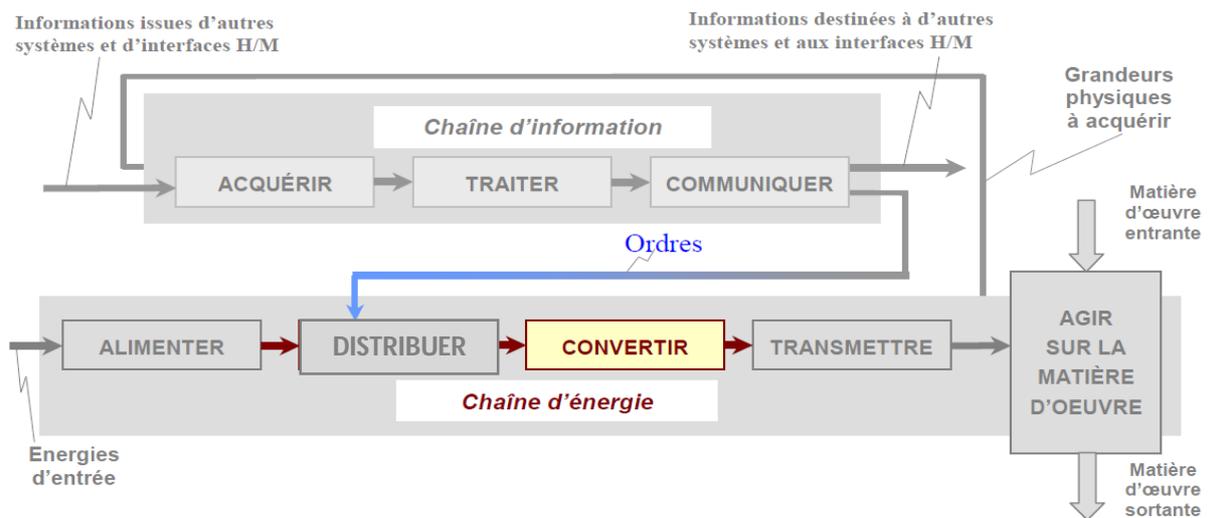


LES MOTEURS ELECTRIQUES

L'objectif de ce cours est de comprendre le fonctionnement des moteurs électriques. Nous verrons les notions de puissance, de pertes et de rendement. Nous étudierons de manière simplifiée comment ces moteurs peuvent être commandés. Une introduction sur le magnétisme et sur le triphasé sont nécessaires pour percevoir le fonctionnement de ses convertisseurs d'énergie. Les moteurs électriques se situent dans la chaîne d'énergie d'un système.



Nous étudierons dans ce cours les moteurs :

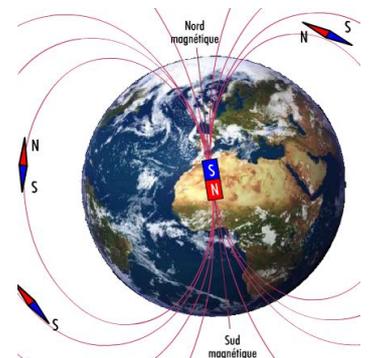
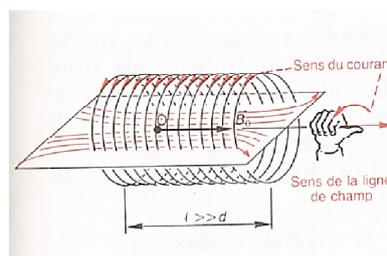
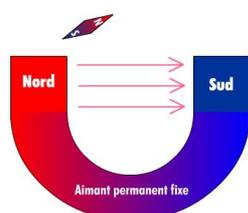
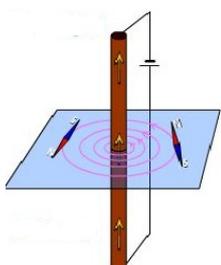
- A courant alternatif triphasé dit asynchrones triphasés
- A courant continu
- Pas à pas
- Les autres moteurs

Nous verrons comment se comporte, en termes de bilan énergétique, certains de ces moteurs.

I - INTRODUCTION SUR LE MAGNETISME :

I.1 - Notion de champ magnétique :

Le champ magnétique existe à l'état naturel, c'est le champ magnétique terrestre. Les aimants sont des éléments qui produisent un champ magnétique. Les courants électriques parcourant un conducteur électrique ou mieux encore une bobine produisent des champs magnétiques.

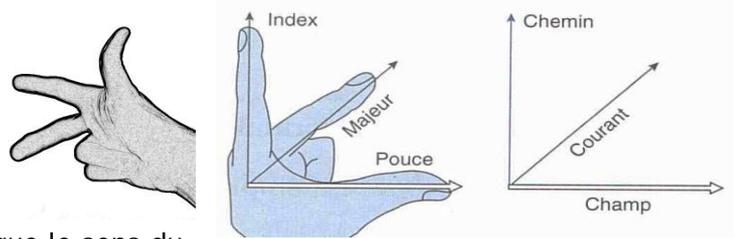




LES MOTEURS ELECTRIQUES

La règle de la main droite ou du tire-bouchon :

Le schéma ci-contre illustre l'utilisation de la règle de la main droite pour trouver le sens du champ magnétique dans une bobine.

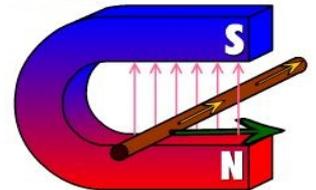


Remarque : Dans le cas du fil rectiligne, le pouce indique le sens du courant et les autres doigts indiquent le sens de rotation des lignes de champ.

Le champ magnétique peut être représenté par un vecteur \vec{B} et son unité est le Tesla (T)

I.2 - Force et champ magnétique :

Un conducteur parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique B est soumis à une force d'intensité F . C'est la loi de Laplace. Son orientation se détermine à l'aide de la règle des trois doigts de la main droite.

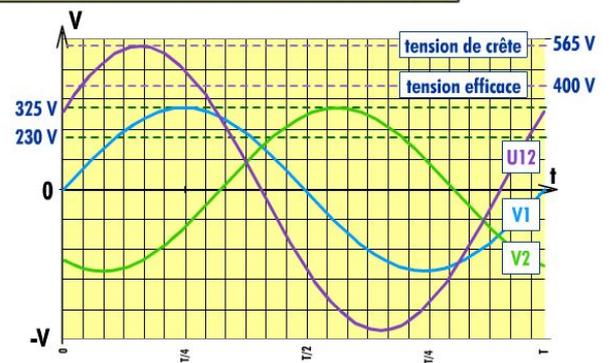
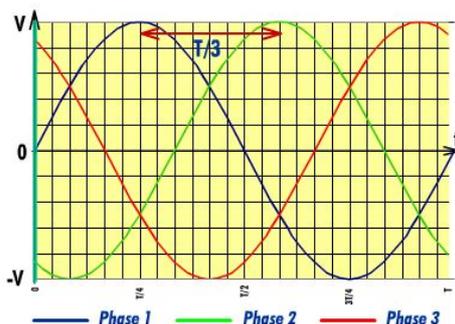
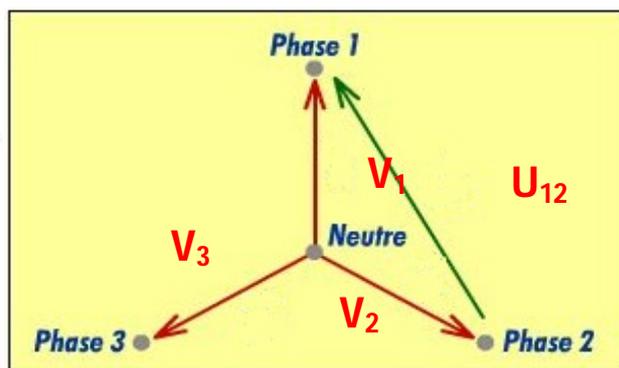
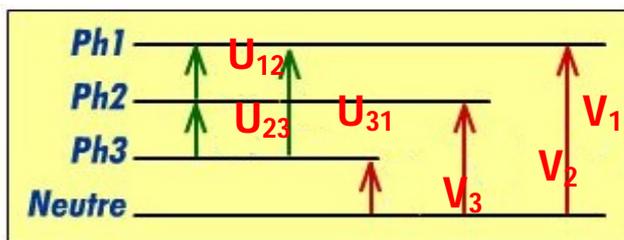


C'est ce principe qui est mis en œuvre dans les moteurs à courant continu.

