui provient d'une marque de fabricant de plaquettes de freinage.

Dans certains cas, le moteur comporte une partie conique sur son rotor et son pendant sur le stator. C'est alors un déplacement axial qui permet au choix de libérer le frein ou de freiner.



Pour désigner un moteur comportant un dispositif de freinage mécanique, on utilisera fréquemment l'appellation « moteur frein ».

Si le moteur frein est alimenté par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse ou d'un démarreur électronique, on veillera à ce que le frein ne soit pas alimenté en aval de ce dispositif électronique : **le frein doit toujours être alimenté par la tension provenant directement du réseau (tension sinusoïdale pure, voire dans certains cas redressée double alternance).**

10.3.2 Frein à appel de courant

l'alimentation de l'électroaimant du frein permet de plaquer le sabot sur le rotor. Il faut donc alimenter le frein pour qu'il agisse. L'inconvénient de ce système est, qu'en cas de disparition de la tension sur le réseau, on ne peut plus obtenir le freinage. À l'inverse, son avantage est justement que l'ensemble mécanique puisse être manœuvré même en cas de panne du réseau électrique.

10.3.3 Frein à manque de courant

il faut alimenter l'électroaimant du frein pour que le sabot libère le rotor. Le gros avantage de ce système est que le freinage peut être obtenu **et compris en cas de disparition de la tension d'alimentation du réseau. Il s'agit d'une sécurité qui est normativement obligatoire sur tous les systèmes à déplacements de charges verticales** (exemple : ascenseur, monte-charge, etc.).

10.4 Synthèse sur les freinages de moteurs asynchrones

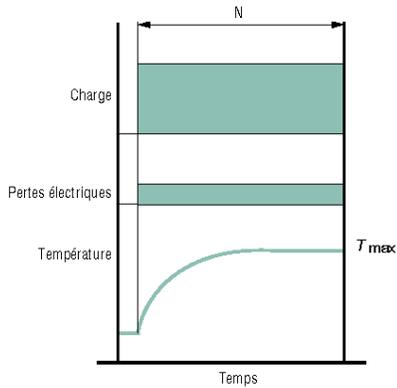
Mode de freinages	Avantages	Inconvénients
Freinages électriques	Pas d'usure donc pas de maintenance	Pas de blocage à l'arrêt, sauf cas de moteur à refroidissement forcé
● Par courant continu	Très efficace. La variante « à courant de Foucault » est employée dans le ralentissement des poids lourds (« frein Telma ») ainsi qu'en traction ferroviaire régionale : dans ces 2 cas, on module le courant pour ajuster le ralentissement	Câblage important, coût du transformateur, attention au réglage de la temporisation
● Par contre courant	Intensité du freinage très importante	Nécessite un capteur centrifuge ou à friction pour ne pas inverser la rotation
● Hyper synchrone	Contrôle avancé de la rampe de décélération	Coût du variateur
Freinages mécaniques	Permet de maintenir un blocage à l'arrêt	Usure mécanique donc maintenance régulière Impossible à employer en phase de ralentissement sur des systèmes à forte énergie cinétique emmagasinée
● À appel de courant	Moteur libre en cas de coupure de courant (utile dans le cas d'un treuil à traction horizontale)	Pas de freinage en cas de coupure de courant (interdit dans les applications de levage)
● À manque de courant	Moteur bloqué en cas de coupure de courant (obligatoire dans les applications de levage, utilisé en immobilisation en traction ferroviaire)	Impossible de débloquer le moteur en cas de coupure de courant (pénalisant dans le cas d'un treuil à traction horizontale)

11 Annexes techniques

11.1 Les services (CEI 60034-1)

Définis de S1 à S11, ils influencent l'échauffement du moteur. Ci-dessous, une illustration des 6 premiers services.

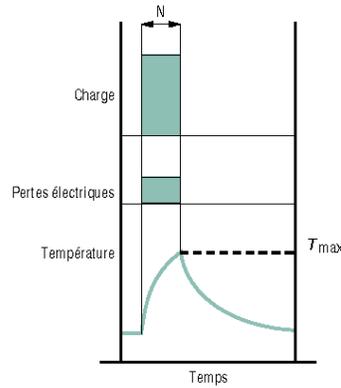
▼ Fig. 1. - Service continu. Service type S1.