II - INTRODUCTION SUR LE TRIPHASÉ :

Le transport de l'énergie en triphasé permet de véhiculer beaucoup plus de puissance. Le triphasé permet également de créer des champs magnétiques tournants qui sont à la base du fonctionnement des moteurs asynchrones triphasés. Ce sont les moteurs les plus utilisés. Une source triphasée est composée de trois générateurs monophasés 230 V ~ ayant un point commun le point neutre. Une directive européenne datant de 1988 impose un réseau 230V / 400 V à $\pm 10\%$.

Exercice : Placer les différents vecteurs tension sur les deux schémas (ci-dessous et ci-contre)

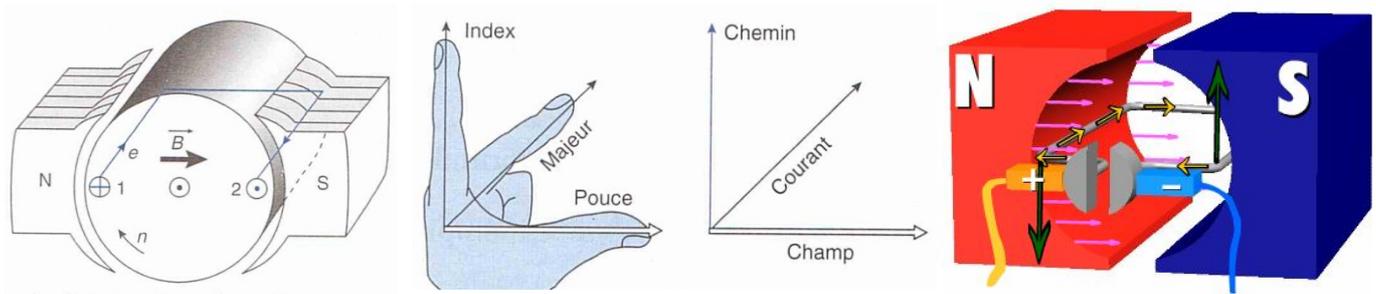


LES MOTEURS ELECTRIQUES

III - LE MOTEUR A COURANT CONTINU :

Ce moteur est utilisé plutôt pour les petites puissances. Ce moteur est facile à piloter en variation de vitesse. Son principe de fonctionnement repose sur la force de Laplace.

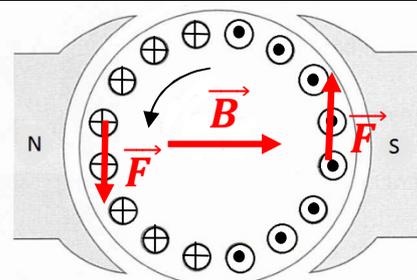
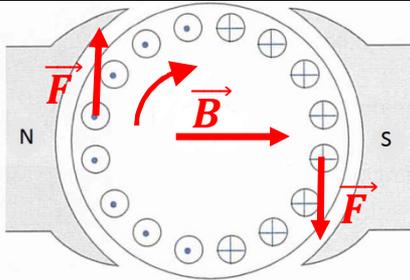
III.1. Principe de fonctionnement :



Exercice :

Sur le schéma ci-dessous, indiquez où se trouve le rotor et le stator et qui est inducteur et qui est induit. Placez le vecteur \vec{B} et indiquez le sens de rotation du moteur en positionnant une flèche sur le rotor.

Sur le schéma ci-dessous, indiquez le sens du courant en complétant les cercles correspondant à la représentation des spires pour avoir le sens de rotation donné.



III.2 - Constitution de la machine à courant continu :

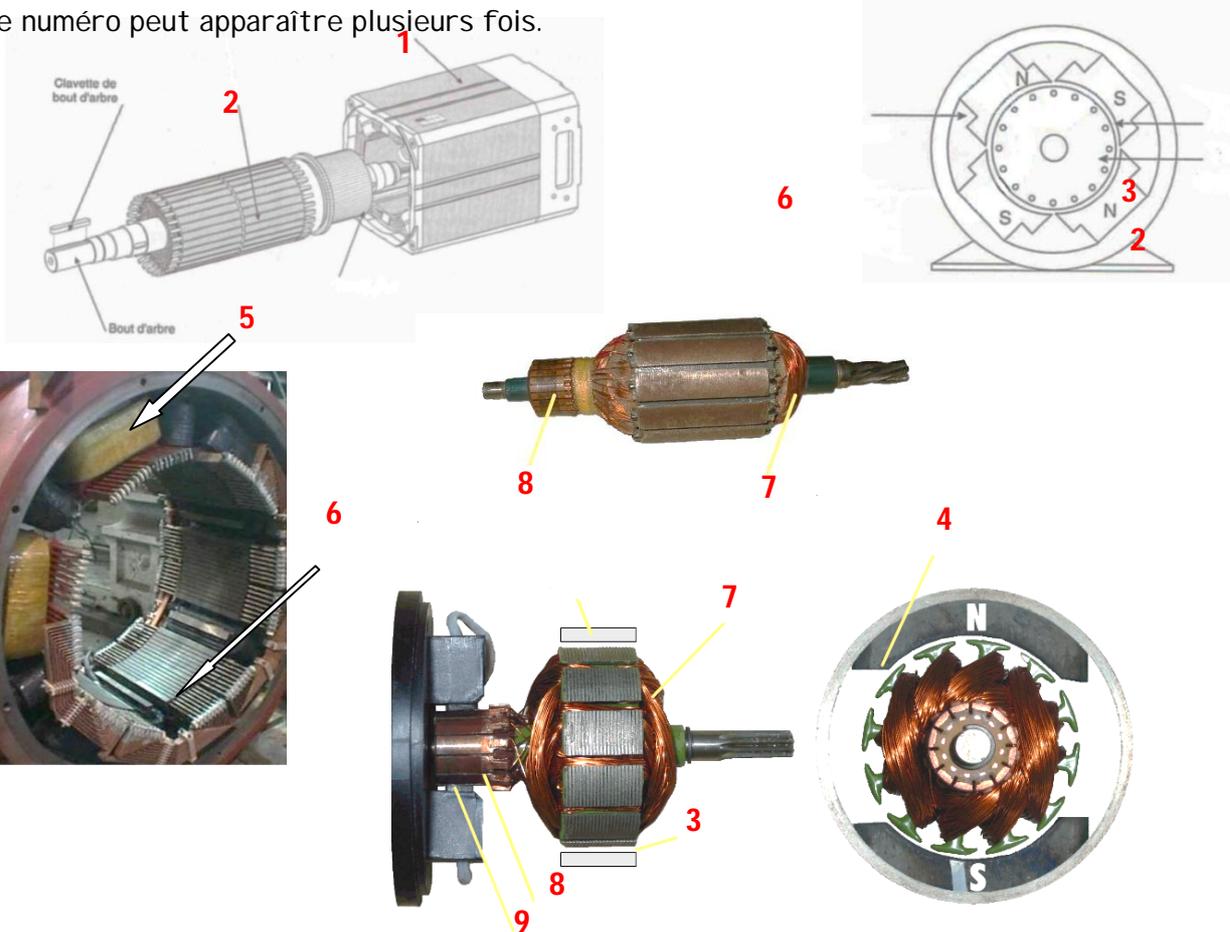
Cette machine est constituée :

- d'une partie fixe le **stator ou inducteur (1)** et une partie tournante, le **rotor ou induit (2)** séparées par un **entrefer (3)**. Le stator et le rotor sont constitués par un assemblage de tôles afin de limiter les pertes par courants de Foucault et par hystérésis ;
- d'un circuit inducteur, qui est la source de champ magnétique. Il peut être formé soit par des **aimants en ferrite (4)**, soit par des **bobines inductrices (5)** en série (électroaimants). Les bobines sont placées autour de **noyaux polaires (6)**. La machine est dite bipolaire si elle ne comporte qu'un pôle Nord et un pôle Sud ;
- d'un circuit induit au rotor. Il est formé de **conducteurs logés dans des encoches (7)** ;

LES MOTEURS ELECTRIQUES

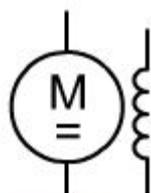
- d'un **collecteur (8)** qui, associé aux **balais (9)**, permet de relier le circuit électrique rotorique de l'induit à un circuit électrique extérieur à la machine. Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres, réunies aux conducteurs de l'induit en certains points. Les balais, portés par le stator, frottent sur les lames du collecteur, et permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit qui tourne et l'extérieur de la machine qui est fixe.

Exercice : Placer sur les croquis et images suivantes les numéros de constituants identifiés ci-dessus. Le même numéro peut apparaître plusieurs fois.

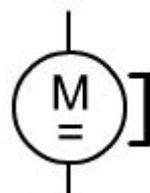


III.3 - Symboles et schéma de mise en œuvre :

Indiquer le nom des moteurs dont le symbole est donné ci-dessous



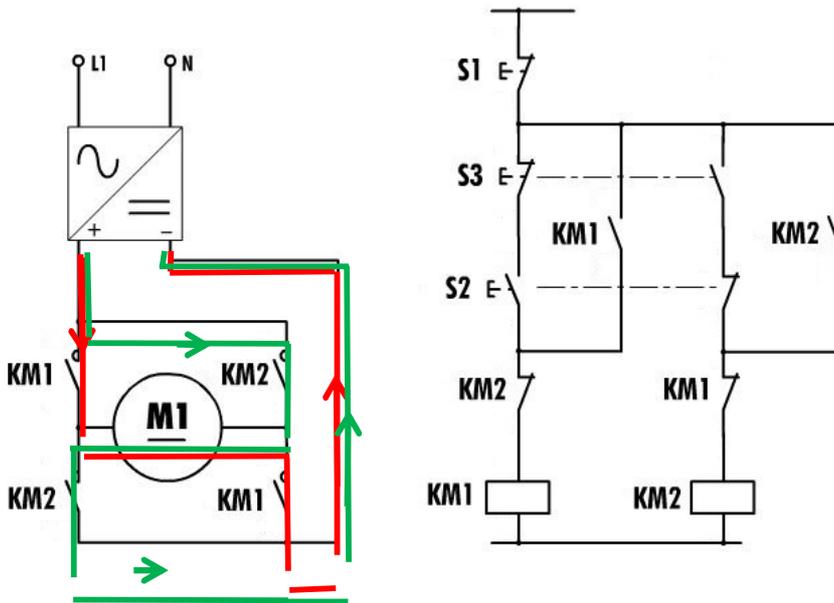
**Moteur à
excitation séparée**



**Moteur à aimants
permanents**

LES MOTEURS ELECTRIQUES

On donne les schémas de puissance et de commande qui permettent de commander une machine à courant continu vitesse fixe avec des contacteurs.



Surligner de deux couleurs sur le schéma de puissance la circulation du courant pour les deux sens de rotation du moteur.

Quel est le rôle de S1, S2 et S3 ?

S1 : Bouton poussoir arrêt

S2 : Bouton poussoir pour commander KM1 (sens 1)

S3 : Bouton poussoir pour commander KM2 (sens 2)

Quels sont les rôles des différents contacts de contacteur KM1 et KM2 sur le schéma de commande ?

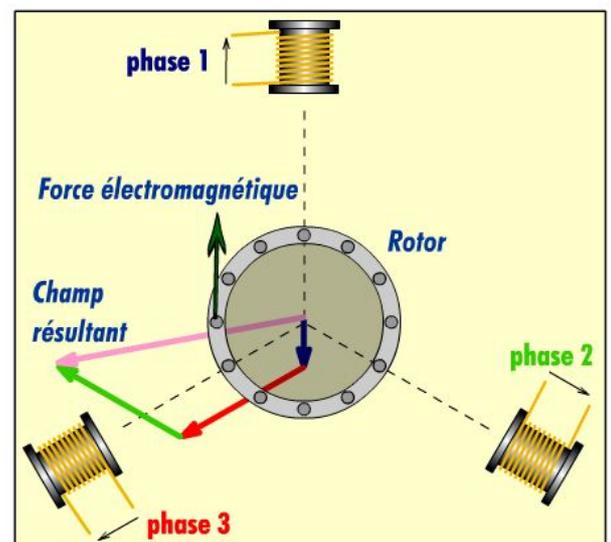
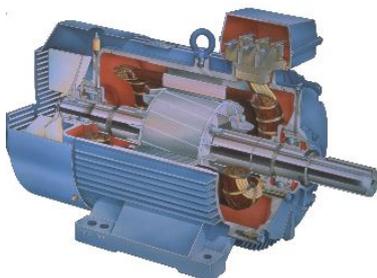
Les contacts NO assurent une fonction auto-maintient

Les contacts NC empêchent l'enclenchement simultané des deux contacteurs (verrouillages électriques)

IV - LE MOTEUR ASYNCHRONE :

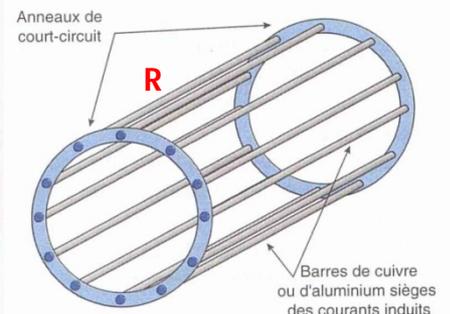
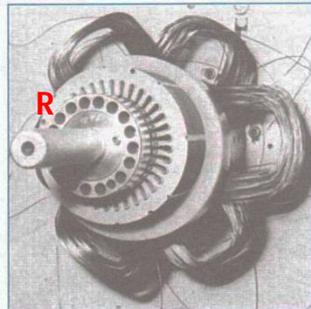
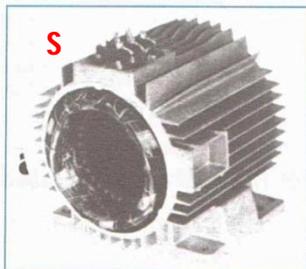
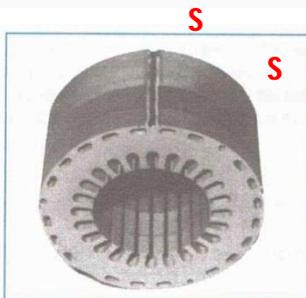
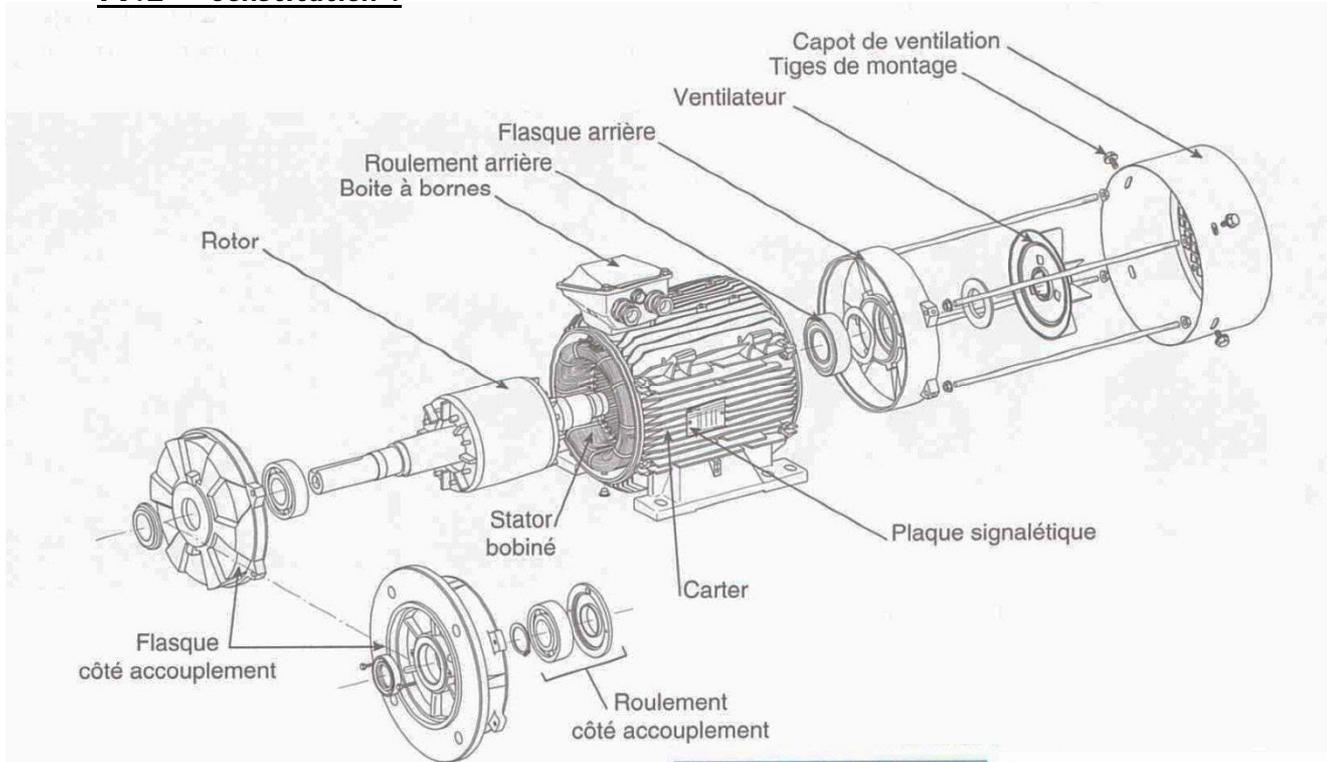
IV.1 - Principe de fonctionnement