N = fonctionnement à charge constante

T_{max} = température maximale atteinte

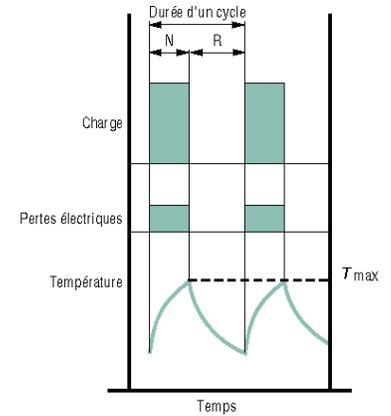
▼ Fig. 2. - Service temporaire. Service type S2.



N = fonctionnement à charge constante

T_{max} = température maximale atteinte

▼ Fig. 3. - Service intermittent périodique. Service type S3.



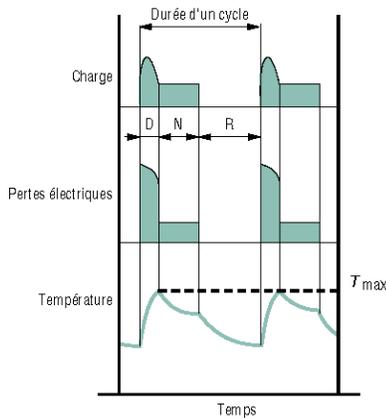
N = fonctionnement à charge constante

R = repos

T_{max} = température maximale atteinte

$$\text{Facteur de marche (\%)} = \frac{N}{N+R} \cdot 100$$

▼ Fig. 4. - Service intermittent périodique à démarrage. Service type S4.



D = démarrage

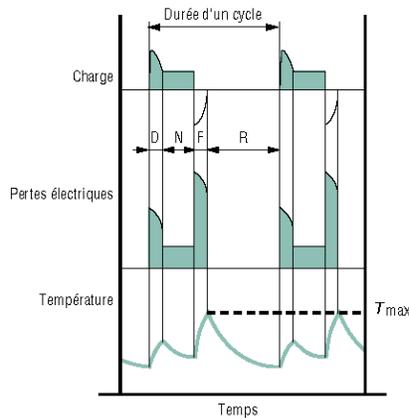
N = fonctionnement à charge constante

R = repos

T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle

$$\text{Facteur de marche (\%)} = \frac{D+N}{N+R+D} \cdot 100$$

▼ Fig. 5. - Service intermittent périodique à freinage électrique. Service type S5.



D = démarrage

N = fonctionnement à charge constante

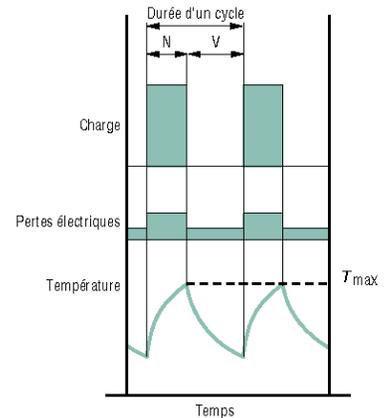
F = freinage électrique

R = repos

T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle

$$\text{Facteur de marche (\%)} = \frac{D+N+F}{D+N+F+R} \cdot 100$$

▼ Fig. 6. - Service ininterrompu périodique à charge intermittente. Service type S6.



N = fonctionnement à charge constante

V = fonctionnement à vide

T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle

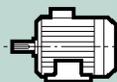
$$\text{Facteur de marche (\%)} = \frac{N}{N+V} \cdot 100$$

11.2 Mode de fixation et position de montage (CEI 60034-7)

Moteurs à pattes de fixation

- toutes hauteurs d'axes

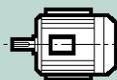
IM 1001 (IM B3)
- Arbre horizontal
- Pattes au sol



IM 1071 (IM B8)
- Arbre horizontal
- Pattes en haut



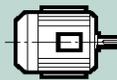
IM 1051 (IM B6)
- Arbre horizontal
- Pattes au mur à gauche
vue du bout d'arbre