Le stator bobiné est composé de trois bobines qui créent 3 champs magnétiques. Ces bobines étant alimentées par un système de courants triphasés créent chacune un champ magnétique variable. La composition de ces trois champs magnétiques crée un champ magnétique tournant qui entraîne le rotor en rotation par la création d'une force électromagnétique.



LES MOTEURS ELECTRIQUES

IV.2 - Constitution :



1. Indiquez sous chacune des pièces ci-dessus par les lettres S (Stator) et R (Rotor) où elle est située dans un moteur asynchrone.
2. L'induit se trouve-t-il au stator ou au rotor dans ce type de moteur ? Qu'en est-il de l'inducteur ?

L'induit se trouve au rotor et l'inducteur au stator.

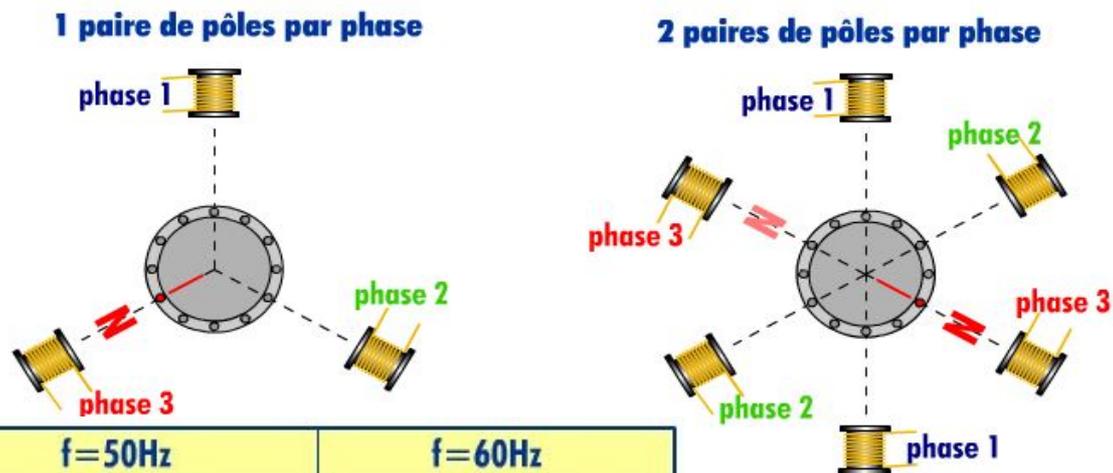
3. Quelle est la différence entre un rotor de moteur asynchrone du type représenté ci-dessus et celui d'un moteur à courant continu ?

Le rotor du moteur précédent n'est pas bobiné contrairement aux moteurs à courant continu. Il est constitué de deux anneaux et de barres en aluminium formant une cage. On parle de moteurs à cage.

LES MOTEURS ELECTRIQUES

IV.3 - Vitesse de rotation :

Pour une phase, une bobine crée un champ magnétique variable qui dispose d'un pôle nord et d'un pôle sud. S'il y a deux bobines il y a 4 pôles soit deux paires de pôles par phases.



p	f=50Hz	f=60Hz
1	50 tr/s = 3000 tr/min	60 tr/s = 3600 tr/min
2	25 tr/s = 1500 tr/min	30 tr/s = 1800 tr/min
3	16,66 tr/s = 1000 tr/min	20 tr/s = 1200 tr/min
...

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

Exercice : Compléter les deux éléments ci-contre et répondre à la question ci-après

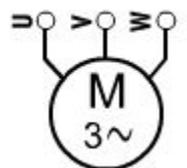
Si N_s est la vitesse en tr/s du champ magnétique tournant, quelle sera sa valeur en tr/min pour un moteur à 8 pôles s'il est alimenté par le réseau britannique en 60 Hz ?

$N_s = 15 \text{ tr/s}$ car $f = 60 \text{ Hz}$ et $p = 4$ donc $N_s = 900 \text{ tr/min}$

4.4. Symbole et couplage d'un moteur asynchrone triphasé

Les trois bobines d'un moteur asynchrone doivent être couplées et raccordées au réseau triphasé.

Les deux couplages possibles sont étoile ou triangle.



Le choix du couplage dépend :

- Des tensions du réseau.
- Des indications portées sur la plaque signalétique qui donne les conditions normales de fonctionnement (dites aussi nominales).

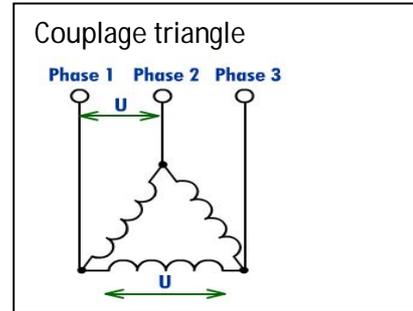
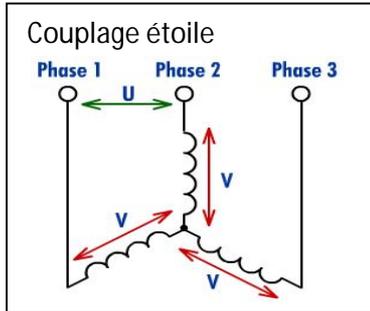
Détermination du couplage :

1. Si la plus petite tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phase du réseau on choisit le couplage triangle Δ .
2. Si la plus grande tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phase du réseau on choisit le couplage étoile Y.



LES MOTEURS ELECTRIQUES

La plaque signalétique indique le couplage à utiliser en fonction de la tension présente entre phases.

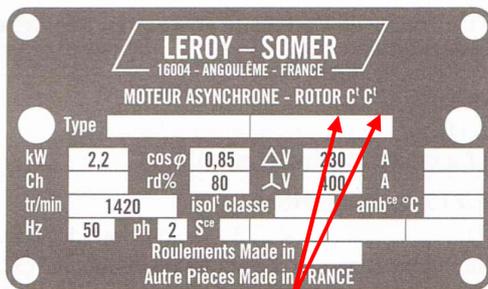


Le moteur ci-contre devra être couplé en triangle si la tension est de 230V entre phase et en étoile si elle est de 400 V entre phase

Le courant sous 230V sera de 2,1A et celui sous 400V sera de 1,2 A

4.5. Exercice

1. Quels devra être le couplage des deux moteurs ci-dessous s'ils sont alimenté par le réseau EDF 230V / 400 V



LEROY - SOMER					
MOT. 3 ~ LS 100 L					
N° 152/50 21 kg					
Code : T					
IP 55	I cl. F	40°C	S1	%	c/h
Δ 380	50	2840	3	0,89	6,4
Δ 400	50	2860	3	0,83	6,3
Δ 415	50	2870	3	0,79	6,7
6206 C3 9 h					
6205 ZZC3					
MOTEURS LEROY-SOMER					

La tension entre phase est de 400 V donc il devra être couplé en étoile

La tension entre phase est de 400 V donc il devra être couplé en triangle

2. Que devez-vous faire pour faire tourner un moteur asynchrone dans le sens contraire ?

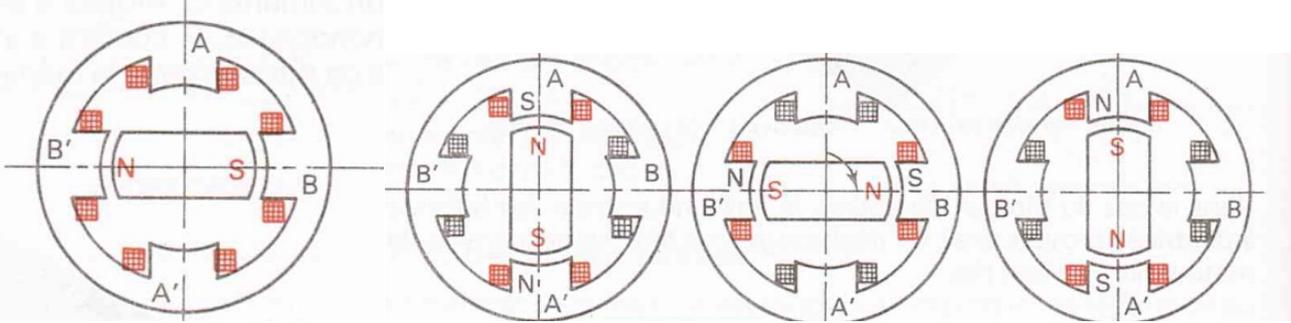
Il faut inverser deux phases du réseau d'alimentation

V - LE MOTEUR PAS A PAS :

Un moteur pas à pas est un moteur qui est alimenté en courant continu. Son rotor est constitué de N pôles magnétiques (Nord et Sud). Son Stator est constitué de bobines qui sont alimentées par un circuit électronique les unes à la suite des autres pour créer des pôles nord et sud en fonction du sens d'alimentation. On trouve par exemple ce type de moteur dans les imprimantes jet d'encre pour déplacer les têtes d'impression ou entraîner le papier.

LES MOTEURS ELECTRIQUES

Exemple moteur 4 pas / 4 positions



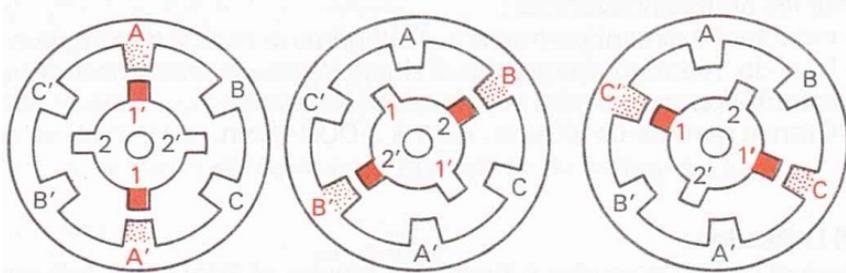
Moteur à l'arrêt

Bobine A/A' alimentée

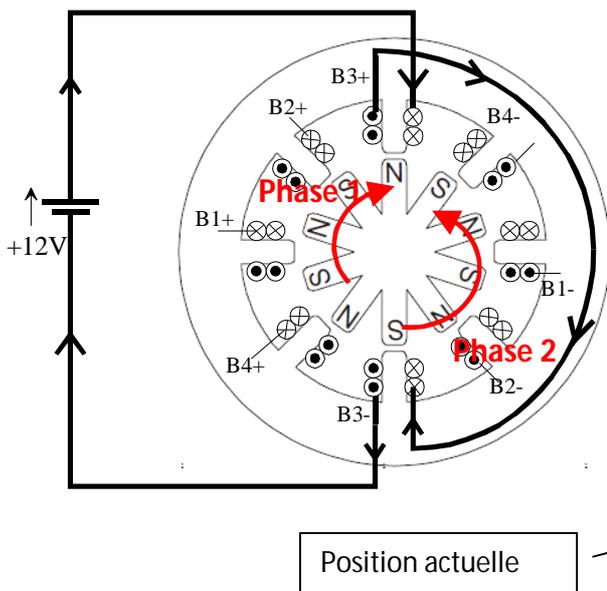
Bobine B/B' alimentée

Bobine A'/A alimentée

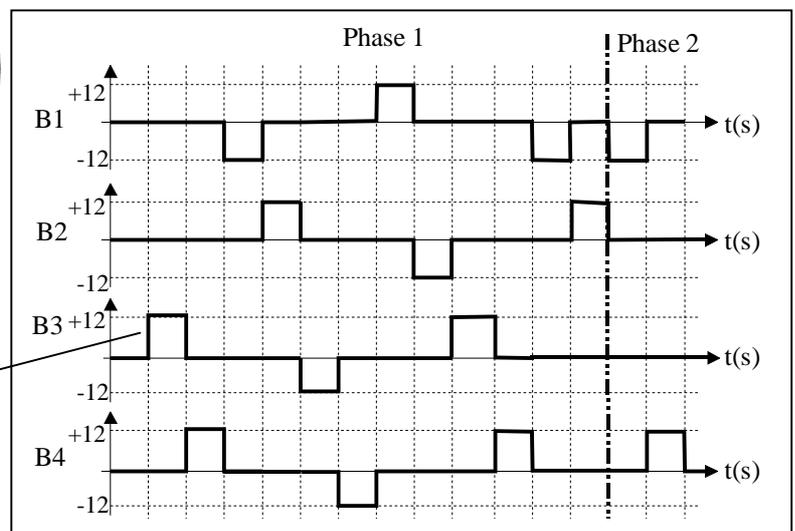
Exemple moteur 6 pas / 6 positions



Exercice : Soit le moteur pas à pas ci-dessous. Indiquer l'état électrique des bobines sur le chronogramme (valeur de la tension (+12V, -12V, 0V)). Les bobines sont représentées comme si elles étaient alimentées en +12V. La position actuelle correspond à une alimentation en +12V de la bobine B3 entre les bornes B3+ et B3-.



1. A l'aide des chronogrammes ci-dessous déterminer le sens de rotation du moteur pour la phase 1 et pour la phase 2.

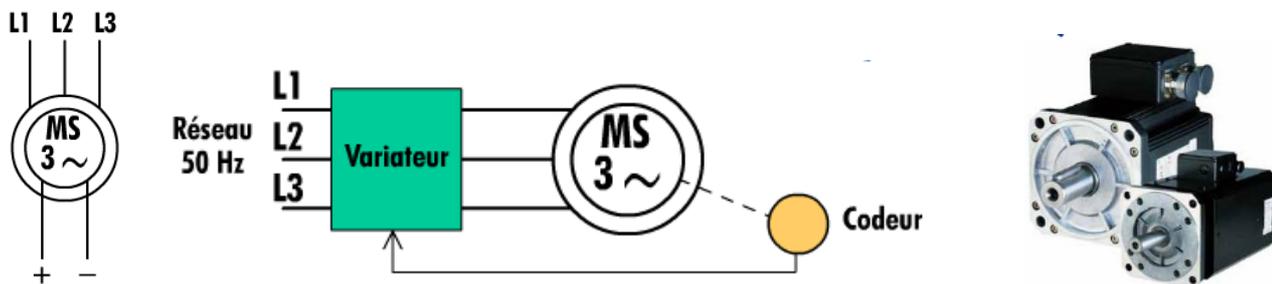


LES MOTEURS ELECTRIQUES

VI - AUTRES TYPES DE MOTEURS UTILISES :

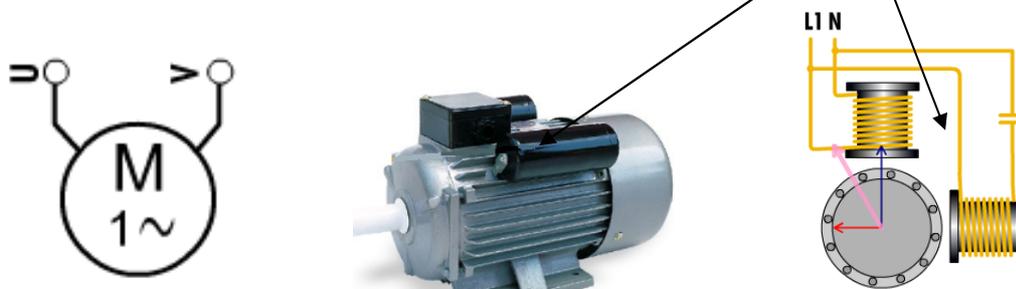
VI.1- Les moteurs synchrones :

L'inducteur alimenté en courant continu est au rotor. Le stator est alimenté en courant alternatif. Si ce moteur est entraîné par une turbine, il produit de l'électricité. On parle d'un alternateur. Ce moteur ne peut pas démarrer seul. Lorsque l'inducteur est à aimant permanent, que le stator est alimenté par un variateur commandé par un capteur placé sur l'arbre (codeur) ; on parle d'un moteur brushless. Son fonctionnement est identique à un moteur à courant continu sans (less) balais (brush).