IM 1011 (IM V5)
- Arbre vertical vers le bas
- Pattes au mur



IM 1061 (IM B7)
- Arbre horizontal
- Pattes au mur à droite
vue du bout d'arbre



IM 1031 (IM V6)
- Arbre vertical vers le haut
- Pattes au mur



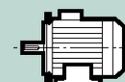
Moteurs à bride (FF) de fixation à trous lisses

- toutes hauteurs d'axes (excepté IM 3001 limité à hauteur d'axe 225)

IM 3001 (IM B5)
- Arbre horizontal



IM 2001 (IM B35)
- Arbre horizontal
- Pattes au sol



IM 3011 (IM V1)
- Arbre vertical en bas



IM 2011 (IM V15)
- Arbre vertical en bas
- Pattes au mur



IM 3031 (IM V3)
- Arbre vertical en haut



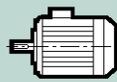
IM 2031 (IM V36)
- Arbre vertical en haut
- Pattes au mur



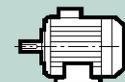
Moteurs à bride (FT) de fixation à trous taraudés

- toutes hauteurs d'axe ≤ 132 mm

IM 3601 (IM B14)
- Arbre horizontal



IM 2101 (IM B34)
- Arbre horizontal
- Pattes au sol



IM 3611 (IM V18)
- Arbre vertical en bas



IM 2111 (IM V58)
- Arbre vertical en bas
- Pattes au mur



IM 3631 (IM V19)
- Arbre vertical en haut



IM 2131 (IM V69)
- Arbre vertical en haut
- Pattes au mur



Moteurs sans palier avant

Attention : la protection (IP) plaquée des moteurs IM B9 et IM B15 est assurée lors du montage du moteur par le client

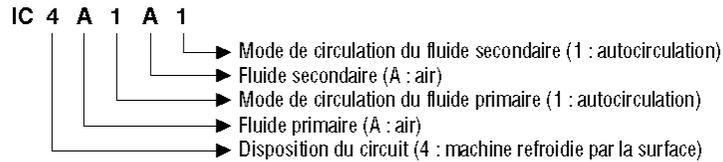
IM 9101 (IM B9)
- A tiges filetées de fixation
- Arbre horizontal



IM 1201 (IM B15)
- A pattes de fixation et tiges filetées
- Arbre horizontal

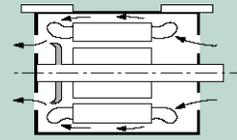
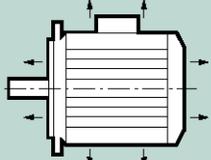
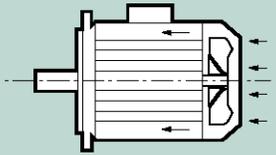
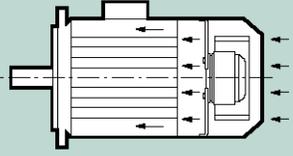
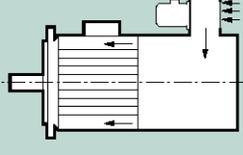
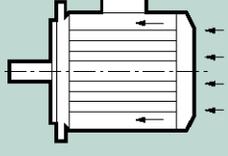


11.3 Les modes de refroidissement (CEI 60 034-6) : code IC (International Cooling)



La lettre A peut être supprimée si aucune confusion n'est introduite. La formule ainsi contractée devient la formule simplifiée. Formule simplifiée de l'exemple : IC 411

Illustration des modes les plus courants selon Leroy Somer :

IC 01	Machine ouverte auto refroidie. Ventilateur monté sur l'arbre.	
IC 410	Machine fermée, refroidissement par la surface par convection naturelle et radiation. Pas de ventilateur externe.	
IC 411	Machine fermée. Carcasse ventilée lisse ou à nervures. Ventilateur externe, monté sur l'arbre.	
IC 416 A*	Machine fermée. Carcasse fermée lisse ou à nervures. Ventilateur motorisé externe axial (A) fourni avec la machine.	
IC 416 R*	Machine fermée. Carcasse fermée lisse ou à nervures. Ventilateur motorisé externe radial (R) fourni avec la machine.	
IC 418	Machine fermée. Carcasse lisse ou à nervures. Pas de ventilation externe. Ventilation assurée par flux d'air provenant du système entraîné.	

* Indications hors normes propres au constructeur.