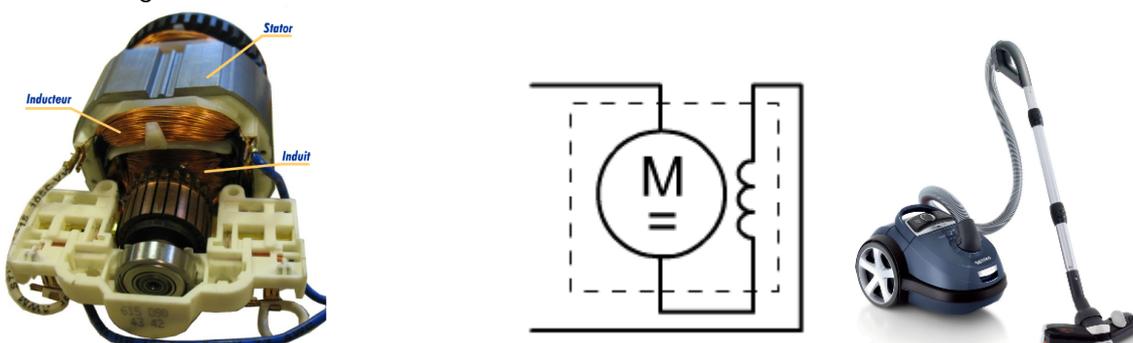
VI.2- Les moteur asynchrone monophasé :

Un moteur asynchrone monophasé est constitué de deux bobines et un condensateur pour créer un champ magnétique tournant qui permet d'entraîner le rotor en rotation.



VI.3. Les moteur universel :

Un moteur universel est un moteur à courant continu dont l'inducteur est branché en série avec l'induit. Il est alimenté en courant alternatif 230V ~. Ce moteur est très utilisé dans les jouets et le petit électroménager.





LES MOTEURS ELECTRIQUES

VII - EXERCICES DE SYNTHÈSE :

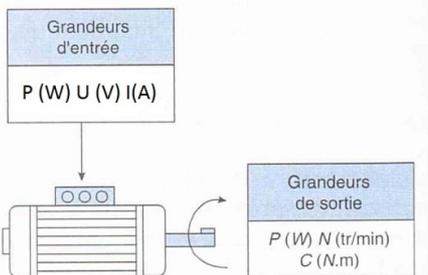
Compléter le tableau ci-dessous en indiquant :

1. Le type de courant qui alimente l'induit / l'inducteur (réponses : alternatif ou continu)
2. Ou se trouve l'induit et l'inducteur (réponses : Stator ou Rotor)
3. Si l'inducteur est (ou peut-il être) à aimants permanents (réponses : oui ou non)

	Le type de courant qui alimente l'induit	Le type de courant qui alimente l'inducteur	Où se trouve l'induit et l'inducteur	L'inducteur peut-il ou est-il à aimants permanents
Asynchrone triphasé		Alternatif	Induit = R / Induc = S	NON
Courant continu	Continu	Continu	Induit = R / Induc = S	OUI
Asynchrone monophasé		Alternatif	Induit = R / Induc = S	NON
Pas à Pas		Continu	Induit = R / Induc = S	NON
Synchrone	Alternatif	Continu	Induit = S / Induc = R	OUI
Universel	Alternatif	Alternatif	Induit = R / Induc = S	NON

VIII - APPROCHE COMPORTEMENTAL DES MOTEURS :

Pa électrique en W

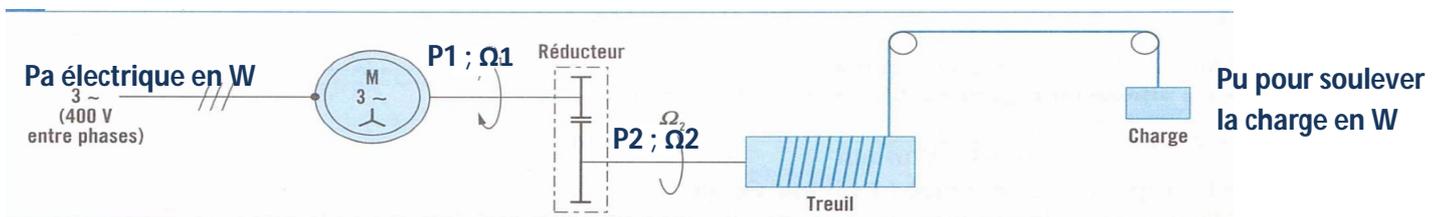


$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Pu mécanique utile en W
P = C × Ω

$$\Omega = \frac{2\pi \times N}{60}$$

VIII.1 - Problème du rendement / approche globale à une chaîne d'énergie



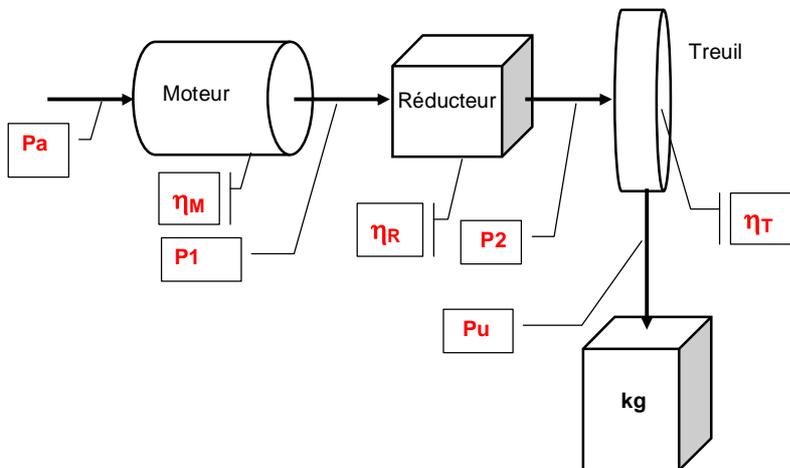
LES MOTEURS ELECTRIQUES

Dans l'exemple ci-dessus :

- le rendement η_M du moteur est dû aux pertes dans le moteur;
- le rendement η_r du réducteur est dû aux pertes dans le réducteur;
- le rendement η_t du treuil et des organes de transmission est dû aux pertes dans le treuil et les poulies.

Exercice :

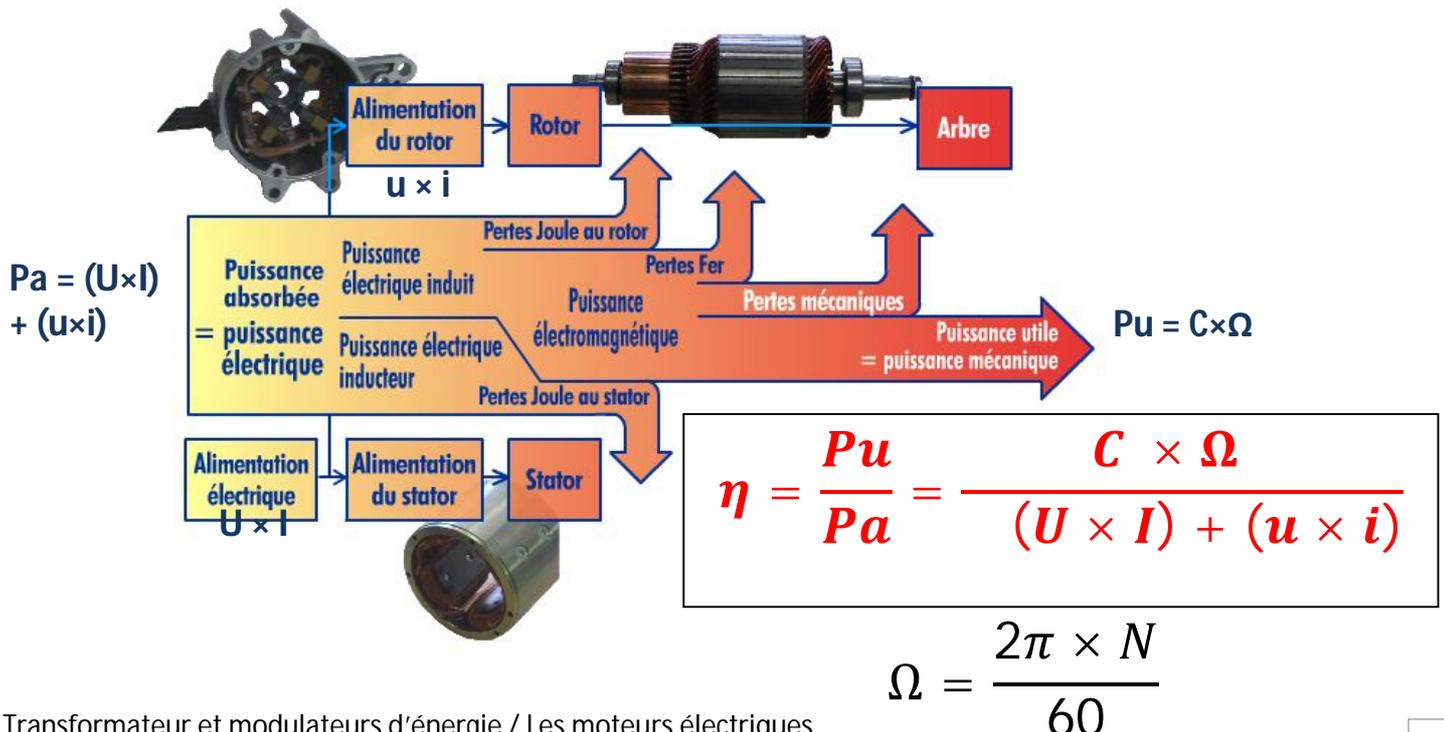
1. Sachant que le rendement d'une chaîne d'énergie est $\eta = \frac{P_u}{P_a}$ et connaissant la puissance absorbée P_a et les différents rendements η_M , η_r et η_t ; comment pouvez-vous calculer P_u ? Compléter le schéma ci-dessous en plaçant les différentes puissances et les différents rendements.



2. La vitesse Ω_2 est-elle plus grande ou plus petite que Ω_1 ?

Non car il y a un réducteur de vitesse

VIII.2 - Bilan des puissances d'un moteur à courant continu :





LES MOTEURS ELECTRIQUES

Exercice : Identification et comportement d'une machine à courant continu :

On donne deux plaques signalétiques relevées sur deux moteurs à courant continu :

Plaque signalétique 1

tension d'excitation.

Couple nominal	 LR 57008  IEC 34.1,1990						 LEROY SOMER 2 102 451 / A MADE IN FRANCE																	
	 MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR																							
Puissance mécanique développée	TYPE: LSK 1604 S 02						N° 700000/10						9/1992						M 249 kg					
	Classe / Ins class H						IM 1001						IP 23						IC 06					
	M _{nom} / Rated torque 301 N.m						Altit. 1000 m						Temp. 40 °C											
			kW		min ⁻¹		V		A		V		A											
①	Nom./Rat.		36,3		1150		440		95,5		360		3											
②			3,63		115		44		95,5		360		3											
③			36,3		1720		440		95,5		240													
T						Système peinture: I						Induit / Arm.						Excit. / Field						
○ Service / Duty S1						DE 6312 2RS C3						NDE 6312 2RS C3						○						

Vitesse de rotation nominale

Tension nominale aux bornes de l'induit

Courant nominal dans l'induit

1. Avec les données de la ligne 1, calculez les puissances électriques absorbées par l'induit et par l'inducteur

$$P_a = (U \times I) + (u_x i) = (440 \times 95,5) + (360 \times 3) = 43100 \text{ W}$$

2. En déduire le rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{36,3}{43,1} = 0,842$$

3. Calculer avec les données de la ligne 1 le couple en Nm que peut fournir le moteur

$$P_u = C \times \Omega \text{ donc } C = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{36300}{120,43} = 301,4 \text{ Nm}$$

$$\Omega = \frac{2\pi \times N}{60} = \frac{2\pi \times 1150}{60} = 120,43$$

4. Que pouvez-vous conclure si vous observez la tension d'induit et la vitesse pour les lignes 1 et 2 ?

La vitesse est directement proportionnelle à la vitesse

5. La tension d'excitation a-t-elle une influence sur la vitesse ?

On peut remarquer que la tension d'excitation a une influence sur la vitesse avec la ligne 3 si u diminue alors N augmente

LES MOTEURS ELECTRIQUES

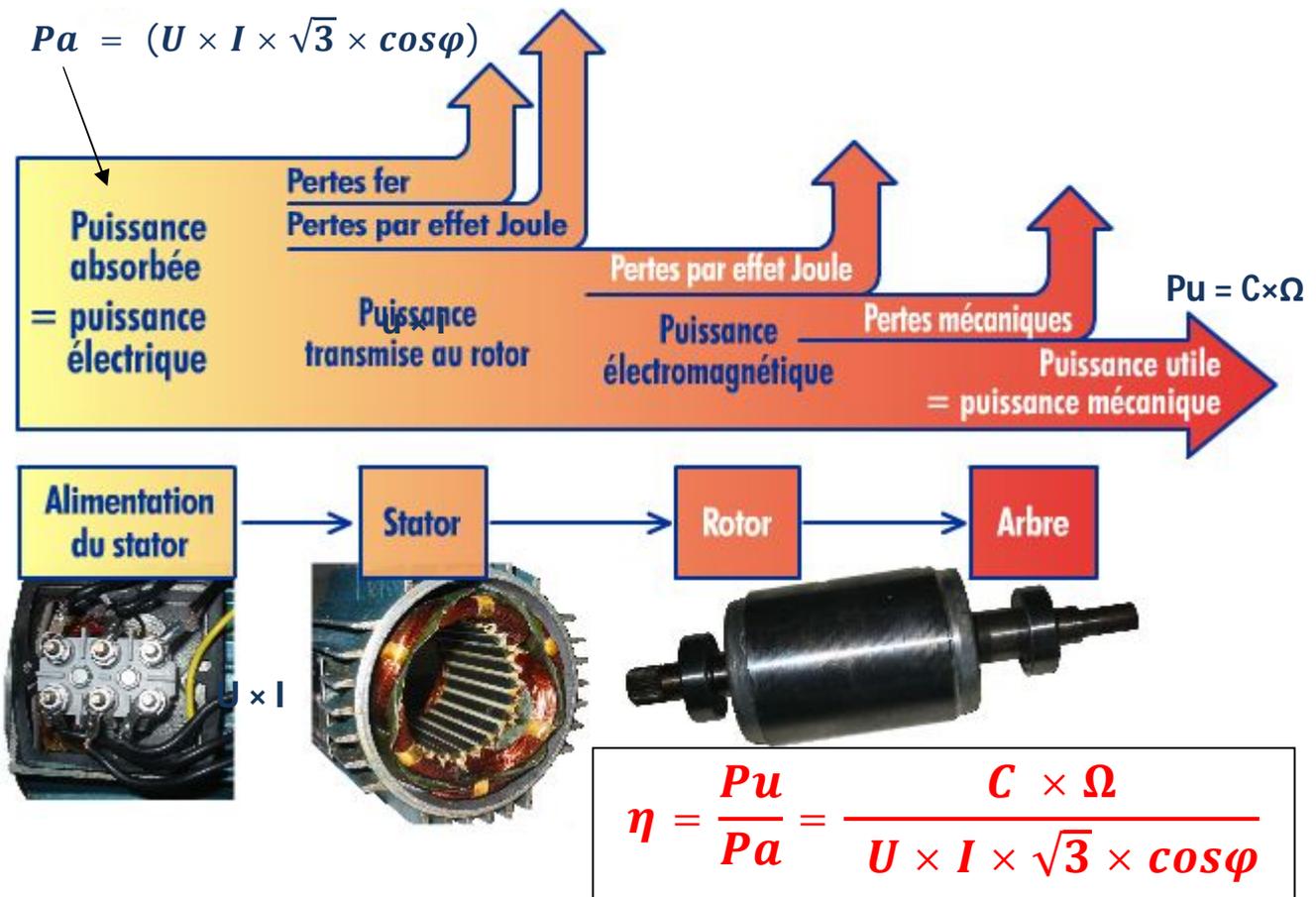
Plaque signalétique 2

	Couple nominal	Vitesse de rotation nominale
Puissance mécanique développée	5.39 N·m	1500 r/min
Courant nominal	7.1 A	200 V
Tension nominale aux bornes de l'induit	200 V	CONT. ins. F
O/N 3P0037 001 -078		
S/N B0036D037030078	DATE 0306	
YASKAWA ELECTRIC MADE IN JAPAN		

6. Quelle est la différence entre le moteur de la plaque 1 et celui de la plaque 2 ?

Le moteur de la plaque 2 est à aimant permanent car il n'y a pas de tension d'excitation

VIII.3 - Bilan des puissances d'un moteur asynchrone :

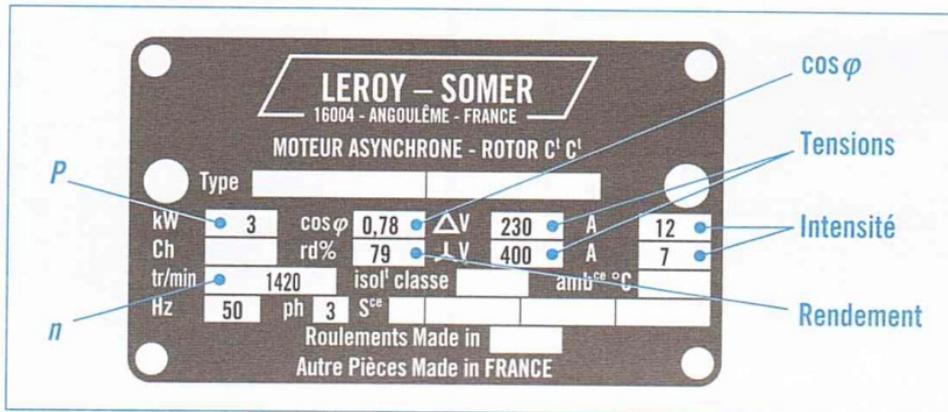




LES MOTEURS ELECTRIQUES

Exercice : Identification et comportement d'une machine asynchrone triphasé :

Soit un moteur alimenté par le réseau 230V / 400V EDF dont la plaque signalétique est donnée ci-dessous :



Attention la puissance donnée sur une plaque signalétique est toujours la puissance mécanique utile

- Calculer la puissance absorbée de deux manières avec les différentes données de la plaque signalétique

$$P_a = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos \phi = 400 \times 7 \times \sqrt{3} \times 0,78 = 3782 \text{ W}$$

$$P_a = \frac{P_u}{\eta} = \frac{3}{0,79} = 3797 \text{ W} \text{ Petite différence pas bien importante (valeurs approchées donnée par le constructeur)}$$

- Si la vitesse du champ magnétique est de 1500 tr/min, de combien de pôle dispose le moteur ?

$$N_s = 1500 \text{ tr/min soit } 25 \text{ tr/s et } f = 50 \text{ Hz donc } p = f / N_s = 2 \text{ donc le moteur dispose de } 4 \text{ pôles}$$

- Calculer le couple nominal de la machine

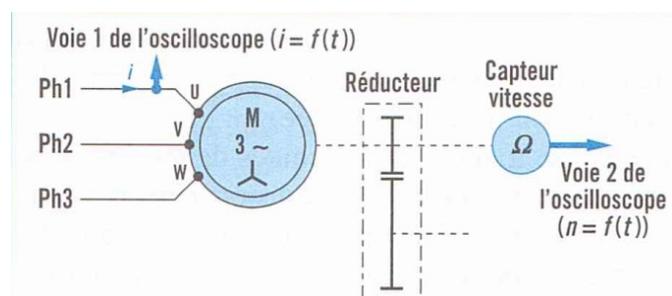
$$P_u = C \times \Omega \text{ donc } C = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{3000}{148,7} = 20,17 \text{ Nm}$$

$$\Omega = \frac{2\pi \times N}{60} = \frac{2\pi \times 1420}{60} = 148,7$$

- Quel sera le couplage de ce moteur s'il est alimenté par le réseau EDF

La tension entre phase est de 400 V donc il devra être couplé en étoile

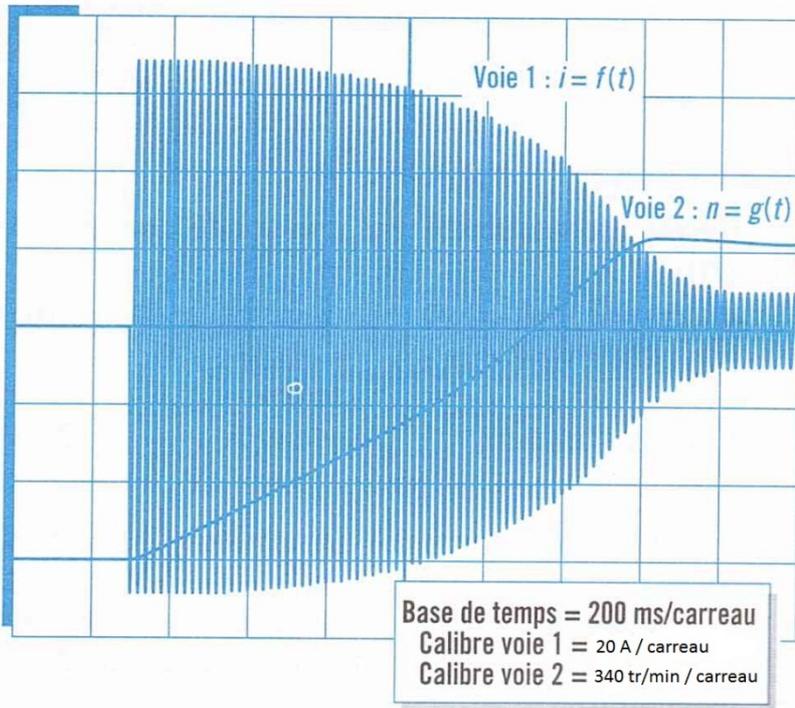
Le moteur entraîne un système mécanique de levage comme dans le chapitre 7.1. On installe un système de mesure qui permet de visualiser avec un oscilloscope la vitesse du moteur et le courant absorbé.





LES MOTEURS ELECTRIQUES

On relève les deux oscillogrammes pendant le démarrage du moteur :



5. Pourquoi le signal courant dans le moteur apparaît-t-il comme « un peigne » ?

Le signal a une fréquence de 50 Hz avec $T = 20$ ms et il y a 200 ms par carreau soit 10 périodes.

6. Déterminez le temps de démarrage du moteur.

Pour passer de la vitesse nulle à la vitesse maximale il y a 6,5 carreaux soit 1300 ms donc 1,3 s

7. Déterminez la vitesse atteinte

La vitesse maximale est de 4,2 divisions soit 1428 tr/min

8. Déterminez la valeur crête du courant pendant la phase de démarrage. En déduire la valeur efficace.

Le courant maximal est de 3,5 divisions soit 70 A et donc la valeur efficace sera de $\frac{70}{\sqrt{2}} = 49,5$ A

9. Déterminez la valeur crête du courant lorsque le moteur a démarré.

Le courant maximal est de 0,5 divisions soit 10 A (la valeur efficace sera de $\frac{10}{\sqrt{2}} = 7$ A)

10. Quel phénomène constatez-vous lorsque le moteur démarre ?

Il y a une surintensité au moment du démarrage de l'ordre de 7 fois le courant nominal ($I_d = 49,7$ A et $I_n = 7$ A)

11. Analysez les courbes $C = f(n)$ et $I = f(n)$ ci-dessous pour faire le lien avec les différentes grandeurs qui ont été vues sur le moteur asynchrone.



LES MOTEURS ELECTRIQUES

12. Sur les courbes ci-dessous, renseignez les valeurs attendues (bulles) avec les résultats que vous avez obtenu aux questions 6,7 et 8.

